

MAGNITUD REPRESENTATIVA DEL CATÁLOGO DE SISMOS DE COLOMBIA

Alexander Ivanovich Caneva Rincón*

Resumen: este trabajo presenta los resultados de la estimación de la magnitud representativa M_{min} del catálogo de sismos de Colombia, así como sus variaciones en el espacio y en el tiempo. Se lleva a cabo un análisis de la metodología empleada y de las características del desarrollo de la red sismológica en Colombia.

Abstract: The cut-off magnitude (representative magnitude) M_{min} and its variations in space and time are estimated for the earthquake catalogue of Colombia. An analysis of the methodology and the characteristics of the development of the seismological net of Colombia are presented.

1. INTRODUCCIÓN

Los registros de la actividad sísmica de Colombia se caracterizan por el alto grado de heterogeneidad tanto en el tiempo como en el espacio. La heterogeneidad de los registros en el tiempo está relacionada, por ejemplo, con la ausencia de registros instrumentales antes del año 1923 [Espinosa, 1993; Ramírez, 1975], y con la lenta introducción de nuevas estaciones, es decir, el lento desarrollo de la red sismológica en el país [Ramírez y Goberna, 1980; Ingeominas, 1995].

La red sismológica en Colombia se ha caracterizado por desarrollarse en oleadas, con intervalos de tiempo muy extensos entre los momentos de cambio y modernización de las estaciones y de la red misma [Ingeominas, 1995]. Indudablemente, la introducción de instrumentos más sensibles, con el consiguiente incremento del poder de resolución de la misma, se refleja en la calidad de los datos que ingresan al catálogo de sismos. Es de esperar que la calidad y la cantidad de datos obtenidos después de complementar la red sismológica con instrumentos nuevos han de ser sustancialmente diferentes para antes y después de esta innovación. Respecto a la heterogeneidad espacial debemos considerar dos aspectos; en primer lugar, la calidad de las estaciones sismológicas y, en segundo

* Físico y magíster en ciencias físicas y matemáticas, PhD en física, Universidad Lomonosov, Moscú, Rusia.

lugar, su ubicación geográfica [Smirnov, 1997]. En referencia al primer aspecto cabe anotar que los instrumentos utilizados en diferentes redes en el país (Red Sismológica Nacional de Colombia RSNC, redes locales, etc.) se diferencian sustancialmente entre sí en cuanto a calidad y cantidad; del segundo aspecto se puede mencionar que son varias las fuentes que suministran información para conformar el catálogo general de sismos (desde redes locales hasta redes internacionales) [Ingeominas, 1995] lo que incrementa la heterogeneidad de los datos, pues las dimensiones de las regiones atendidas por estas redes son muy diferentes.

2. MAGNITUD REPRESENTATIVA

Al llevar a cabo el estudio del régimen sísmico de una región determinada es indispensable comparar los datos obtenidos en diferentes puntos del espacio y en distintos instantes de tiempo, para lo cual es necesario determinar el nivel de homogeneidad de los datos disponibles. Las redes sismológicas cuentan con características que determinan la *representatividad* de los datos por ellas registrados (es decir qué tan fiables son éstos). Entre estas características se tiene, por un lado, la *sensibilidad*, que es determinada por la *magnitud representativa* M_{min} , la cual corresponde al valor mínimo de magnitud de los sismos que son registrados sin interrupción en una región dada del espacio, y, por otro lado, el *poder de resolución*, que está relacionado con la incertidumbre en la determinación de las coordenadas, del tiempo y de la magnitud del sismo [Smirnov, 1997].

Este trabajo se concentra en el análisis del comportamiento de la magnitud representativa. Dicho análisis es indispensable para llevar a cabo la comparación de registros correspondientes a diferentes períodos de la historia del desarrollo de la red sismológica de una región determinada, así como también los registros correspondientes a diferentes regiones geográficas. La región objeto de estudio es el territorio de Colombia.

