

ANALISIS DE LA FRECUENCIA DE TERREMOTOS FUERTES EN LA REGION CENTRAL DE COLOMBIA MEDIANTE PARAMETROS DEL REGIMEN SISMICO

por

Elkin de Jesús Salcedo Hurtado^{1,2}, Clara Inés Rivera Pérez^{1,3}, Augusto Antonio Gómez Capera^{1,3}

Resumen

Salcedo, E., C.I. Rivera & A. Gómez: Análisis de la frecuencia de terremotos fuertes en la región central de Colombia mediante parámetros del régimen sísmico. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 21(79): 57-72, 1997. ISSN 0370-3908.

Se presenta para la región central del territorio colombiano, un análisis de los parámetros b y A_{10} que describen las características del régimen sísmico. Las variaciones de estos parámetros en el tiempo permitieron hacer un pronóstico sobre fuertes sismos ocurridos en el pasado en la región. Debido a la ventana espacial considerada, no ha sido fácil establecer una ley de tiempos premonitorios coherente con el tiempo de recurrencia de los sismos fuertes analizados. Esto demuestra que el análisis de las variaciones de los parámetros b y A_{10} , precursores de terremotos, debe realizarse para regiones que caractericen un solo tipo de zona sísmogénica.

Palabras claves: Actividad sísmica A_{10} , terremotos, parámetros b , precursor de terremoto, régimen sísmico, Colombia, tiempo premonitor.

Abstract

In this paper we carried out an analysis of b and A_{10} parameters for the central region of Colombia, which describe the characteristics of seismic regimen. The variations in the time of these parameters allow us to make a retrospective forecast of strong earthquakes that occurred in the region.

Due to the spacial window considered, it was not easy to establish an precursor time law coherent with the recurrence of the strong earthquakes that were analyzed. It shows that the analysis

¹ INGEOMINAS, Subdirección de Geofísica, A. A. 4865, Santafé de Bogotá, D.C. - Colombia.

² Actualmente Departamento de Geografía, Universidad del Valle, Cali (Valle) - Colombia.

³ Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C. - Colombia.

of the variations of the b and A_{10} parameters, earthquake predictors, must be done for regions which characterize only one type of seismogenic zone.

Key words: Seismic activity A_{10} , frequency of occurrence of earthquakes, b -parameter, earthquake predictor, seismic regimen, Central Region of Colombia, strong earthquake, precursor time.

1. Introducción

En el estudio del proceso y el régimen sísmico uno de los principales lugares, lo ocupan tradicionalmente los interrogantes sobre la estimación de los parámetros de la frecuencia de ocurrencia de los terremotos, es decir, la función $N(M)$ con la fijación de intervalos $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, Δh y Δt . La función $N(M)$ está representada generalmente por la bien conocida relación de Gutenberg y Richter ($\lg N = a - bM$).

Es claro, que esta ecuación representa la relación entre la frecuencia de ocurrencia de terremotos y la magnitud, y es un importante factor para el estudio de la sismicidad. Algunas diferencias en el valor del parámetro " b " han sido observadas entre diferentes regiones sísmicas, como también han sido muchas las discusiones del significado de estas diferencias. Así mismo, analizando la actividad sísmica en la misma región se pueden observar cambios en el tiempo, incluyendo la actividad sísmica ordinaria y la réplicas.

El trabajo de los sismólogos tiene por objeto, entre otros, lograr un mejor entendimiento de los procesos conducentes a la ocurrencia de terremotos. Con este objetivo los diferentes parámetros que se han podido observar sufren importantes variaciones que pueden ser consideradas como precursoras de terremotos (Rikitake, 1975). Dentro de los parámetros considerados por Rikitake para la predicción de terremotos puede apreciarse la importancia del parámetro b .

Generalmente, las metodologías seguidas para el cálculo de los parámetros del régimen sísmico se han basado en la aplicación de métodos estadísticos; son muchos los trabajos realizados en este sentido. Ogata & Katsura (1993) describen que Utsu en 1971 revisó más de 250 artículos que para ese tiempo incluían descripciones de los valores de b y relacionaba cantidades para terremotos ocurridos en algunas regiones del mundo. Utsu señaló que b comúnmente toma un valor cercano a la unidad y varía aproximadamente en un intervalo entre 0,3 y 2,0.

