

# ESTIMACIÓN DE $M_{max}$ EN EL TERRITORIO COLOMBIANO MEDIANTE DATOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS

*Elkin Salcedo Hurtado<sup>1</sup>, Carlos Coral Gómez<sup>2</sup>*

## 1. Introducción

La estimación de las magnitudes máximas posibles ( $M_{max}$ ) de los terremotos es uno de los principales problemas que se presentan en la evaluación de la amenaza sísmica. La exactitud con que se logre estimar el valor de las magnitudes máximas depende de la calidad y cantidad de los datos geológicos, geofísicos y geodésicos que se utilicen

A pesar de los excelentes resultados obtenidos en los últimos años en el campo de la evaluación de la amenaza y riesgo sísmico en Colombia, los mapas que se han propuesto a la comunidad científica e ingenieril han sido basados en una metodología puramente estadística que no considera suficientemente el marco tectónico de la región y los procesos físicos de acumulación y liberación de energía sísmica. Tampoco tienen en cuenta las características específicas de las propiedades físicas de la corteza y el manto superior donde ocurren los terremotos (Coral - Gómez, 1990)

El mapa de riesgo sísmico publicado por Ramírez y Estrada en 1977 es una representación gráfica de la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de una intensidad dada en un lugar del territorio de Colombia en un intervalo de 100 años. Estos autores consideran las características geológicas del territorio colombiano introduciendo un valor teórico de la atenuación de las ondas sísmicas (Ramírez y Estrada, 1977). El mapa de riesgo sísmico más reciente desarrollado por Espinosa y coautores (1985) indica la aceleración máxima, la velocidad pico efectiva y la zonificación sísmica del territorio colombiano. En la evaluación de la amenaza sísmica los mencionados autores consideran las magnitudes máximas asociadas a eventos históricos, las magnitudes máximas registradas, la posibilidad de rupturas simultáneas en diferentes áreas sísmogénicas y la atenuación de los desplazamientos en la tierra como una función de la distancia. Las áreas sísmogénicas fueron modeladas usando el modelo de línea fuente desarrollado por Der Kiureghian and Ang en 1975 (Sarria,

---

<sup>1</sup> INGEOMINAS - Área de Geofísica, Santafé de Bogotá - Colombia

<sup>2</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - A.A. 14490, Santafé de Bogotá - Colombia

1989). Aunque estos autores disponían de una mayor cantidad de información geológica manifiestan su inconformidad con el conocimiento deficiente que se tiene de las zonas sismotectónicas del país.

En el presente trabajo presentamos una metodología para obtener mapas de magnitudes máximas probables  $M_{max}$  utilizando directamente todos los datos geológicos y geofísicos que estén a disposición en la región dada. Esta metodología se aplicó para el caso del territorio colombiano, obteniéndose finalmente un mapa de magnitudes máximas para Colombia.

## 2. Metodología

La metodología usada crea un modelo en el cual se supone que en cada punto de la región el valor  $M_{max}$  representa la función del vector  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  descrito por la condición geólogo - geofísica y sismológica del punto. Los elementos de esta descripción se llevan hacia un punto del mapa, estos deben caracterizar con igual detalle la intensidad del proceso tectónico para cada región, las propiedades de resistencia del medio en los alrededores del punto y el tamaño máximo de las heterogeneidades (bloques) a las cuales pertenece el punto dado.

Lo anterior significa que, en base al conocimiento de las condiciones geofísicas y geológicas en puntos en los que ha habido fuertes sismos, se puede intentar definir, mediante una simple analogía y extrapolación, las zonas de características geológicas idénticas o similares en las que puedan producirse sismos fuertes en el futuro, y estimar los límites y la magnitud umbral de estas zonas potenciales. Otro problema es el de sacar conclusiones con respecto a los períodos medios de retorno de sacudidas fuertes en esas zonas, por lo general la predicción se basa en observaciones de una zona geológicamente similar.