Al llevar a cabo la estimación de la magnitud representativa se asume que la distribución de los sismos según los valores de sus energías está dada por la ley de potencia, es decir, que el número de sismos en función de su energía (o su magnitud) se expresa mediante la relación de Gutenberg-Richter [Aki y Richards, 1980] llamada también *ley de repetitividad o recurrencia sísmica*. Si cierto número de eventos de determinada magnitud M , por una u otra razón, no figuran en el catálogo (no fueron registrados), entonces el número total de eventos N de dicha magnitud, no corresponderá al *valor esperado* según el gráfico de recurrencia (gráfico del número de sismos en función de su energía o de su magnitud), sino a un valor menor. En el gráfico de recurrencia esta situación se evidencia debido a que el valor N no coincide con aquel que se esperaría encontrar según la recta correspondiente a la relación de Gutenberg-Richter [Pisarenko, 1989]:

$$\lg N = -b(M - M_0) + \text{constante} \quad (1)$$

donde:

b : pendiente del gráfico de recurrencia (b -value)

M : magnitud

En lugar de esto, el valor N se encuentra por debajo de dicha recta. Justamente esto es lo que se observa al trabajar con valores de magnitud bajos. En este caso, debido al grado de sensibilidad de los instrumentos, los eventos cuya magnitud es inferior a cierto valor umbral no son registrados, por lo que se presenta una inflexión brusca del gráfico de recurrencia. Al identificar esta inflexión se puede juzgar acerca de la mínima magnitud registrada M_{\min} por la red. La desviación (alejamiento) con respecto a la curva del gráfico de recurrencia (correspondiente a la ley de potencia), para valores pequeños de magnitud, es un indicador de la sensibilidad de los instrumentos que componen la red sismológica.

3. MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD REPRESENTATIVA

La estimación de M_{\min} se efectúa siguiendo un algoritmo propuesto por Pisarenko [1989], el cual se expone brevemente a continuación. Para llevar a cabo la estimación se utilizan histogramas de distribución de sismos según sus valores de magnitud desde M_{\min} hasta M_{\max} . Para determinar el valor de M_{\min} (para valores $M \geq M_{\min}$ el gráfico de repetitividad es lineal) se revisan todos los valores sucesivos de M_{\min} . El valor inicial de M_{\min} no debe sobrepasar el valor de magnitud M_0 al cual le corresponde el máximo del histograma de distribución. El valor M_{\min_0} es escogido teniendo en cuenta la condición:

$$M_{\min_0} = \max M : \begin{cases} M < M_0 \\ N(M_0) - N(M) \leq \Delta N(M_0) + \Delta N(M) \end{cases} \quad (2)$$

donde:

$N(M)$: número de eventos en cada barra del histograma

$\Delta N(M) = (N(M))^{1/2}$: error

Primero se revisa la concordancia entre la distribución empírica (histograma) y la distribución teórica de acuerdo con la ley de Gutenberg-Richter (ecuación 1). Si se encuentra concordancia para el valor seleccionado de M_{\min} , entonces éste es el valor buscado de la

magnitud representativa. Si el gráfico se desvía respecto a la línea recta correspondiente a la distribución teórica (ecuación 1), entonces, primero, aplicando el método de estimación de máxima verosimilitud [Hudson, 1964] para los registros con valores $M \geq M + \Delta M$, se estima la pendiente de inclinación del gráfico de repetitividad y el valor de un parámetro llamado *actividad sísmica* [Caneva, 2000].

Tomando como base los valores obtenidos de estos dos parámetros se calcula el valor teórico del número de eventos N_T en el intervalo $[M_{\min}, M_{\min} + \Delta M]$, y se compara con el valor empírico (observado) del número de sismos N_E . Luego, estadísticamente se comprueba la condición $N_T > N_E$. Si esta condición se cumple, entonces la causa del alejamiento de la curva del gráfico de recurrencia respecto a una línea recta se considera la *no-representatividad* (baja fiabilidad del registro) de los eventos de magnitud M_{\min} . El valor de M_{\min} es incrementado en δM_{\min} y todo el procedimiento se repite. Si la condición $N_T > N_E$ no se cumple, entonces se considera que el origen de la inflexión del gráfico de repetitividad es de carácter natural.

