

**POTENCIAL DE FALLAS GEOLÓGICAS ACTIVAS
DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, COLOMBIA**

LUIS HERNÁN SÁNCHEZ A.

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

ORLANDO GIRALDO B.

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

RESUMEN: Con base en estudios geoestadísticos de estimación global de los datos de sismicidad reportados por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), se determinó un módulo geoestadístico (mg_{95}) que permitió categorizar el nivel de actividad del fallamiento cortical en el Departamento de Antioquia (DA), Colombia. El mg_{95} relaciona los valores de estimación con krigeage poligonal y su error correspondiente para cada uno de los municipios antioqueños con un parámetro de Student al 95% de confianza, que depende del número de microsismos registrados localmente. Para determinar los niveles de fallamiento activo en cada municipio, se propone la siguiente escala de categorización: fallamiento activo probado $mg_{95} \in [0-0.2]$, fallamiento activo probable $mg_{95} \in (0.2-0.3]$ y fallamiento activo posible $mg_{95} > 0.3$.

PALABRAS CLAVE: Sismología, módulo geoestadístico, Fallas activas, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

El departamento de Antioquia está localizado en la esquina noroccidental de Suramérica es una de las regiones menos comprendidas del mundo, ya que su geología es producto de la interacción de múltiples procesos geológicos y la interacción de placas y microplacas tectónicas que allí convergen. Los sismos generados en esta región, muestran drásticos cambios en los mecanismos focales¹. En los últimos 130 años las fallas activas corticales han generado terremotos como el de Turbo 1882² y el de Murindó 1992³.

2. BASE DE DATOS

El análisis de la sismicidad reportada por la RSNC entre el primero de junio de 1993 y 30 de junio de 2009, muestra como en el DA se han registrado 2429 epicentros de los cuales el 78% (1897) corresponde a actividad superficial (el 77% de los datos está localizado a una profundidad de 3 Km.), con una magnitud local (M_L) de 2.7 y un 25% de los datos en el intervalo $3 \leq M_L \leq 5.3$. Este hecho hace pensar sobre la importancia que tiene la actividad sísmica cortical en el DA y la subvaloración del nivel de actividad de las fallas geológicas en la región.

El gráfico cuantil-cuantil de la figura 1, indica la fuerte tendencia de la actividad microsísmica superficial en el DA, a comportarse estadísticamente como una distribución lognormal para los datos de magnitud local.

3. GEOESTADÍSTICA ESTRUCTURAL

Como principal herramienta geoestadística para evaluar el comportamiento espacial de la actividad sísmica superficial en el DA, se elaboró el semivariograma cuya gráfica fue asimilado a un modelo de tipo exponencial (fig. 2), con un rango de influencia para los datos sísmicos de 5 kilómetros y una varianza real (meseta) de 0.31.

El modelo del semivariograma para la variable M_L fue validado regionalmente con 1725 sismos, un promedio del error estandarizado de 0.005 y una varianza estandarizada del error de 0.88. El modelo rechazó el 0.4 % de los datos dentro de un radio de 100 Km. La ecuación que representa el modelo es la siguiente.

$$\gamma(h) = 0.31 * (1 + e^{-\frac{h}{5}})$$

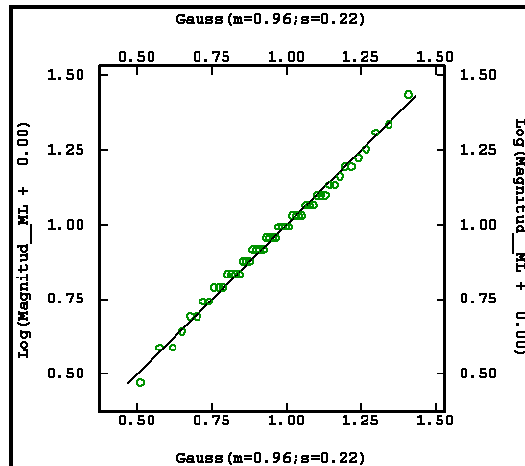


Figura 1. Gráfico cuantil-cuantil que indica el comportamiento estadístico de los datos de M_L del DA hacia una distribución lognormal

