

ESTIMACIÓN GLOBAL DE LA MACROSISMISIDAD EN LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

LUIS HERNÁN SÁNCHEZ ARREDONDO

*Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia
Centro Nacional de Geoestadística (CNG), lhsanche@unal.edu.co*

ORLANDO GIRADO BOLIVAR

*Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia
Grupo de Estabilidad de estructuras, ogiraldo@unal.edu.co*

GUILLERMO LEÓN URANGO SANTOS

Estudiante Ingeniería geológica, Universidad Nacional De Colombia

RESUMEN: El objetivo de esta investigación fue estimar la amenaza macrosísmica de cada uno de los municipios del Departamento de Antioquia, República de Colombia. Como técnica de estimación fueron implementadas las técnicas geoestadísticas con base en la actividad microsísmica reportada por la Red sismológica Nacional de Colombia. Los resultados obtenidos indican que existen por lo menos siete municipios en peligro eminente, teniendo en cuenta que las fallas geológicas en grado de actividad probada, podrían generar macrosismos de magnitudes locales en la escala de Richter superiores a 7. Entre los principales municipios considerados en un nivel de “Amenaza Alta” con esta metodología, se encuentran Ituango, Dabeiba, Uramita y Urrao. Las principales causas asignadas al peligro sísmico en la región, pueden ser debidas al conjunto de fallas activas genéticamente relacionadas con la sutura Dabeiba-Pueblorico. El Valle Aburrá, con una población estimada en más de 4 millones de habitantes, es considerada en este trabajo en “Alerta Roja”, debida principalmente a eventos macrosísmicos que se generarían en epicentros localizados en el municipio de Urrao.

PALABRAS CLAVES: Geoestadística, Amenaza Sísmica de Antioquia, Fallas Geológica Activas

ABSTRACT: The aim of this research was to evaluate the macro seismic hazard of each one of the municipalities of Antioquia, Colombia. As an evaluation technique geostatistic methods were implemented, based on the microseismic activity reported by the National Seismological Network of Colombia (RSNC). The results indicated that at least seven (7) municipalities are in imminent danger, taking into account that the geological faults with tested activity levels could generate local macroquakes with magnitudes above 7 in the Richter scale. Among the main municipalities considered to have “High Level Hazard” with this methodology are Ituango, Dabeiba, Uramita and Urrao. The main causes of the seismic danger could be generated by the seismically active faults related to the Dabeiba-Pueblorico suture. The Aburrá Valley, with an estimated population of over 4 million people, is considered in this paper on “Red Alert”, mainly due to macroseismic events that would be generated by epicenters located in the town of Urrao.

KEYWORDS: Geostatistics, Seismic hazard Antioquia, active faults.

1. INTRODUCCIÓN

El departamento de Antioquia es susceptible a amenaza sísmica, y unas de las causas de esta amenaza son sus distancias relativamente cortas a las sismofuentes ubicadas en el noroccidente de este departamento. Para no ir muy lejos en el tiempo, se anotan los sismos ocurridos en Murindó el 17 y 18 de Octubre de 1992; de magnitudes $M_w = 6,6$ y $M_w = 7,1$ respectivamente. Estos eventos representaron cuantiosos daños en Antioquia. Según Madrid (1994) fueron 32 los municipios afectados hacia el occidente del departamento, de los cuales 17 exhibieron alto grado de deterioro en sus construcciones: 3500 viviendas, 840 Km de vías, establecimientos comunitarios y servicios públicos (141 centros educativos, 56 locales comerciales, 15 inspecciones de policía, 14 casetas comunales, 7 centros de salud y 8 vidas humanas); a estas pérdidas se asociaron unos costos de 14 mil millones de pesos, aproximadamente. También originó daños ecológicos como licuefacción de suelos en los alrededores de Murindó, deslizamiento y palizadas canalizados al río de esta localidad (“río de palos”), además causó la reactivación del volcán Cacahual en el corregimiento del mismo nombre del municipio de San Pedro de Urabá. La viviendas ubicadas cercanas a este fueron sepultadas por el lodo y otras incineradas por los gases exhalados por el mismo que ardieron con el fuego, generalmente al aire libre, de las viviendas campesinas. La cifra de muertos asociados a este hecho fueron entre 2 y 14 (Hermelín, 2005). Por su parte, en la ciudad de Medellín, se estima en US \$ 11 millones las pérdidas aseguradas (Polanco, 2002; citado por Hermelín, 2005). Según Lalinde y otros (2007), basados en la escala INQUA, lo clasifican como un sismo de intensidad IX o mayor; esta escala clasifica a este tipo de eventos en función a los daños y pérdidas ecológicas que generen.

Otro evento importante es el terremoto de Turbo en (1882), de magnitud 7.8 M_s , el cual provocó que dicha población fuera inundada por una fuente termal. También fue sentido en Cartagena y en Riosucio (Chocó), en este último se reportó la formación de un cráter del que salía arena. Por su parte en Ciudad de Panamá, se reportó el agrietamiento de los muros de muchas viviendas y el colapso de otros, también generó un tsunami que perturbó principalmente el Archipiélago de San Blas, donde varias olas de más de 3 metros de altura, provocaron cuantiosos daños en la mayoría de las islas y originaron la muerte de 65 personas. Aparte del tsunami, hubo agrietamientos del terreno con anchura hasta de 10 m y, licuación de suelos en Miguel de la Borda. Desde el año 1993 se han iniciado los registros instrumentales de la Red Sismológica Nacional de Colombia, hoy se cuenta con alrededor de 26 estaciones sismológicas en el territorio colombiano, los cuales hasta el 2009 reportan más de 10.000 registros de microsismos superficiales, de profundidad menor ó igual a 30 Km, según la nomenclatura de INGEOMINAS. Estos registros se distribuyen preferencialmente hacia las tres cordilleras y el occidente colombiano. En Antioquia estos microsismos representan el 79% de la actividad sísmica total del departamento según los datos reportados por la RSNC entre 1993 y Junio de 2009 (Figura 1).