4. RESULTADOS

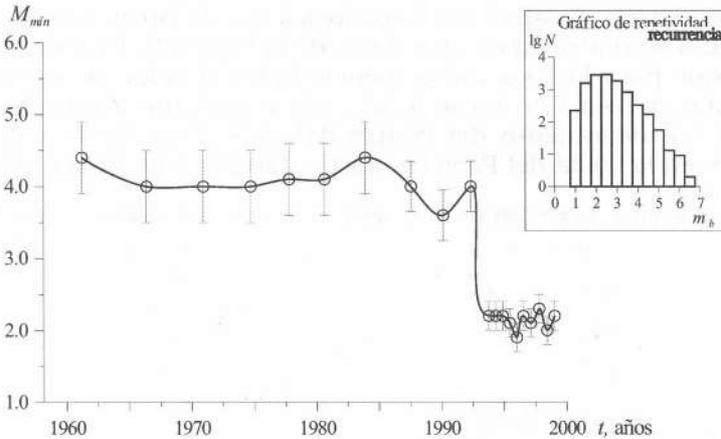
Para llevar a cabo la estimación de la magnitud representativa M_{\min} fue desarrollado un software que se aplicó al catálogo de sismos de Colombia del periodo 1958-1999. El catálogo, suministrado por el Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (Ingeominas) [Ingeominas, 1999] contenía 21008 registros con información estándar de coordenadas, tiempo y magnitud, entre otras. Este catálogo fue procesado eliminando los registros dobles (repetidos) mediante la aplicación de un filtro. Luego fueron eliminadas las réplicas aplicando un algoritmo de limpieza de *aftershocks* [Molchan y Dmitrieva, 1991]. Después de esta "limpieza" el número de registros pasó a ser de 13747. El catálogo depurado fue el utilizado para llevar a cabo la estimación de la magnitud representativa. Debido a que el catálogo suministrado por Ingeominas fue recibido por partes (a medida que se incrementaba el número de eventos registrados en la base de datos del Ingeominas se proporcionaba nueva información) y éstas se diferenciaban por el tipo de magnitud que en ellas figuraba (M_s, m_b, M_l) se tomó la decisión de unificar el catálogo de acuerdo con el tipo de magnitud, calculando para todos los registros el tipo de magnitud m_b . Así, al estimar la magnitud representativa, el tipo de magnitud con que se trabaja es m_b . La estimación de M_{\min} se llevó a cabo recorriendo el catálogo con una *ventana temporal móvil* que contenía un número determinado de eventos (1000 eventos por ventana) y que era desplazada en el tiempo sin superposiciones.

En la Figura 1 se muestran las variaciones en el tiempo de la magnitud representativa en Colombia en el periodo considerado y el gráfico de recurrencia correspondiente. Se puede observar el proceso de desarrollo de la red sísmológica en el país. Para el periodo 1958-1993 el valor de la magnitud representativa oscila en torno al valor $M_{\min} \approx 4$

(magnitud m_b), lo cual corresponde a un nivel *regular* de representatividad de la red, en comparación con las redes existentes en otros países a comienzos de la década de los noventa.

De esta manera, para este intervalo de tiempo son fiables, en cuanto a magnitud se refiere, los registros con $m_b \geq 4$. La disminución de M_{\min} , con respecto al valor mencionado, comenzando aproximadamente en 1987 (alcanzando un valor de $M_{\min} \approx 3,5$), es probable que esté relacionada con la inclusión en el catálogo utilizado en este estudio de datos de redes locales nuevas como, por ejemplo, del Observatorio Sismológico del Sur-Occidente Colombiano (OSSO), así como también del *International Seismological Center* (ISC). La adición de estos datos a los procedentes de las redes que operaban hasta esa fecha en el país, incrementa la precisión de los datos en comparación con los que se tenían hasta 1987, con lo que se puede esperar que el valor de la magnitud representativa disminuya, como efectivamente se observa en la Figura 1.

Figura 1. Colombia. Variación de la magnitud representativa, 1958-1999, y gráfico de recurrencia



Fuente: el autor.