Al definir regiones fuentes de sismos, se hace uso de toda información disponible sobre las relaciones que existen entre los sismos y otros fenómenos geológicos y geofísicos, por ejemplo, los movimientos horizontales y verticales de gran extensión señalan las regiones de movilidad y que están en actividad tectónica, donde la probabilidad de ocurrencia de sismos es mayor que en las áreas estables. La estabilidad y variabilidad de la dirección de movimiento es también importante. Los límites de los bloques corticales que están sufriendo desplazamientos contrastados, son zonas potenciales de acumulación de esfuerzos

tectónicos, la cartografía de las fallas y áreas de recientes levantamientos es igualmente necesaria.

La sismología puede proporcionar algunos datos generalizados sobre el campo de esfuerzos, la orientación de los principales planos de focales, la orientación predominante del campo macrosísmico, la distribución espacial de los focos sísmicos que superan determinadas magnitudes, etc. Los levantamientos gravimétricos proporcionan datos sobre las anomalías isostáticas. Toda esta información tiene que ser correlacionada y analizada antes de que se pueda trazar un mapa de las regiones que puedan ser fuente de origen de terremotos

La metodología utilizada en este trabajo representa un proceso iterativo en la búsqueda de una función de pronóstico  $F(x,a)$ , donde  $a$  - vector de los parámetros calculados. En cada paso del proceso el especialista prepara la información, el computador por medio de una escogencia automática de datos calcula la dependencia de los valores de  $M_{max}$  del complejo de parámetros utilizados y crea el respectivo mapa de pronóstico. Después de esto, realizando un análisis e interpretación de los resultados, el especialista toma la resolución sobre la necesidad de realizar la próxima iteración. Esta metodología es muy utilizada en la Unión Soviética (hoy Rusia) y se encuentra publicada en muchas obras (ver por ejemplo Bune y otros, 1980, 1986)

El método se basa en la clasificación de fenómenos geofísicos y geológicos que se sabe están relacionados con la ocurrencia de los sismos y da una estimación del umbral máximo de magnitud para una unidad de área. La fórmula básica es

$$M_{max} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_i)$$

donde las  $x_i$  designan los parámetros geológicos y geofísicos individuales (características) y  $\varphi_i$  es función de un parámetro que aumenta de manera monótona. Las funciones  $\varphi_i(x_i)$  reflejan la influencia de fenómenos particulares sobre el valor de  $M_{max}$ . La suma de todas las contribuciones da el valor previsto de  $M_{max}$ .

El análisis e interpretación de la información geológica y geofísica es realizado con la ayuda del programa de computador denominado GEO, creado y desarrollado por especialistas del Instituto de Problemas de Transmisión de la Información, del Instituto de Física de La Tierra

(FIZIKA ZEMLI) de la Academia de Ciencias de Rusia y del Instituto "NEFTEGEOFIZIKA" del Ministerio de Geología de Rusia (Gitis, et al, 1981)

### 3. Mapa de $M_{max}$ del Territorio Colombiano

Para la evaluación del mapa de  $M_{max}$  del territorio de Colombia, fueron utilizados los siguientes materiales geológicos y geofísicos:

1. Catalogo de terremotos de Colombia desde 1956 hasta 1979 (ISA - ITEC),
2. Mapa gravimétrico de anomalías de Bouguer de Colombia (INGEOMINAS, 1985) y Mapa gravimétrico de Norte América, Panamá, Bogotá y Lima, bajo la redacción de Sazhina (1971),
3. Mapa de relieve de la superficie terrestre del territorio colombiano (IGAC, 1980),
4. Mapa de estructuras neotectónicas de Colombia (V.I.Makarov),
5. Mapa de fallas activas de Colombia (V.I Makarov),
6. Mapa geológico de Colombia (INGEOMINAS, 1988)

Con estos campos se obtuvieron doce parámetros que reflejan las particularidades de la estructura geológica del medio y las propiedades fisico-mecánicas de la corteza terrestre y del manto superior, donde se distribuyen los focos de los terremotos

Los parámetros geológicos y geofísicos utilizados para el pronóstico de  $M_{max}$  fueron tomados de los materiales anotados anteriormente y se reelaboraron a escala 1:2'500.000, presentándose para todos los nudos de la red de coordenadas de 10' \* 10'. Estos parámetros se codificaron de la siguiente manera.