La estimación global se basó en la técnica geoestadística conocida como “krigeage poligonal”. El procedimiento fue diseñado para proporcionar un valor estimado de la sismicidad dentro de las áreas que delimitan la cobertura poligonal de cada uno de los municipios del DA. Cada municipio recibe un único valor de estimación global con su correspondiente error. El número de sismos tenidos en cuenta para la estimación dentro de cada municipio equivale a los epicentros locales más los localizados por fuera del polígono municipal dentro de un contorno de 5 kilómetro correspondiente al rango de influencia deducido del semivariograma (fig. 3).

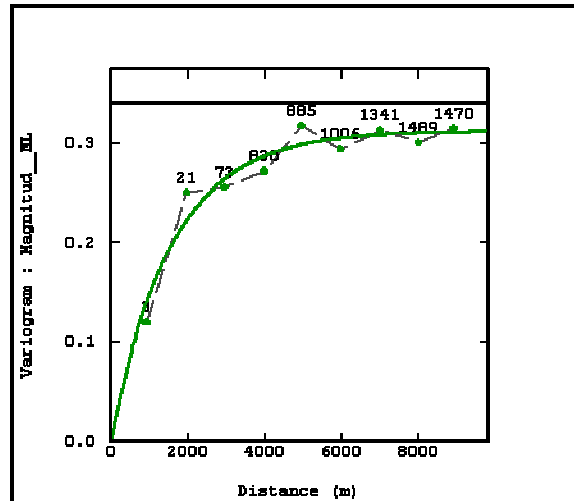


Figura 2. Semivariograma experimental (línea a trazos) y teórico (línea continua) de la magnitud local M_L . Los números sobre los puntos indican el número de parejas consideradas

4. MÓDULO GEOESTADÍSTICO Y CATEGORIZACIÓN DE FALLA GEOLÓGICAS ACTIVAS

El nivel de actividad de las fallas geológicas o segmentos de fallas geológicas pertenecientes a algún sistema, se definió con un factor al 95% de confianza denominado “módulo geoestadístico (mg_{95}) para caracterizar el nivel de actividad de fallas geológicas”.

$$mg_{95} = \frac{\text{Error de estimación}}{\text{Valor estimado}} * \text{Factor de Student}(t)$$

t depende del número de sismos considerados.

Como ejemplo de estimación, utilizaremos el caso de estudio el municipio de Murindó (Fig. 3).

Error global de estimación = 0.11

Sismicidad global estimada (M_L) = 2.91

Número de sismos considerados = 358

Factor de Student = 1.96, (ver anexo)

$$mg_{95} = \frac{0.11}{2.91} * 1.96 = 0.07$$

Si crece el número de epicentros disminuye el error de estimación y el factor de Student, por lo tanto aumenta el nivel de la amenaza por fallamiento activo.

De este modo el mg_{95} es utilizado para categorizar el nivel de fallamiento activo del DA, partiendo del hecho de que la presencia de actividad sísmica cortical implica la presencia de fallas geológicas activas.

Teniendo en cuenta los valores de mg_{95} obtenidos para cada uno de los municipios del DA, se proponen unos niveles de clasificación de la actividad de fallas geológicas (tabla 1). La tabla 2, resume los resultados obtenidos para algunos de los municipios antioqueños.