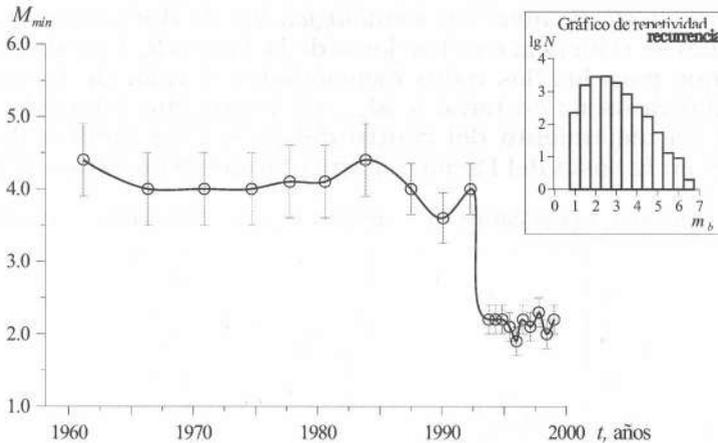
Se puede observar que a mediados de 1993 tiene lugar una disminución brusca de la magnitud representativa hasta alcanzar un valor medio de $M_{\min} \approx 2,1$. Esta disminución indica un mejoramiento sustancial de la infraestructura sismológica en el país, que coincide con la entrada en funcionamiento de la Red RSNC. El valor $M_{\min} \approx 2,1$ es característico para redes altamente sensibles, si se recuerda que se está trabajando con el tipo de magnitud m_b . Aun cuando a mediados de los años noventa en la RSNC entraron en funcionamiento algunas estaciones adicionales, no se observan cambios sustanciales del comportamiento de la magnitud representativa en el tiempo. Probablemente esto está relacionado con la baja densidad de estaciones en el país.

A continuación se analizan las variaciones de la magnitud representativa en el espacio. El estudio en este sentido se limitó a los registros correspondientes al periodo 1993-1999, es decir, a los datos suminis-

(magnitud m_b), lo cual corresponde a un nivel *regular* de representatividad de la red, en comparación con las redes existentes en otros países a comienzos de la década de los noventa.

De esta manera, para este intervalo de tiempo son fiables, en cuanto a magnitud se refiere, los registros con $m_b \geq 4$. La disminución de M_{\min} , con respecto al valor mencionado, comenzando aproximadamente en 1987 (alcanzando un valor de $M_{\min} \approx 3,5$), es probable que esté relacionada con la inclusión en el catálogo utilizado en este estudio de datos de redes locales nuevas como, por ejemplo, del Observatorio Sismológico del Sur-Occidente Colombiano (OSSO), así como también del *International Seismological Center* (ISC). La adición de estos datos a los procedentes de las redes que operaban hasta esa fecha en el país, incrementa la precisión de los datos en comparación con los que se tenían hasta 1987, con lo que se puede esperar que el valor de la magnitud representativa disminuya, como efectivamente se observa en la Figura 1.

Figura 1. Colombia. Variación de la magnitud representativa, 1958-1999, y gráfico de recurrencia



Fuente: el autor.

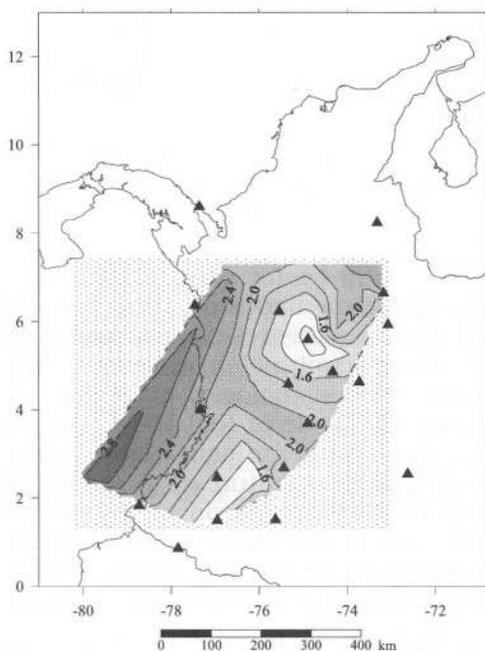
Se puede observar que a mediados de 1993 tiene lugar una disminución brusca de la magnitud representativa hasta alcanzar un valor medio de $M_{\min} \approx 2,1$. Esta disminución indica un mejoramiento sustancial de la infraestructura sismológica en el país, que coincide con la entrada en funcionamiento de la Red RSNC. El valor $M_{\min} \approx 2,1$ es característico para redes altamente sensibles, si se recuerda que se está trabajando con el tipo de magnitud m_b . Aun cuando a mediados de los años noventa en la RSNC entraron en funcionamiento algunas estaciones adicionales, no se observan cambios sustanciales del comportamiento de la magnitud representativa en el tiempo. Probablemente esto está relacionado con la baja densidad de estaciones en el país.