Farbiartz y Estrada (2001), presentan un estudio que relaciona la actividad sísmica colombiana antes y después de la instalación de la RSNC; indicando que la actividad registrada por esta red muestra una importante actividad superficial, la cual está asociada principalmente con fallas geológicas activas.

La base de esta investigación fueron los datos de magnitud local de Richter reportados por la RSNC, que como ya se mencionó arriba, se tomó como fecha de corte el mes de junio de 2009. Esencialmente se regionalizó la variable “Magnitud Local M_L ”, aprovechado las técnicas

geoestadísticas del Kriging Poligonal, la cual permitió estimar globalmente en cada uno de los municipios antioqueños la geoamenaza por terremoto. De los parámetros reportados en estos datos, se analizará, bajo las técnicas de la geoestadística, la magnitud local (M_L) de la actividad macrosísmica superficial (AMS).

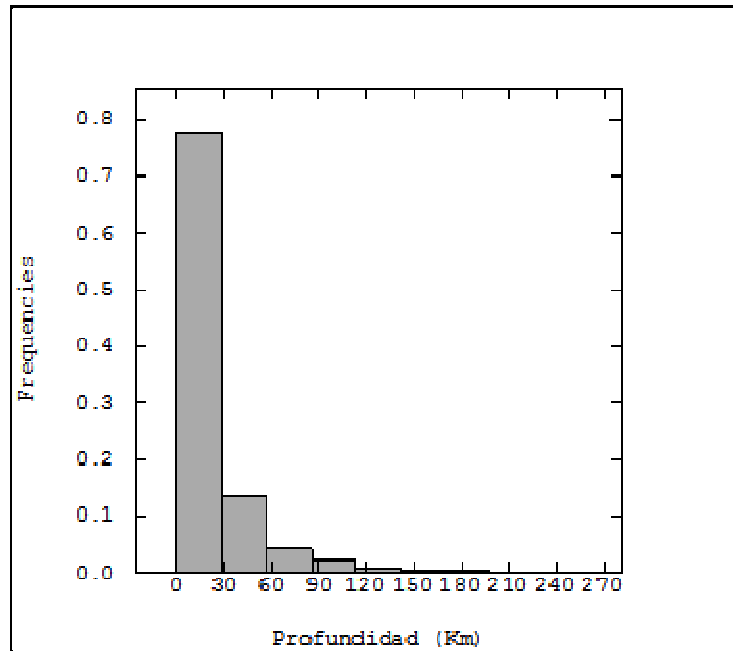


Figura 1. Histograma de frecuencia de la actividad microsísmica total en Antioquia. La actividad microsísmica superficial (Profundidad ≤ 30 Km) representa el 79% de la sismicidad total del departamento

Figure 1. Total active microseismic's Frequency histogram from Antioquia. Superficial microseismic (Depth ≤ 30 Km) represent 79% Department's total seismicity

2. MARCO TECTÓNICO

El noroccidente del territorio colombiano, es un complejo contexto tectónico donde convergen los esfuerzos producidos por la interacción entre las placas Suramericana, Nazca y Caribe, lo anterior configura a las sismofuentes de Murindó y el Viejo Caldas como unos potenciales escenarios de amenaza sísmica para el departamento de Antioquia (Farbiartz y Estrada, 2001), de esta última se reportan eventos importantes como el ocurrido el 25 de enero de 1999, conocido como terremoto del Quindío (Farbiartz y Estrada, 2001).

La configuración tectónica del noroccidente colombiano comprende básicamente de: La placa Suramérica con un movimiento relativo se desplaza hacia el oeste a una velocidad de 10 a 20 mm/año (Sarria, 1990. Citado por Morales, J. 2003), mientras que la placa Nazca a una velocidad de 60 mm/año, subduce debajo de Suramérica (Sarria, 1990. Citado en Estudio de la amenaza sísmica de Medellín, 1994). Por su parte, la placa Caribe se desplaza en general al Sureste, y la microplaca de Panamá se mueve paralelamente a la placa Caribe (Morales, J. 2003).

El departamento de Antioquia es atravesado por un conjunto de fallas geológicas, de gran importancia, que contribuyen a la formación del régimen geomorfológico escarpado y de altas pendientes, características de su territorio. Gran parte de la sismicidad en Antioquia está directamente relacionada con el grado de actividad de estas fallas, se cree, por ejemplo, que el terremoto de Murindó (18 de Octubre de 1992, magnitud 7.3 M_s) y muchos otros que han ocurrido desde 1883, en el occidente antioqueño, están asociados con la actividad a lo largo de la falla Murindó (Martínez y otros, 1993).

En la Figura 2 es posible ver como se anidan los sismos hacia algunas de las principales fallas geológicas que atraviesan el departamento; la falla Murindó y el sistema Cauca-Romeral hacia el occidente y, Palestina al este. Algunas de estas fallas son causante de deformaciones que demuestran las características de actividad neotectónica, esta actividad la corroboran estudios realizados a algunos depósitos cuaternarios; por ejemplo, la actividad Cuaternaria de la falla Espíritu Santo en el municipio de Cáceres, ha sido confirmada por Arias (1981), quien midió el desplazamiento vertical entre 6 a 10 metros de la terraza Barroblanco en la quebrada Puri; localizada al noreste del caserío “El Doce”. Sánchez y Giraldo (en preparación) consideran que esta falla alberga un potencial para generar un macrosismo superficial de magnitud local de Richter de 5.3; con aceleración en terreno blando del 17% de la gravedad.