A pesar de que no existe acuerdo sobre si el parámetro b aumenta o disminuye antes de un terremoto fuerte, para muchos autores, a quienes les ha llamado la atención la

variación temporal del parámetro b , es claro que éste tiene comportamientos particulares para cada región y que actúa como un premonitor de terremotos (Smith, 1981; Suyehiro, 1966).

En el presente trabajo, usando el catálogo de terremotos de todo el territorio colombiano actualizado por la RSNC (Red Sismológica Nacional de Colombia) para CERESIS (Escallón, *et al.* 1993) y de los datos registrados por la RSNC a partir del año 1993 (INGEOMINAS, 1995), se hace un análisis no sólo de la variación temporal del parámetro b , sino también de la actividad sísmica, representada por el parámetro A_{10} , para tratar de pronosticar fuertes sismos ocurridos anteriormente en la región central del territorio colombiano.

2. Ubicación geográfica de la región de estudio

La región de estudio está limitada entre las coordenadas $2,5^\circ$ - $6,5^\circ$ de latitud Norte y $72,0^\circ$ - $76,0^\circ$ de longitud Oeste, encerrando los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Caldas, Quindío, Risaralda y Meta; además cubre el sur de los Departamentos de Antioquia y Santander, la parte occidental del Casanare y el norte de Huila (figura 1). Esta región se escogió con el objeto de evaluar el ambiente sismotectónico de la parte central del territorio colombiano, y encontrar la relación entre la sismicidad y las principales estructuras tectónicas allí presentes. Todo el estudio realizado, del cual hace parte el presente análisis, fue enmarcado dentro del proyecto Sismotectónica del Territorio Colombiano, desarrollado en el INGEOMINAS (Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química).

3. Características del régimen sísmico

La principal característica del régimen sísmico, en particular la frecuencia media de ocurrencia en un período largo, queda establecida por la ley y el gráfico que muestran la frecuencia con que se repiten los terremotos de determinada magnitud en una región dada. Generalmente, éstos están representados por una función estadística de distribución de frecuencia de ocurrencia de los terremotos, distribuidos bien sea por su clase energética