A continuación se analizan las variaciones de la magnitud representativa en el espacio. El estudio en este sentido se limitó a los registros correspondientes al periodo 1993-1999, es decir, a los datos suminis-

trados por la RSNC, sin incluir los procedentes de otras redes locales o internacionales. Esta decisión se tomó debido a que los datos suministrados por una sola fuente se caracterizan por ser homogéneos y, como se acaba de mostrar, los datos de la RSNC son altamente fiables.

En la Figura 2 se muestran las variaciones de los valores de M_{\min} en superficie. Se observa una tendencia al aumento de M_{\min} a medida que se produce un alejamiento del centro del país debido, principalmente, a la disminución de la densidad de estaciones, por lo cual las regiones periféricas no pueden competir con el centro del país en lo referente a la calidad de los registros obtenidos. El fenómeno del aumento de la magnitud representativa en la periferia se ha observado en otros ejemplos de estimación de M_{\min} , como por ejemplo en catálogos de Grecia, Kamchatka y Cáucaso, entre otros [Smirnov, 1997]. Es posible que con el tiempo esta situación cambie y regiones sísmoactivas de Colombia tales como Urabá, Chocó y Nariño, entre otras, ubicadas en la periferia, contarán con redes más densas de estaciones sísmológicas lo que permitirá llevar a cabo un estudio más detallado de los procesos sísmicos que allí ocurren. En la actualidad, de los cuatro nidos sísmoactivos de Colombia, a saber, Bucaramanga, Caldas, Urabá y Nariño, cuentan con un mejor servicio de atención sísmológica los de Bucaramanga y Caldas, lo cual se evidencia con los datos de la Figura 2. En esta figura se aprecia que para los dos nidos mencionados el valor de la magnitud representativa oscila en torno a $M_{\min} \approx 2$ y aumenta a medida que se produce un alejamiento del centro del país alcanzando valores de $M_{\min} \approx 2,8$ en la costa del Pacífico, particularmente en Chocó y Nariño.

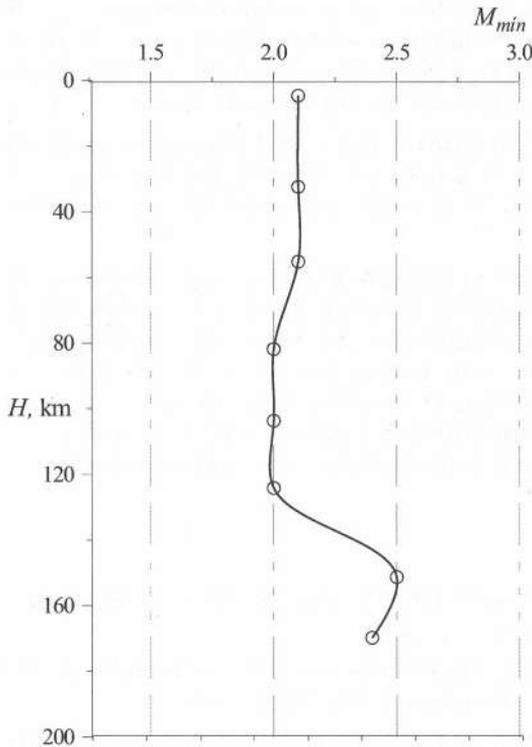
Figura 2. Colombia. Variación de la magnitud representativa con la superficie



Fuente: el autor.

En la Figura 3 se muestra la variación de M_{\min} con la profundidad. El hecho de que M_{\min} permanezca prácticamente constante ($M_{\min} \approx 2,1$) con el aumento de la profundidad z hasta profundidades del orden de $H \sim 120$ km, indica que el servicio prestado por la RSNC en aquellas regiones del país donde se presentan sismos con hipocentros ubicados a profundidades intermedias (para Colombia $H \sim 100$ km) es bueno. El incremento del valor de la magnitud representativa hasta $M_{\min} \approx 2,5$ para profundidades $H > 130$ km no es impedimento para un estudio adecuado de la sismicidad a estas profundidades, pues este valor de M_{\min} se considera bueno para una descripción confiable del régimen sísmico de la región en estudio.