1. Parámetro  $x_1$  - Tipo de corteza terrestre, fue codificado teniendo en cuenta su división en continental, oceánica y de transición y, en subtipos de acuerdo al tiempo de formación de su estructura por una parte y al grado de actividad de sus deformaciones recientes, por otra
2. Parámetro  $x_2 - x_4$  - Fallas tectónicas, clasificadas según su morfología y cinemática:  $x_2$  - fallas inversas,  $x_3$  - fallas normales,  $x_4$  - fallas transcurrentes
3. Parámetro  $x_5$  - Módulo del gradiente del campo de las anomalías de Bouguer  $\Delta g$ , el cual se calculó a partir de los valores medios de  $\Delta g$
4. Parámetro  $x_6$  - Anomalía de la gravedad en la reducción de Bouguer  $\Delta g$ , estos valores se tomaron de los mapas gravimétricos anotados arriba

5. Parámetro  $x_7$  - Valores de la altura de la superficie terrestre  $h_i$ , tomados del mapa de relieve con intervalos de curvas de nivel de 0.5 kilómetros. Estos conllevan la información generalizada sobre las deformaciones de la parte superficial de la corteza terrestre.

6. Parámetro  $x_8$  - Módulo del gradiente del relieve de la superficie terrestre  $\text{grad}h_i$ , calculado con los valores medios del relieve dentro de un radio de 0.5 kilómetros. Este parámetro refleja los elementos regionales de las cavidades y levantamientos en la superficie terrestre.

7. Parámetro  $x_9$  - Intensidad de las deformaciones recientes, tomada del mapa de estructuras neotectónicas.

8. Parámetro  $x_{10}$  - Condiciones geodinámicas del desarrollo de las deformaciones recientes de la corteza terrestre.

9. Parámetro  $x_{11}$  - Espesor de la capa de rocas sedimentarias del Cenozoico Superior ( $h_{kz}$ )

10. Parámetro  $x_{12}$  - Manifestaciones del magmatismo orogénico.

Anotamos, que el conjunto de parámetros anotados no es suficiente para describir completamente la variabilidad del medio útil para la solución del problema de riesgo sísmico a largo plazo. Faltan por ejemplo, datos sobre la anomalía de campo magnético, el relieve de la superficie de Mohorovicic, las anomalías profundas de la fuerza de gravedad, las velocidades medias de las ondas sísmicas en la corteza terrestre y el manto superior, las temperaturas en la profundidad y otros datos geológicos y geofísicos. La importancia del empleo del programa GEO en la resolución del problema del riesgo sísmico a largo plazo en zonas como Colombia, consiste en que con la presencia de nuevos parámetros que describan el medio geológico-geofísico, estos pueden agregarse para mejorar los resultados precedentes.

Para el control de la función de pronóstico se realizó una elección de 92 puntos con los valores  $M_{max}$  en el intervalo de magnitudes de 5.0 hasta 8.0. La elección de los puntos se hizo por medio de un procedimiento que contiene varios pasos (Bune y otros, 1986). Así, fueron obtenidas y analizadas varias soluciones del pronóstico realizado. La variante más adecuada resultó la que en la primera etapa elige el parámetro  $x_7$  de los tipos de corteza terrestre, presentando las regiones y zonas del territorio colombiano de acuerdo al orden de disminución de la actividad sísmica. Esta variante explica el pronóstico de  $M_{max}$  en la región por la interacción de los elementos geodinámicos, la intensidad de acumulación de las tensiones y las deformaciones recientes.