Tabla 1. Categorización del nivel de actividad de fallas geológicas

mg_{95}	Fallamiento Activo
[0-0.2]	Probado
(0.2-0.3]	Probable
>0.3	Posible

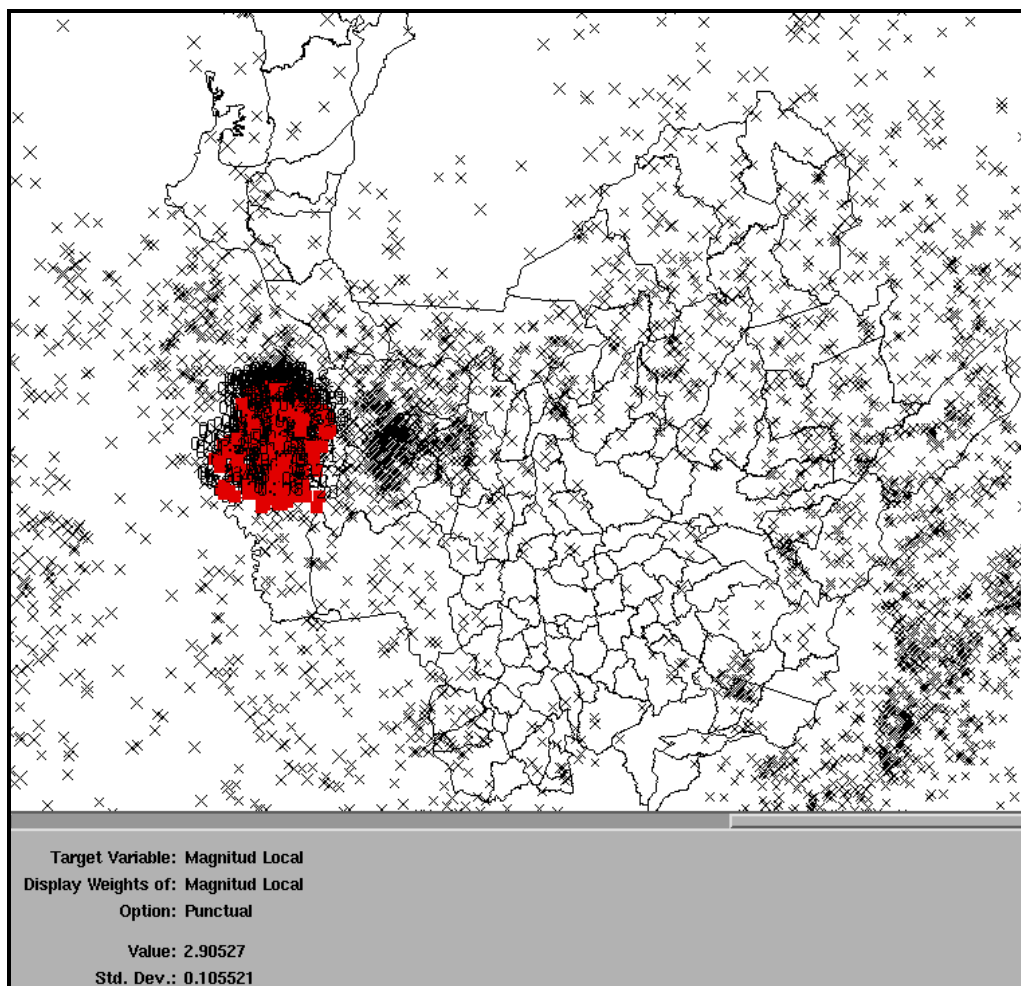


Figura 3. Intersección de epicentros con magnitud local M_L del RSNC, con la cobertura del DA. En este ejemplo fue estimado el valor M_L global para el municipio de Murindó $M_L = 2.91$ y $\sigma = 0.11$, el número de sismos= 358, factor de Student (t)=1.96 y así $mg_{95} = (0.11/2.91) * 1.96 = 0.07$ indica que las fallas geológicas que controlan Murindó tienen un nivel de actividad probada

Tabla 2. Potencial de fallamiento activo sobre algunos municipios del DA

Municipio	M _L Estimada	Error de Estimación	mg ₉₅	Fallamiento Activo
Medellín	2.55	0.41	2.04	Posible
Abriaquí	2.46	0.19	0.16	Probado
Andes	2.61	0.20	0.16	Probado
Barbosa	2.30	0.58	2.63	Posible
Frontino	2.61	0.12	0.09	Probado
Ituango	2.75	0.15	0.11	Probado
Peñol	2.35	0.38	2.05	Posible
Olaya	2.40	0.28	0.30	Probable
Mutató	2.71	0.18	0.13	Probado

5. DISCUSIÓN

Regionalmente el territorio del DA está afectado por la unión triple de la convergencia entre las placas Caribe, Nazca y Suramericana. Esta zona de contacto está representada por dos microplacas denominadas bloque Andino y bloque de Panamá Baudó⁴. Como consecuencia de esta actividad geotectónica, tres sistemas de fallas geológicas controlan la actividad sísmológica en el DA: Sistema Cauca Romeral cartografiado desde los inicios del siglo 20⁵, Sistema de Fallas de Palestina⁶, sistema de fallas de Mutatá-Murindó (Sutura de Dabeiba).