Figura 3. Colombia. Variación de la magnitud representativa con la profundidad



Fuente: el autor.

5. CONCLUSIONES

La historia de la sismología instrumental en Colombia se puede dividir en dos periodos, tomando como base la representatividad de los datos del catálogo de sismos en Colombia. Estos periodos están determinados por la entrada en funcionamiento de la RSNC. Hasta 1993 se observa un valor medio de la magnitud representativa de $M_{\min} \approx 4$ y después de 1993 un valor medio de $M_{\min} \approx 2,1$. Esta variación brusca de

la magnitud representativa está relacionada con un mejoramiento sustancial de la infraestructura sismológica del país. Por lo tanto, al trabajar con el catálogo de sismos de Colombia se debe tener en cuenta que la información correspondiente al periodo anterior a 1993 es representativa únicamente para registros con magnitud $m_b \geq 4$, y para valores menores la información acerca de la magnitud no es fiable. Los registros posteriores a 1993 son mucho más precisos en cuanto a la magnitud se refiere, siendo fiables aquellos con $m_b \geq 2$.

En lo referente a la distribución de los valores de la magnitud representativa en el espacio, observamos que para las regiones centrales del país, incluyendo los nidos sismoactivos de Bucaramanga y Caldas, se obtiene una magnitud representativa $M_{\min} \approx 2$. Este valor aumenta a medida que el análisis se aleja del centro del país hacia la periferia, lo cual está relacionado con las características de la densidad de distribución de las estaciones sismológicas en el territorio colombiano. En la periferia la densidad de estaciones es menor que en el centro, por lo que el servicio de atención sismológica es menos eficiente.

El valor de la magnitud representativa prácticamente no varía con la profundidad, y se mantiene cercano al valor $M_{\min} \approx 2,1$ hasta profundidades del orden de $H \sim 120$ km garantizando registros fiables hasta esos límites.

En lo que respecta al periodo anterior a 1958, no obstante el hecho de contar con registros instrumentales, se considera poco procedente llevar a cabo la estimación del valor de la magnitud representativa M_{\min} puesto que, aun teniendo en cuenta los registros históricos de sismos en Colombia, el número total de éstos no es suficiente para realizar un tratamiento estadístico confiable de datos. Es por ello que este periodo no se consideró en el presente estudio.

REFERENCIAS

- Aki, K. y Richards, P. (1980), *Quantitative Seismology*, San Francisco, Freeman.
- Caneva, A. (2000), *Fraktalnye svoistva seismichonosti Kolumbii*. Kad. Dis. M.: Fizich. F.t MGU (en ruso).
- Espinosa, A. (1993), Actualización del catálogo colombiano de sismicidad histórica. Informe interno, Cali, Ingeominas.
- Hudson, D. (1964), *Lectures on Elementary Statistics and Probability*, Ginebra.
- Ingeominas (1995), Red sismológica nacional de Colombia. Actualización y análisis del catálogo de sismos de Colombia, Bogotá.
- Ingeominas (1999), Red Sismológica Nacional de Colombia. Catálogo. En: <http://www.ingemin.gov.co>. Bogotá.
- Molchan, G. M. (1991), Dmitrieva O. E. Identifikatsiya aftershokov: obzor i novye podkhody // *Vychislitel'naya seismologiya*. Vyp. 24 (en ruso).

- Pisarenko, V. F. (1789), O zakone povtoriaemosti zamletriasenii // Diskretnye svoistva povtoriaemosti zamletriasenii geofizicheskoi sredy (pod red. Sadovskogo M. A.). M. Nauka (en ruso).
- Ramírez, J. E. (1975), *Historia de los terremotos en Colombia*, Bogotá, Argá.
- Ramírez, J. E. y Goberna, J. R. (1980), Terremotos colombianos. Noviembre 23 y diciembre 12 de 1979. Informe preliminar, Bogotá.
- Smirnov V. B. (1997), Opyt otsenki predstavitelnosti dannyykh katalogov zamletriasenii// Vulkanologia i seismologia. No. 4 (en ruso).