Hacia el municipio de Urrao, la actividad cuaternaria de las fallas que afectan este territorio, es expuesta en el trabajo de grado de Acosta y Jaramillo (1993) titulado “Evaluación de Amenazas Geológicas en el Área Urbana y Alrededores del Municipio de Urrao, Antioquia”; en este estudio se reportan escarpes en terrazas, cañones o valles rectilíneos paralelos a la falla Urrao. También se hace referencia al desplazamiento de depósitos aluviales del cuaternario tardío causados por las fallas Urrao Este y Urrao Oeste. Con estudios geoestadísticos Sánchez y Giraldo (2011) consideran que “el fallamiento geológico activo” de las estructuras que atraviesan este municipio están en la categoría de “probado” y estiman que dentro de este territorio se podría generar un macrosismo superficial de magnitud local de Richter de 8.3, el cual estaría asociado a la “Sutura de Dabeiba-Pueblo Rico”. Un evento de esta magnitud expone a la región suroeste y centro del departamento a una importante amenaza externa por terremoto.

3. ESTIMACIÓN GEOESTADÍSTICA

Las muestras de la microsismicidad superficial en Antioquia han sido tomados de la base de datos de la Red Sismología Nacional de Colombia (libre acceso), en el periodo comprendido desde 1993 a Junio de 2009, en ella las variables comprenden: un ID (numeración del punto), Coordenadas X y Y, Profundidad y Magnitud Local (M_L), esta última es la variable modelada.

Para que la distribución de M_L se aproxime a una distribución gaussiana, la Kurtosis y el coeficiente de sesgo deberían aproximarse a 3 y 0, respectivamente; ellos toman valores de: Kurtosis = 4.2 y Coeficiente de sesgo=0.68; aunque estos valores no cumplan y de acuerdo con el histograma de frecuencia de M_L (Figura 3) podemos considerar la distribución de los datos como cuasi-gaussiana, esto lo reafirma la proximidad existente entre los valores de la media (Tabla 1), la moda y mediana (Q_{50} , Tabla 2), pues, estos son 2.67, 2.55 y 2.60 respectivamente. El

coeficiente de variación de 0.22 nos permite adoptar como campo de trabajo las técnicas geoestadísticas lineales.

3.1 Análisis Estructural

En pocas palabras podemos decir que el análisis estructural consiste en estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de una variable aleatoria y a la cual llamaremos variable regionalizada (Díaz Viera, M., 2002), en este caso la variable corresponde a M_L . En la Figura 4, el variograma experimental (punteado) muestra el comportamiento de la M_L de los microsismos en Antioquia y la influencia que tienen estos entre sí, este variograma se ajusta a un modelo teórico (amarillo) que describe de la forma más óptima la distribución espacial obtenida para la M_L . En este caso el modelo teórico corresponde a un modelo exponencial, con un rango de influencia de 4.7 Km y un "sill" ó meseta de 0.3. El rango de influencia determina la distancia hasta la cual existe dependencia espacial en los valores de M_L de los microsismos en el departamento. El "sill" o meseta es conocida como la varianza máxima del variograma o varianza real del fenómeno en estudio y teóricamente debe coincidir con la varianza *a priori* (0.34) de la M_L , en este caso es posible notar que la meseta representa el 88% de la varianza estadística o varianza "a priori" y como consecuencia la varianza estadística sobreestima la varianza real.

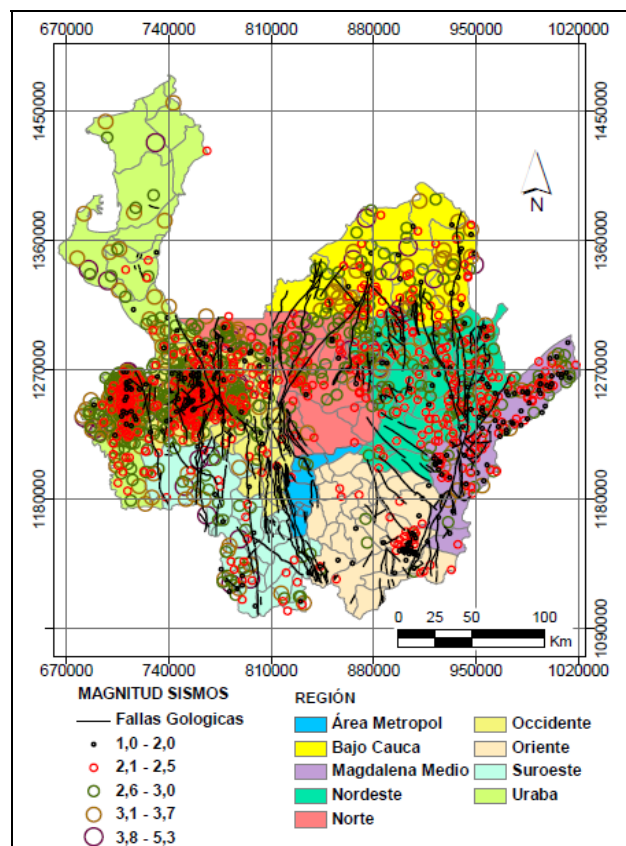


Figura 2. Relación entre la distribución de la AM en Antioquia y las Fallas geológicas
Figure 2. Relationship AM's distribution from Antioquia and Geological Faults