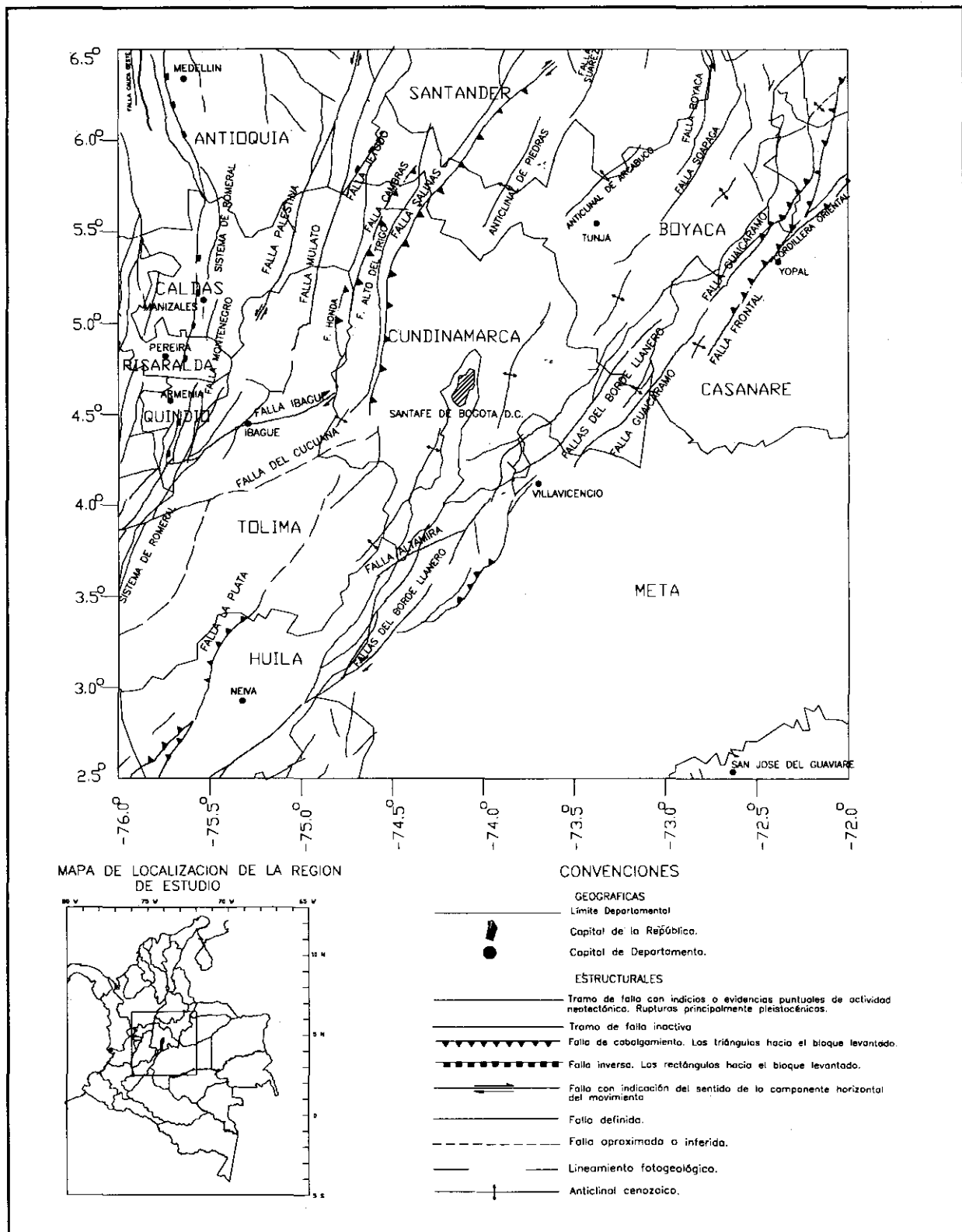


Figura 1. Localización de la región de estudio. Las fallas activas mostradas han sido tomadas de París y Romero (1994).

$K = \log E$ (E - energía sísmica en Julios) o por su magnitud M .

La experiencia muestra que el gráfico de esta función en el sistema de coordenadas K o M y $Ig N$ en primera aproximación, en sus principales límites, tiene un comportamiento lineal. Este se define por tres parámetros principales: 1) pendiente (parámetro b) del gráfico de frecuencia de ocurrencia de terremotos, el cual se define por la relación entre los terremotos pequeños y grandes; 2) actividad sísmica A - tomada como el inicio de la ordenada de este gráfico, dada mediante la definición de un valor fijo de la magnitud del terremoto $K = K_0$, y 3) magnitud del terremoto máximo posible K_{\max} (o M_{\max}), la cual se define en la intersección del gráfico de frecuencia de terremotos con el eje de las abscisas (bien sea K o M).

Debido a que la distribución de los focos sísmicos en el espacio físico x, y, z (en particular en el plano y en la profundidad H) se define por estas coordenadas, antes de analizar el comportamiento del régimen sísmico, describiremos las generalidades y particularidades de la sismicidad de la región.

3.1. Sismicidad. Generalidades

Para la descripción de las particularidades de la sismicidad de la región utilizamos los eventos sísmicos registrados en el intervalo comprendido entre 1900 y 1995 con magnitud $m_b \geq 2,0$. Estos eventos han sido extraídos del catálogo de terremotos de todo el territorio colombiano actualizado por la RSNC (Red Sismológica Nacional de Colombia) para CERESIS (Escallón, *et al.* 1993) y de los datos registrado por la RSNC a partir del año 1993 (INGEOMINAS, 1995).

La distribución espacial de los epicentros de terremotos con $m_b > 3,0$ (Figura 2) permite ver cierta heterogeneidad en la ocurrencia de los terremotos de la región, la que se aprecia por la presencia de "baches" o "gaps" de epicentros, es decir que los epicentros no se presentan de manera continua en todo el espacio. Como puede apreciarse, este hecho está relacionado con la estructura tectónica, ya que los sismos están asociados con las principales fallas geológicas que atraviesan la región.

Por el grado de concentración de los terremotos, en primera aproximación podemos definir algunas zonas de mayor actividad. Al occidente de la región, entre los Departamentos de Caldas, Risaralda y Quindío, en una franja que va desde los $75,00^\circ W$ hasta $76,00^\circ W$, se observa una concentración de sismos fuertes, que por su extensión y características puede ser atribuida por una parte al Sistema de

Fallas de Romeral y por otro lado a la zona de Benioff. Los sismos de esta zona alcanzan profundidades intermedias, algunas veces sobrepasan los 150 kilómetros.