Para algunos Autores⁷ la sismicidad en el noroccidente colombiano es difusa y compleja, ocasionada por fallamiento que origina compresión este-oeste, lo que significa que estas hipótesis suponen que los sismos generados en la región no son ocasionados por subducción, sino que son producto de la convergencia de placas y microplacas.

Los resultados geoestadísticos obtenidos en esta investigación, indican que el 42% de los municipios antioqueños está controlado por fallas geológicas con un nivel de actividad probado; el 24% de los municipios valorados en este nivel están geotectónicamente asociados con el sistema de fallas Mutatá-Murindó (Sutura de Dabeiba), el 37% con el sistema de fallas Cauca Romeral y el 39 % restante con el Sistema de fallas de Palestina.

El mayor potencial de fallamiento activo en el DA, se registra en los municipios de Ituango (Sistema de Fallas Cauca Romeral, Sutura de Dabeiba), Dabeiba, Urrao, Uramita, Cañas Gordas, Murindó (Sutura de Dabeiba) y Remedios (Sistema de Fallas de Palestina).

El fallamiento cortical que mayor amenaza ofrece para el DA está asociado con el sistema de fallas de Mutatá-Murindó (Sutura de Dabeiba). Considerando la amenaza sísmica externa que esta sutura ofrece para el Valle de Aburrá (3.317.166 habitantes⁸), donde está localizada la ciudad de Medellín, los segmentos que pasan por Urrao serían los rasgos neotectónicos que mayor peligrosidad reportan; ya que tiene un potencial para generar sismos superficiales con un PGA (Peak Ground Aceleración) del orden de 0.96g (unidades de gravedad), las cuales podrían llegar

atenuadas a Medellín con un equivalente de la aceleración de la gravedad de 0.25g. Uno de los sismos históricos más representativos de la zona asociados con la sutura de Dabeiba es el ocurrido el 7 de septiembre de 1882, con una intensidad X en la escala de Mercalli y una magnitud Ms estimada entre 6.5-7.2. Este sismo fue sentido intensamente en el Istmo de Panamá y en gran parte de los departamentos del Antioquia y Chocó¹. Al igual que en el sismo de 1882, la mayor parte de la región de Urabá, fue afectada por los sismos del 17 y 18 de octubre de 1992, donde se presentaron un sinnúmero de daños ocasionados al medio ambiente y sobre los centros urbanos del Noroccidente Colombiano³. Para el evento del 18 de octubre, se registró en un acelerógrafo localizado en la sede de ISA de la ciudad de Medellín, una aceleración máxima horizontal de 0.03g, el cual es un valor muy bajo si se tiene en cuenta los daños registrados³.

Tanto las fallas relacionadas con la sutura de Dabeiba, como las fallas asociadas con el sistema Cauca Romeral controlan el territorio del municipio de Ituango, donde la actividad sísmica registrada es moderada con 110 sismos superficiales, que alberga un potencial geoestadístico alto para la generación de actividad macrosísmica, con un peligro potencial para el Valle de Aburrá alto (PGA del orden de 0.18), es decir, 0.176g de aceleración horizontal. Además, es notoria la estrecha relación que muestran los resultados obtenidos en esta investigación con los estudios de neotectónica levantados hasta el presente sobre el tren de fallas del sistema Cauca Romeral en el noroeste del DA^{9,10, 11}.

De esta manera, se concluye que la geoestadística puede ser utilizada como una herramienta valiosa de apoyo a la sismología, que complementa los estudios que se realicen de geotectónica y geocronología y puede ser utilizada para tomar decisiones a la hora de instrumentar y monitorear las localidades de mayor amenaza sísmica.