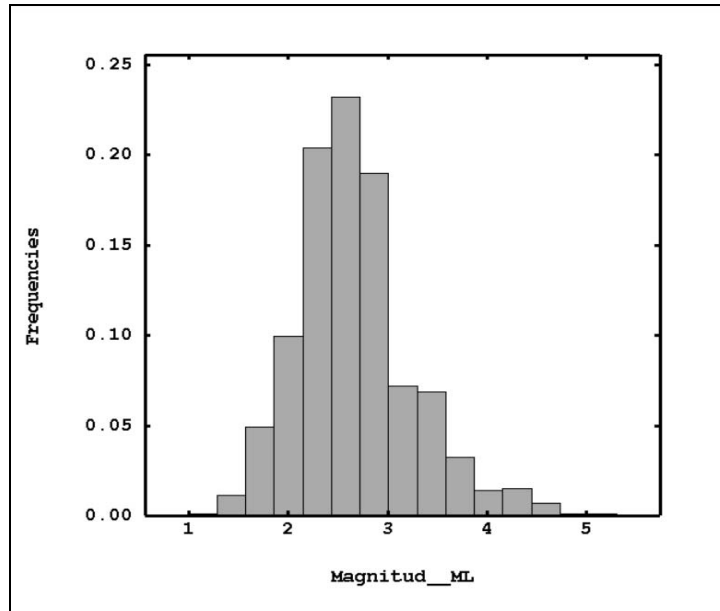


Figura 3. Histograma de frecuencia de la M_L de los microsismos de Antioquia
Figure 3. M_L 's Frequency histogram from Antioquia's microearthquake

Tabla 1. Estadísticas básicas de M_L

Table 1. M_L 's Basic statisticals

Variable	Recuento	Mínimo	Máximo	Media	Varianza	Std. Dev
M_L	1707	1	5.30	2.67	0.34	0.58

Tabla 2. Cuantiles de M_L

Table 2. M_L 's cuantils

VARIABLE	Q5	Q25	Q50	Q75	Q95	Q98
M_L	1.94	2.37	2.55	2.77	3.60	0.12

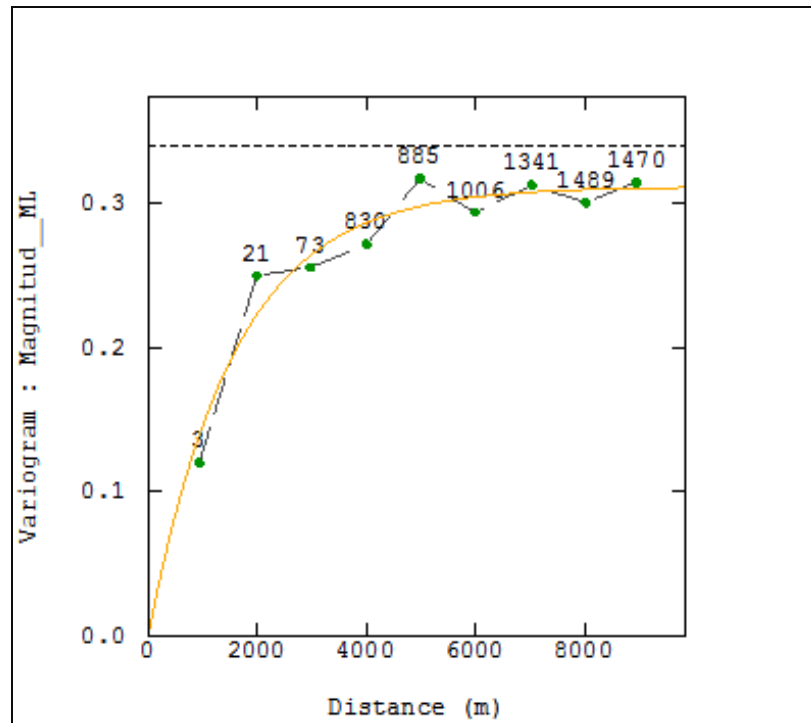


Figura 4. Variograma que representa la distribución espacial de la M_L de la microsismicidad superficial en Antioquia

Figure 4. Variogram which represent M_L 's spatial distribution of Antioquia's superficial microearthquake

La validez del modelo ha sido corroborada aplicando la técnica de validación cruzada, esta técnica consiste en esconder un elemento de la muestra y estimar el valor en ese epicentro usando la técnica geoestadística del Kriging Puntual (Notas de clase, Sánchez L., 2010.) con el modelo variográfico obtenido. Como resultado se obtiene la diferencia entre el valor real y el estimado. Al validar el modelo utilizado para 1725 datos, hubo un rechazo de 67 de ellos (representados como puntos rojos en la Figura 5), los cuales constituyen el 3.9% de 1725, del total de los datos. Solo este 3.9% está por fuera del escenario de variabilidad considerados para la M_L de la microsismicidad en Antioquia.

La varianza estandarizada del error es 0.05, cercana a cero. Este valor mide la incertidumbre que se da alrededor de la predicción. Además se tiene que el valor de la varianza del error estandarizado es 0.9, aproximadamente equivalente a uno (Tabla 3). Con base en lo anterior, se puede decir que el modelo seleccionado es el más apropiado para realizar las posteriores estimaciones, pues, proporciona las mínimas variaciones del error con respecto a otros modelos encontrados (Tabla 3) al momento de caracterizar la estructura espacial de la M_L .