Otra franja de gran densidad de epicentros atraviesa toda la región en dirección suroccidente a nororiente, siguiendo el rumbo del Sistema de Fallas del Borde Llanero. A este sistema de fallas se atribuyen los fuertes sismos ocurridos en Tauramena el día 19 de enero de 1995; también es notoria una fuerte concentración de eventos de diversas magnitudes en la parte septentrional, donde se aprecia una serie de fallas como el sistema Romeral, Palestina, Mulato, Jetudo, Cambrás, Salinas, Suárez, Boyacá, y Soapaga; y anticlinales como los de Piedras y Arcabuco.

La zona central, en el Departamento de Cundinamarca y parte de los Departamentos del Tolima y Boyacá, es notoria por el hecho de que en ella pueden apreciarse algunos eventos, que si bien es cierto por su distribución no permiten deducir ninguna ley general de ocurrencia, debe ser materia de un estudio posterior que integre datos geológicos, geofísicos y sismológicos. Esto debido a que si tenemos en cuenta el marco tectónico, el régimen geodinámico de todo el territorio colombiano y la propiedad de migración de los terremotos esta zona, en el futuro, puede convertirse en un sector detonante de la amenaza sísmica del país.

La parte oriental y suroriental, donde no existe una alta frecuencia de ocurrencia de terremotos, corresponde con la región más antigua y estable, geológicamente hablando, del territorio colombiano.

En la figura 3 se muestra la distribución del número de eventos sísmicos ocurridos en la región, con el tiempo en intervalos de cada cinco años. Puede apreciarse que a partir de 1941 aparentemente la sismicidad aumenta, lo cual no es el caso; esto se debe a la instalación de la estación San Bartolomé por parte del Instituto Geofísico de los Andes - Universidad Javeriana. Más adelante, en el periodo 1956 - 1960 se nota un fuerte y repentino incremento de sismos, que está relacionado con la ampliación, en la década de los años cincuenta, de la red sismológica operante en el territorio colombiano que, al contar con seis estaciones sismológicas, en ese tiempo fue la más adecuada para la detección de eventos locales y regionales que no podían ser registrados por redes sismológicas internacionales.

Posteriormente, en 1966 - 1970 aparece un fuerte pico en el número de sismos ocurridos, que se debe a los cálculos sistemáticos de la magnitud por parte del ISC (Centro Sismológico Internacional), datos que son incluidos