AGRADECIMIENTOS: Este artículo es una contribución al proyecto 9536 de la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (DIME).

REFERENCIAS

- [1]. CARDONA, C., SALCEDO, E. Y MORA, H. Caracterización Sismotectónica y Geodinámica de la Fuente Sismogénica de Murindó – Colombia. (www.geoslac.org/memorias2/memorias/.../sismot_geodinamic_a_col.pdf, mayo 27/2010).
- [2]. PARÍS, G., MACHETTE, M., DARAT, R. AND HALLER, K., 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions: USGS (International Lithosphere Program), 61 P.
- [3]. MARTINEZ, J., PARRA, E., PARÍS, G., FORERO, C., BUSTAMANTE, M., CARDONA O. Y JARAMILLO, J., 1994. Los Sismos del Atrato Medio 17 y 18 de Octubre de 1992: Revista Ingeominas (Nº2), Bogotá, pp 35-76.
- [4]. TOUSSAINT, J.F. Y RESTREPO J.J., 1987. Límites de Placas y Acortamientos Recientes entre los Paralelos 5°N y 8°N, Andes Colombianos: Revista Geológica de Chile (Nº 31), Santiago de Chile, pp 95-100.

- [5]. GROSSE, E., 1926. El Terciario Carbonífero de Antioquia : Dietrich Reimer, Berlín, 361 P.
- [6]. FEININGER, T., BARRERO, D. AND CASTRO, N., 1972. Geología de la parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-zona IIA, oriente de Antioquia): Boletín Geológico Ingeominas V.20(2), Bogotá, 173 P.
- [7]. PENNINGTON. W., ET AL., (1988). Seismicity of the Caribbean - Nazca Boundary: Constrains on Microplates Tectonics of the Panamá Región. Journal of Geophysical Research. Vol. 93. No. B3, Pages 2053 - 2075.
- [8]. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA: Censo 2005. (<http://es.wikipedia.org/wiki/DANE>, junio 17 de 2010).
- [9]. ARIAS, L.A., 1981. Actividad Cuaternaria de la Falla Espíritu Santo: Revista CIAF, Vol. 6, pp 1-16.
- [10]. WOOWARD . CLYDE CONSULTANTS, 1980. Phase I, Preliminary Seismic Hazard Study Ituango Proyect, Colombia: Unpublished report for Integral, Ltda and ISA, Medellín, 152 P.
- [11]. CLINE, K., PAGE, E. GILLAN, M., CLUFF, L., ARIAS, L., BELARCAZAR, L. Y LÓPEZ J., 1980. Quaternary activity of the Romeral and cauca Faults, Northwest Colombia: In Seminario sobre el Cuaternario de Colombia, N°1, Resumenes, -vol. 1, Bogotá, pp 37-38.

BIBLIOGRAFÍA

- WEBSTER R. AND OLIVER, M., 2007. Geostatistics for Environmental Scientists: John Wiley . Sons, segunda edición, 332P.
- CHILES, J. AND DELFINER, P., 1999. Geostatistics Modeling Spatial Uncertainty: John Wiley . Sons, 704 P.
- INGEOMINAS, 2001. Mapa Geológico del departamento de Antioquia, escala 1:400.000, memoria explicativa. Ingeominas 241p.
- INGEOMINAS, (1996). Mapa geológico generalizado del departamento de Antioquia, escala 1:400.000, memoria explicativa. Ingeominas. Medellín.

Anexo

DISTRIBUCION T-STUDENT CON 95% DE CONFIANZA

(n) N° de sismos	(t) 95% nivel de confianza
2	12,7
3	4,30
4	3,18
5	2,78
6	2,57
7	2,45
8	2,37
9	2,31
10	2,26
11	2,23
12	2,20
13	2,18
14	2,16
15	2,15
16	2,13
17	2,12
18	2,11
19	2,10
20	2,09
21	2,09
23	2,07
25	2,06
26	2,06
29	2,05
30	2,04
40	2,02
50	2,01
100	1,98
200	1,97
∞	1,96