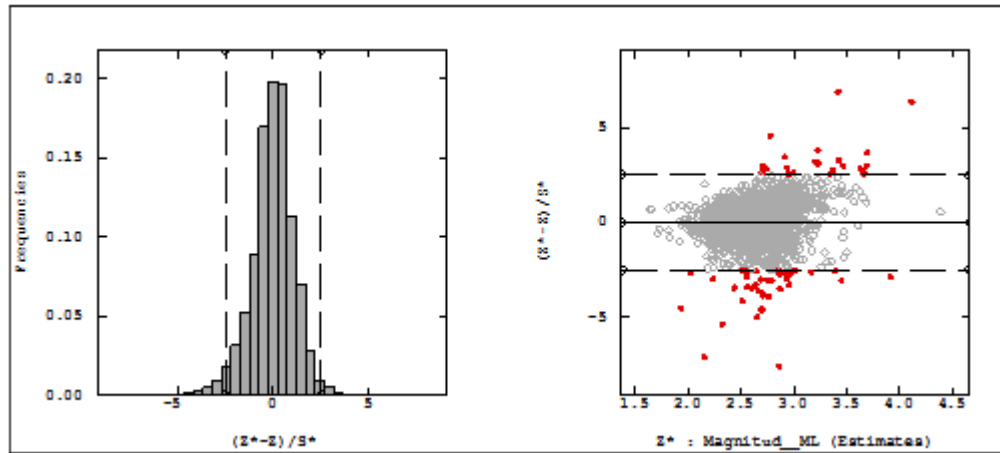


Figura 5. Validación Cruzada. Los puntos rojos representan los datos rechazados
Figure 5. Cross validation. Red points represent reject data

Tabla 3. Estadísticas basadas en los modelos obtenidos
Table 3. Statistic based on get models

Modelo Exponencial		
Estadística Basada sobre 1658 datos	Media	Varianza
Error	0.02	0.2
Error Estandarizado	0.05	0.9
Modelo Exponencial		
Estadística Basada sobre		
Error	0.032	0.2
Error Estandarizado	0.094	0.8
Modelo Gaussiano		
Estadística Basada sobre		
Error	0.064	0.52
Error Estandarizado	0.073	0.84

3.2 Estimación Global

Los datos de partida son los epicentros superficiales de la actividad sísmica de la RSNC, de modo que es necesario estimar la magnitud y varianza global (M_L) para cada uno de los municipios.

Esto fue posible mediante el uso de la técnica geostatística conocida como Kriging Poligonal (Sánchez y Giraldo, 2010), en el cual la cobertura de los municipios de Antioquia representan polígonos irregulares.

Kriging poligonal

El kriging Poligonal (KP) es la herramienta que se utiliza para caracterizar globalmente la M_L Máx para cada municipio del departamento de Antioquia.

El objetivo es estimar el valor medio de la variable \overline{ML} y su correspondiente varianza de estimación σ_{ML}^2 con un procedimiento similar al de kriging ordinario de bloques, para lo cual existe abundante literatura. El objetivo de la estimación es encontrar un conjunto de pesos λ_i , correspondientes a la superficie de intersección entre una celda V_i centrada en C_i y el polígono (cobertura del municipio), donde se deben imponer dos condiciones:

1. Que no ocurra un error sistemático, es decir, que el error promedio sea cero, o sea que $\sum \lambda_i = 1$ y

2. Que la varianza del error sea mínima (óptima)

$$\bar{M}_L = \sum \lambda_i R_i$$
$$\sigma_{ML}^2 = \text{Var} [ML^* - ML] \text{ Mínima}$$

M_L^* = Magnitud Local estimado

M_L = Magnitud Local Real

Para encontrar los valores de los λ_i , es necesario plantear un sistema de n+1 ecuación con n+1 incógnita, lo cual garantiza una solución única. Para resolver el problema es necesario usar una notación matricial, donde se introduce un multiplicador de LaGrange para garantizar la minimización de la varianza.

$$\begin{bmatrix} C_{\alpha\beta} & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_i \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\alpha 0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

0 = centro del polígono donde se estima M_L .

$C_{\alpha\beta}$ = Covarianza entre cada uno de los valores experimentales de M_L .

$C_{\alpha 0}$ = Covarianza entre los valores experimentales y el punto de estimación sobre el polígono.

λ_i = Pesos a ser estimados a ser calculados.

μ = Multiplicador de Lagrange.

El error de estimación (Varianza mínima) se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma_{ML}^2 = C_{00} \lambda_i C_{\alpha 0} - \mu$$

4. MACROSISMISIDAD MÁXIMA ESPERADA.

Antioquia es un departamento que con cerca del 14% de la población colombiana prepara la elaboración de proyectos de ingeniería de gran importancia (ej. como la hidroeléctrica Pescadero-Ituango), para estos además de los estudios geológico-geotécnicos es necesarios estimar el grado de amenaza sísmica al que se expondrían; de esta manera como se hace importante conocer los valores máximos que M_L pueda tomar para cada municipio del departamento. A la hora de calcular $ML_{Max Esperada}$ para cada municipio del departamento se han tenido en cuenta los valores del “Módulo Geoestadístico” (MG) y del error de estimación (σ_{ML}) asociados a cada uno de los municipios (Tabla 4). El módulo geoestadístico es definido como: el error relativo entre la desviación estándar del valor estimado y el microsismo globalmente estimado para cada uno de los municipios (σ_{ML}/ML_i^*) multiplicado por un factor de seguridad t-Student, este último se halla, según el número epicentros reales registrados por la RSNC y considerados para la estimación, teniendo en cuenta un nivel de confianza del 95%.