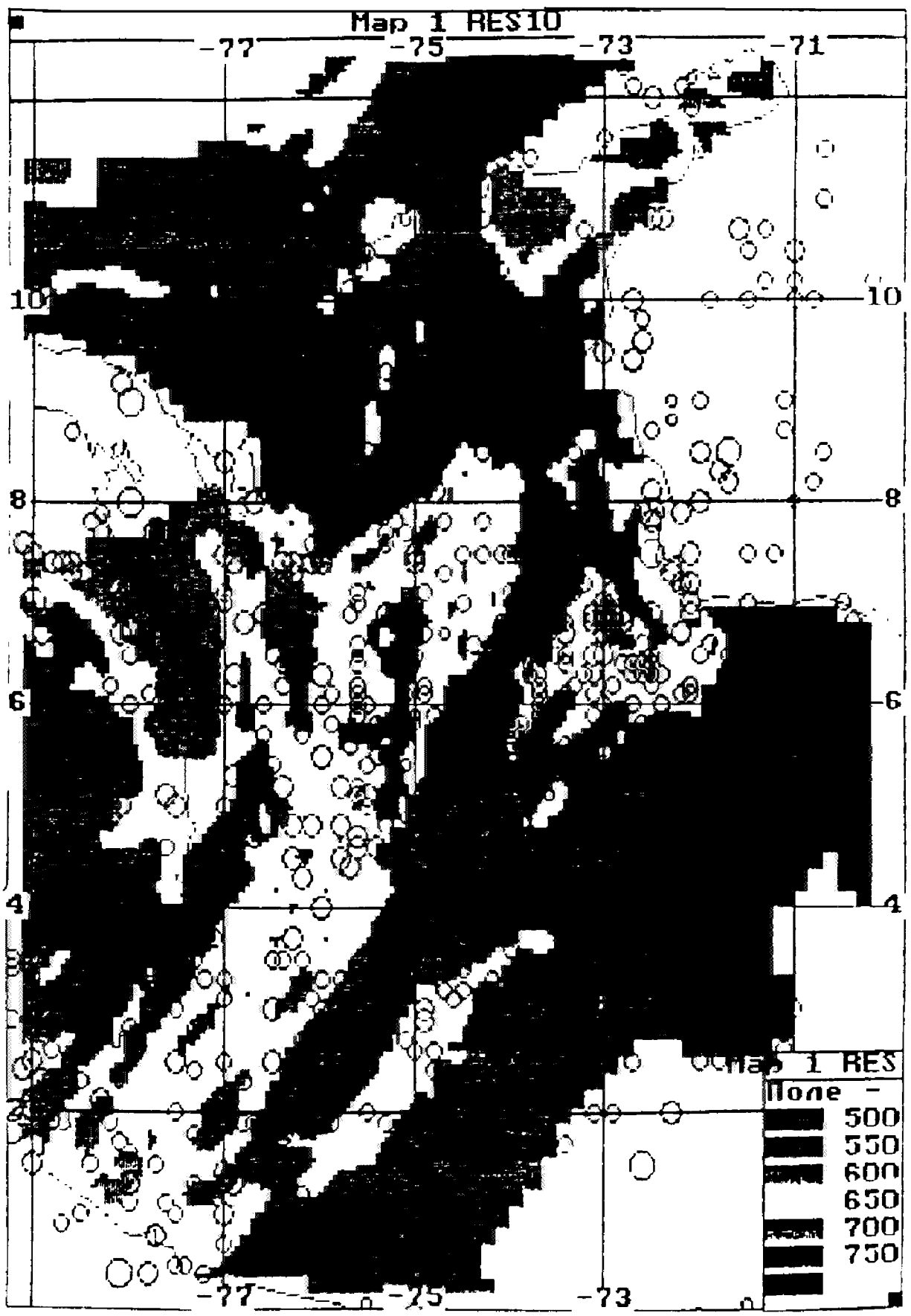


Figura 1. Mapa de Pronóstico de Mmáx. del territorio de Colombia

En segundo lugar la solución escoge el parámetro  $x_2$  que especifica el tipo de desplazamiento en las fallas de mayor aporte en el peligro sísmico en Colombia, luego fueron escogidos la anomalía del campo gravimétrico (anomalía de Bouguer), el gradiente de este campo y el relieve de la superficie terrestre. Con la adición de los parámetros restantes la solución escogida poco mejoró, es significa, que en las actuales condiciones de conocimiento del medio de todo el territorio colombiano esos parámetros no aportan cambios considerables en la solución del problema del pronóstico a largo plazo en la región. De esta manera, la función de pronóstico tiene la siguiente forma:

$$F(x, a) = c + \varphi_1(x_1) + \varphi_2(x_2) + \varphi_3(x_3) + \varphi_4(x_4) + \varphi_5(x_5) + \varphi_6(x_6) + \varphi_7(x_7)$$

En la fig.1 se presenta el mapa obtenido como una solución al problema del riesgo sísmico en Colombia (Salcedo, 1992). Este mapa muestra que los posibles terremotos más fuertes con  $M_{max} \geq 7.5$  se esperan en la región del Chocó, en el litoral del Océano Pacífico. Esta región está enlazada genéticamente con la zona de subducción. Los valores de  $M_{max} \geq 7.0$  se esperan un poco más al Este de la zona anterior sobre la Cordillera Occidental, en la región de Nariño y en el Norte de la Sierra Nevada de Santa Marta. Esta última se aprecia como una zona de pronóstico. El valor  $M_{max} \geq 6.0$  se toma como el nivel de fondo de sismicidad fuerte a largo plazo en todo el territorio de Colombia.