Tabla 4. Estimación de la $ML_{Max Esperada}$ en función del MG

Table 4. $ML_{Max Esperada}$ Estimation in MG function

(1) MÓDULO GEOESTADÍSTICO (MG)	(2) INTERVALO DE σ_{ML}	(3) $ML_{Max Esperada}$
$0 < MG \leq 0.2$	$\sigma_{ML} \leq 0.15$	$ML_i^* + 35x((\sigma_{ML}/ML) \times ML_i^*)$
$0 < MG \leq 0.2$	$\sigma_{ML} \geq 0.15$	$ML_i^* + 15x((\sigma_{ML}/ML) \times ML_i^*)$
$0.2 < MG \leq 0.3$	$0.2 < \sigma_{ML} \leq 0.25$	$ML_i^* + 10x((\sigma_{ML}/ML) \times ML_i^*)$
$0.2 < MG \leq 0.3$	$0.25 < \sigma_{ML} \leq 0.30$	$ML_i^* + 6x((\sigma_{ML}/ML) \times ML_i^*)$
$0.3 < MG$	$0.2 < \sigma_{ML} \leq 0.5$	$ML_i^* + 5x((\sigma_{ML}/ML) \times ML_i^*)$
$0.3 < MG$	$0.5 < \sigma_{ML}$	$ML_i^* + 2x((\sigma_{ML}/ML) \times ML_i^*)$

Definición de las anteriores variables

ML_i^* : La magnitud local estimada para el municipio **35, 15, 10, 6, 5 y 2** : Parámetro empírico (PE) que varía según el MG y asignado de acuerdo con el grado de actividad de las fallas geológicas en el departamento de Antioquia (Sánchez y Giraldo, 2011).

σ_{ML} : Error de estimación para el municipio.

\overline{ML} : Media de todos los valores estimados, en este estudio es 2,67.

Es de notar que la principal variable que determina el tamaño de $ML_{Max Esperada}$ es el valor que puede tomar el PE , el cual surge como la forma de “castigar” y/o asignar una mayor ó menor M_L a los sismos de los polígonos cuyo error de estimación y MG cumplan con las condiciones definidas en la

tabla 4. Este PE ha sido considerado según valores de ML de eventos sísmicos ya reportados, de tal forma que se proyectaran valores de $ML_{Max Esperada}$ acordes a la realidad.

En la Figura 7 se representan los valores que toma la $ML_{Max Esperada}$ en cada uno de los municipios de Antioquia, estos valores fueron hallados usando los criterios contenidos en la Tabla 4. Para la representación de dicho valores se optó por establecer unos intervalos, donde sus extremos corresponden a los cuantiles (5,25, 50, 75, 90,98), al máximo y el mínimo del total de los resultados, a estos se les asocia una escala de color que va desde el azul (valores de $ML_{Max Esperada}$ menores) hasta el rojo (valores de $ML_{Max Esperada}$ mayores). Es importante tener en cuenta el grado de amenaza sísmica interna, asociado a $ML_{Max Esperada}$, en el que se encuentran los municipios contenidos en la tabla 5.

Para los municipios de la tabla 5 se esperan sismos con M_L mayores a 7.0. Hay que tener en cuenta que la magnitud de la escala de Richter (M_L) o magnitud local no es científicamente la más recomendada. En esta investigación se ha considerado como variable de trabajo debido a que las estimaciones geoestadísticas globales no están localizadas dentro de un radio superior a los 600 Km, además de acuerdo con los reportes de INGEOMINAS, alrededor del 90% de los sismos superficiales están a distancias inferiores a 18 Km de profundidad.

Una de las escalas más conocidas para medir magnitud, es la escala de “Momento de Magnitud” o M_w ; pero la M_L se satura en esta escala para magnitudes superiores a 7.2. Otro aspecto importante de notar es que magnitudes M_L superiores a 8 son más bien característicos de zonas de subducción, por lo tanto las grandes magnitudes estimadas en esta investigación para los municipios de Dabeiba, Cañasgordas, Uramita, Urrao, Murindó e Ituango estén asociadas a la zona de sutura de Dabeiba-Pueblo Rico, la cual pone en contacto los terrenos Calima – Cuna (Toussaint y Restrepo 1989); mientras que en Remedios puede estar influenciada por la zona de sutura Otú-Pericos, la cual pone en contacto los Terrenos Chibcha-Tahamí (Toussaint y Restrepo 1988).

El ambiente geológico tan complejo en el que se encuentra el noroccidente antioqueño y las transurrencias asociados a este, también pueden ser criterios para tener en cuenta a la hora de hacer referencia a estas magnitudes, puesto que la sismicidad cortical, con ruptura del terreno en superficie, ha causado varios terremotos en las últimas décadas en Colombia.

En el trabajo de la USGS (Science for a changing world, U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior) “Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions (París y Otros, 2000)”, se reportan características generales de algunas fallas geológicas en Antioquia y la actividad neotectónica asociada a ellas (Tabla 6).