#### 4. Conclusión

La integración de datos geológicos y geofísicos aplicada a la evaluación de las magnitudes máximas probables de un evento sísmico en el territorio colombiano nos permite encontrar un nuevo marco conceptual al problema del riesgo sísmico en Colombia. Las magnitudes máximas en el territorio colombiano encontradas mediante este nuevo método indican que existe una gran amenaza de un sismo fuerte con  $M_{max} \geq 7.5$  en la región del Chocó en el litoral Pacífico. En la Cordillera Occidental, en la región de Nariño y en el Norte de la Sierra Nevada de Santa Marta se esperan eventos con magnitudes máximas probables mayores o iguales a 7.0. En el resto del territorio colombiano se pueden esperar eventos con magnitudes máximas mayores o iguales a 6.0.

## REFERENCIAS

- Bune V. I., Gitis. V. G., Kalenin V. N. y Shchukin Yu. K. (1986) Aplicación de la metodología de aproximación de valores para la elaboración de mapas de *M<sub>max</sub>* de los terremotos del Caucazo. En: Investigaciones Sismológicas No.9. p.49 - 77.( En Ruso).
- Bune V. I., Gitis. V. G , Shchukin Yu. K. (1980). División de zonas de mayor probabilidad de ocurrencia de terremotos mediante la integración de parámetros geologo-geofisicos En Zonificación Sísmica del Territorio de la URSS. Moscú. Nauka. 307p. (En Ruso).
- Coral-Gómez C. (1990). La convergencia de placas en el Noroccidente Suramericano y el origen del Nido de Bucaramanga. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Bogotá. Vol. XVII, No.66. p 521-529.
- Espinosa A., Sarria A., García L. (1985). Riesgo Sísmico en Colombia. Mem VI Congr. Latinoamericano de Geología, Bogotá. T.2, p. 206-243.
- Gitis V. G., Mironov M. A., Bune V. I. et. al. (1981). *M<sub>max</sub>* earthquake prediction map development: Method, software, results.-In Proceeding of the Second international symposium on the analysis of seismicity and on seismic hazard diblice Castle Czechoslovakia (Praha, 1981), Geophys inst. Czechosl. Acad of Sciences, vol 1, p 436-466.
- Ramírez J. E. y Estrada Uribe G (1977). Mapa de riesgo sísmico Inst Geofísico, Univ Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Salcedo E.(1992). Sísmicidad y Peligro sísmico de Colombia PhD Tesis. Memoria Edit.Univ. Lomonosov. Moscú. 268p.
- Sarria A (1989). Riesgo Sísmico e Ingeniería Sísmo resistente V Congr. colombiano de Geología. Bogotá.,35p.



**LUIS DIEGO MORALES MATAMOROS**  
**Comisión Nacional de Emergencia, San José, Costa Rica.**

El objetivo es producir mapas de zonificación de la amenaza sísmica secundaria, que pueden servir a los planificadores del uso del suelo, y de retroalimentación al código sísmico y al código de cimentaciones.

A la fecha están listos y digitalizados en el sistema de Información Geográfica (Microstation - Intergraph), los mapas de zonificación (1:200.000), de:

- A.- Geológico simplificado en función del tipo de roca o suelo.
- B.- Amplificación del movimiento del suelo (perfiles de suelos relaciones de atenuación).
- C.- Fuentes sísmicas locales (fallamiento geológico neotectónico)
- D.- Deslizamiento o susceptibilidad.
- E.- Licuefacción.
- F.- Tsunamis o maremotos.

La próxima etapa consiste en editar y divulgar el trabajo realizado, posteriormente se realizará un trabajo de detalle (1:50.000) para la parte central de Costa Rica, donde se concentra la mayoría de la población y su infraestructura.