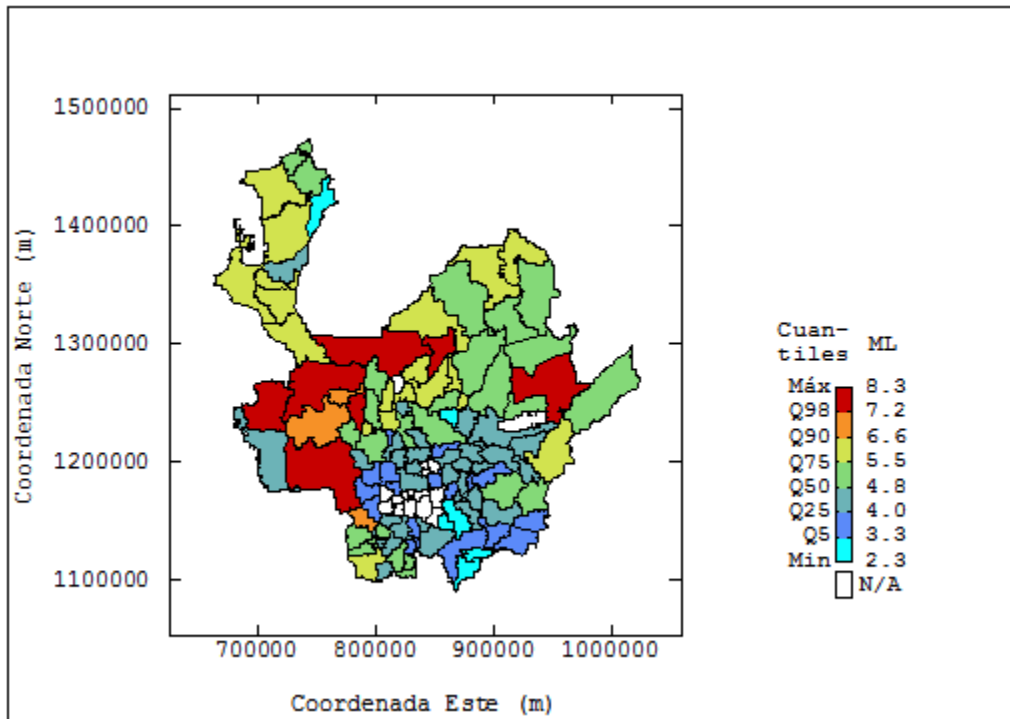


Figura 7. M_L máxima esperada para los municipios de Antioquia
Figure 7. M_L máxima spected by Antioquia's cities

Tabla 5. Municipios con valores esperados de $M_{L, Máx.} > 7$
Table 5. Cities with value spectedof $M_{L, Máx.} > 7$

MUNICIPIO	MAGNITUD
ITUANGO	8.3
DABEIBA	8.2
URAMITA	8.2
URRAO	8.1
CAÑASGORDAS	8.0
REMEDIOS	7.5
MURINDÓ	7.2

Tabla 6. Algunas fallas geológicas que reportan actividad neotectónica en Antioquia
Table 6. Some geological faults which report Antioquia's neotectonics activiry

FALLA	EDAD DE ÚLTIMO MOVIMIENTO	INTERVALO DE RECURRENCIA
Mutata	<1500 a	desconocido
Murindó	18 a	desconocido
Murri	< 1.6 Ma	desconocido
Cañasgordas	< 1.6 Ma	desconocido
Urrao	< 1.6 Ma	desconocido
Palestina	< 1.6 Ma	desconocido
Espiritu Santo	<1500 a	2000 - 5000 a
Mulato	< 1.6 Ma	desconocido
Cimitarra	< 1.6 Ma	desconocido
Santa Rita	< 1.6 Ma	20000 - 200000 a
Abriaquí	< 1.6 Ma	desconocido

5. DISCUSIÓN

En el análisis de la amenaza sísmica para cada uno de los municipios antioqueños se ha considerado la “amenaza sísmica interna”, es decir, se estimó con geoestadística la magnitud del macrosismo superficial de mayor amenaza en el territorio de cada uno de ellos (ver figura 7). Se puede notar que las mayores magnitudes M_L superficiales se distribuyen hacia el extremo occidental del departamento, razón por la cual se establece una estrecha relación entre estas y los principales sistemas de fallas que atraviesan este territorio.

Según los resultados encontrados en esta investigación, hacia el occidente y noroccidente antioqueño, en municipios como Murindó, se prevén valores de M_L mayores 7, hecho no tan ajeno a la realidad a la hora de valorar la “amenaza sísmica interna” en la que se encuentra dicho municipio, ya que para este se han reportado eventos sísmicos históricos como los ocurridos en Murindó el 17 y 18 de Octubre de 1992, el del 7 de septiembre de 1882, en Turbo, y en Mistrató, el 23 de noviembre de 1979.

Para el municipio de Ituango, se pronostica que las fallas geológicas que atraviesan su territorio están en la capacidad de generar sismos del orden de 8.3 M_L , representando así, una amenaza sísmica alta no solo localmente sino también para gran parte del departamento de Antioquia. Estos resultados difieren de lo estipulado en la NSR-98 y NSR-2010; las cuales sugieren para Ituango una amenaza sísmica intermedia; esta discrepancia nos puede estar indicando que es necesario llevar a cabo más investigación de campo. Las fallas geológicas que mayor amenaza ofrecen para el Valle de Aburrá estarían localizadas en Urrao, Ituango, Uramita, Cañasgordas, Dabeiba, entre otros.

Como una amenaza para la capital antioqueña, Lalinde C., y otros (2009), reportan la ocurrencia de un paleosismo de 6.7 Mw hace menos de 1800 años, que afectó un paleosuelo con cenizas volcánicas localizado en el portal occidental de la conexión vial Aburrá-Cauca, a una distancia de 16 Km de la ciudad de Medellín. Es posible que este evento este asociado a un macrosismo; cuyo epicentro pudo haber estado localizado en algún lugar del occidente antioqueño (Urrao,

Uramita, Ituango, etc.) y que por el “efecto dominó” se hayan reactivado el movimiento de algunos planos como el del Segmento 5 de la falla San Jerónimo. Sánchez y Giraldo (2011), consideran que las fallas geológicas que atraviesan el municipio de Medellín tienen un grado de actividad posible, pudiéndose generar un macrosismo superficial de M_L de 4.6.

Lo anterior ratifica la necesidad de tener en cuenta muchos parámetros y herramientas importantes cuando se vaya a abordar el tema de la amenaza sísmica en cualquier territorio; entre estas herramientas tenemos: la Neotectónica, la geocronología, la sismología, la paleosismicidad, entre otros.

6. CONCLUSIONES

A partir de los datos recopilados de microsismicidad superficial en Antioquia se ha podido estimar el valor de M_L esperada para cada municipio del departamento. A partir de estas previsiones de magnitudes locales máximas se deduce la importancia de evaluar con trabajo de campo el grado de actividad que presentan algunas de las fallas geológicas que atraviesan el territorio antioqueño y los potenciales efectos catastróficos que estas pueden representar. No obstante, aun disponiendo de la geoestadística como herramienta de apoyo, es importante adelantar estudios de actividad neotectónica de las principales fallas corticales del departamento, ampliar el número de acelerógrafos y sismógrafos, para que así se pueda aumentar el nivel de conocimiento de la actividad sísmica local, sobre todo en las zonas donde se reportan estimados de M_L altos y moderados.

Por otro lado, en Antioquia se planea la construcción de una planta de aluminio en el municipio de Turbo, las autopistas de la montaña, proyectos mineros en el sector aurífero de gran importancia; como gramalote, el proyecto hidroeléctrico Ituango, entre otros. Estos proyectos, además de las grandes inversiones económicas requeridas, influyen y cambian la dinámica poblacional, concentrando mayor número de personas a sus alrededores. Por este motivo es de suma importancia la cantidad y calidad de estudios geológicos que contribuyan a una mejor caracterización de la amenaza sísmica en Antioquia.

AGRADECIMIENTOS: Este artículo es una contribución al proyecto de investigación “Amenaza Sísmica del Departamento de Antioquia basada en la actividad microsísmica de la RSNC” fase I, financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (DIME).

REFERENCIAS

[1] ARIAS, L. A., Actividad Cuaternaria de la falla Espíritu Santo (1981). Revista CIAF, Centro Interamericano de Fotointerpretación, Vol. 6, No. 1-3, pp. 1-16, Bogotá.

[2] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE: ley 400 de 1997 - decreto 33 de (1998).Tomo I. 475 p.

[3] DÍAZ VIERA, M., Geoestadística aplicada, 2002. Instituto de Geofísica, UNAM, México. 131 p.

[4] DOUGLAS, J. A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000) (2001). ESEE Report No. 01-1. 129 p.

[5] DUQUE-CARO, H., El bloque del Chocó en el noroccidente suramericano: implicaciones estructurales, tectonoestratigráficas y paleogeográficas (1990). Boletín Geológico Ingeominas, Vol. 31. pp 47-71.

[6] ESPINOSA, A., Algunas enseñanzas del sismo del Quindío (1999). Disertación en los “Martes del Planetario”, Marzo de 1999, evento organizado por la Sociedad Geográfica de Colombia. 13p.

[7] FARBIARTZ, F., Estrada. Comparación de la actividad sísmica de Colombiana antes y después de la instalación de la red sismológica nacional (2002). Boletín De Ciencias De La Tierra ISSN: 0120-3630, 2002 Vol 14. pp 14 – 29.

[8] HERMELÍN, H., Desastres de origen natural en Colombia, 1979-2004 (2005). Fondo Editorial Universidad EAFIT (Primera edición, julio 2005), Medellín. pp 213-224.

[9] INGEOMINAS. Geología de las planchas 129 Cañasgordas y 145 Urrao (2003).

[10] LALINDE, C., ESTRADA, B. Y FARBIARZ J., “preliminary application of the inqua scale to recent colombian earthquakes” (2007). Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, pp. 646–654

[11] LALINDE, C., GONZÁLEZ, A., Y CABALLERO., Evidencia Paleosísmica en el Segmento de falla Sopetrán o san Jerónimo segmento 5 (2009). Boletín de Geología Vol. 31. n.2 Bucaramanga jul. /dic.

[12] MADRID, G., “Experiencia del programa de reconstrucción en Antioquia” (1993). Proceso de recuperación de comunidades afectadas por los sismos de octubre de 1992. Resumen ejecutivo. Medellín, gobernación de Antioquia, septiembre. 17p.

[13] MORALES, J., Evidencia de Neotectónica en la falla Cauca Oeste, Sector Puente de Occidente Santa Fe de Antioquia (2003). Trabajo dirigido de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Geólogo. 114 p.

[14] PARIS G., MACHETTE M., DART R. AND HALLER K. “Map and database of quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions” (2000). U.S. Geological Survey, 60p.

[15] SALCEDO, E., CARDONA, C., MORA. HÉCTOR. “Caracterización sismotectónica y geodinámica de la fuente sismogénica de Murindó-Colombia” (2005). Boletín de Geología. Vol. 27, No. 1. p. 115-132.

[16] SÁNCHEZ Y GIRALDO (2011). Potencial de fallas geológicas activas Departamento de Antioquia, Colombia: Informe técnico DIME, Medellín, 6 P.

[17] SÁNCHEZ A., GIRALDO O. Y MORENO J., 2011. Software ASDA para simular amenaza sísmica en el departamento de Antioquia: Informe técnico Dime, Medellín, 21 P.