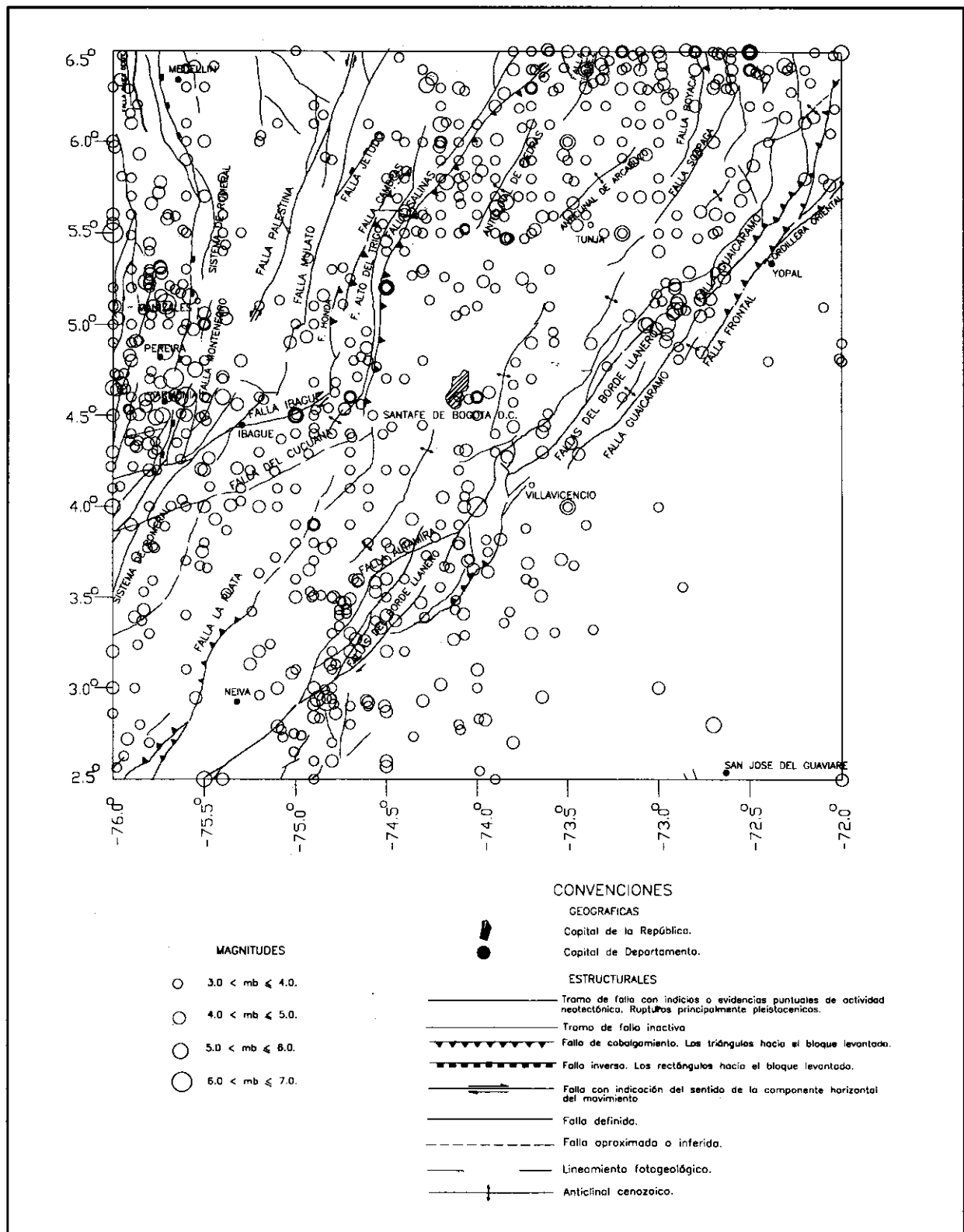


Figura 2. Sismicidad de la Región Central de Colombia, correspondiente al período entre 1900 y 1995, para sismos con magnitud $m_b > 3.0$.

indiscriminadamente en los catálogos sísmicos del país. El decrecimiento que se aprecia a partir de 1971 - 1975 y más acentuado desde 1981 hasta 1990 se atribuye a que para esta época la red del Instituto Geofísico de los Andes se vuelve un poco obsoleta y sus estaciones empiezan a sufrir desperfectos, hasta el punto que en la actualidad son muchas de éstas las que no funcionan totalmente. Pero ya por esta época se empieza a tener registros de sismos regionales, básicamente, de la zona del suroccidente colombiano, detectados por la red del OSSO (Observatorio Sismológico del Sur Occidente), que opera en esa región.

Sin duda alguna, el fuerte incremento marcado en el período de 1991 - 1995 se debe al funcionamiento de la nueva Red Sismológica Nacional de Colombia, la cual es de alta sensibilidad y, de acuerdo con las características y distribución de sus estaciones, al igual que por la forma en que son transmitidos sus datos (Escallón, 1995), pueden ser detectados y analizados sismos de magnitud muy pequeña.

A pesar de que la profundidad del foco es uno de los parámetros de mayor incertidumbre en la detección instrumental de sismos, y de la heterogeneidad de la instrumentación sismológica en el país, es evidente que en estudios de amenaza sísmica y de análisis de las características sismológicas de la región, es importante conocer la distribución de los sismos respecto a la profundidad focal. Para este caso, la figura 4 muestra un histograma que representa la distribución del número de eventos sísmicos con la profundidad. Vemos que los sismos de la región ocurren en la corteza terrestre, concentrándose principalmente en los primeros 40 kilómetros; esto significa que la mayoría de los sismos aquí ocurridos son producto de la actividad de las diferentes fallas geológicas que atraviesan la región. Esto se corrobora en la figura 2.

Se nota también un ligero incremento de la sismicidad a una profundidad entre 110 y 130 kilómetros.

Debemos recalcar que este parámetro está lleno de mucha incertidumbre y mucho más, sabiendo las caracte-

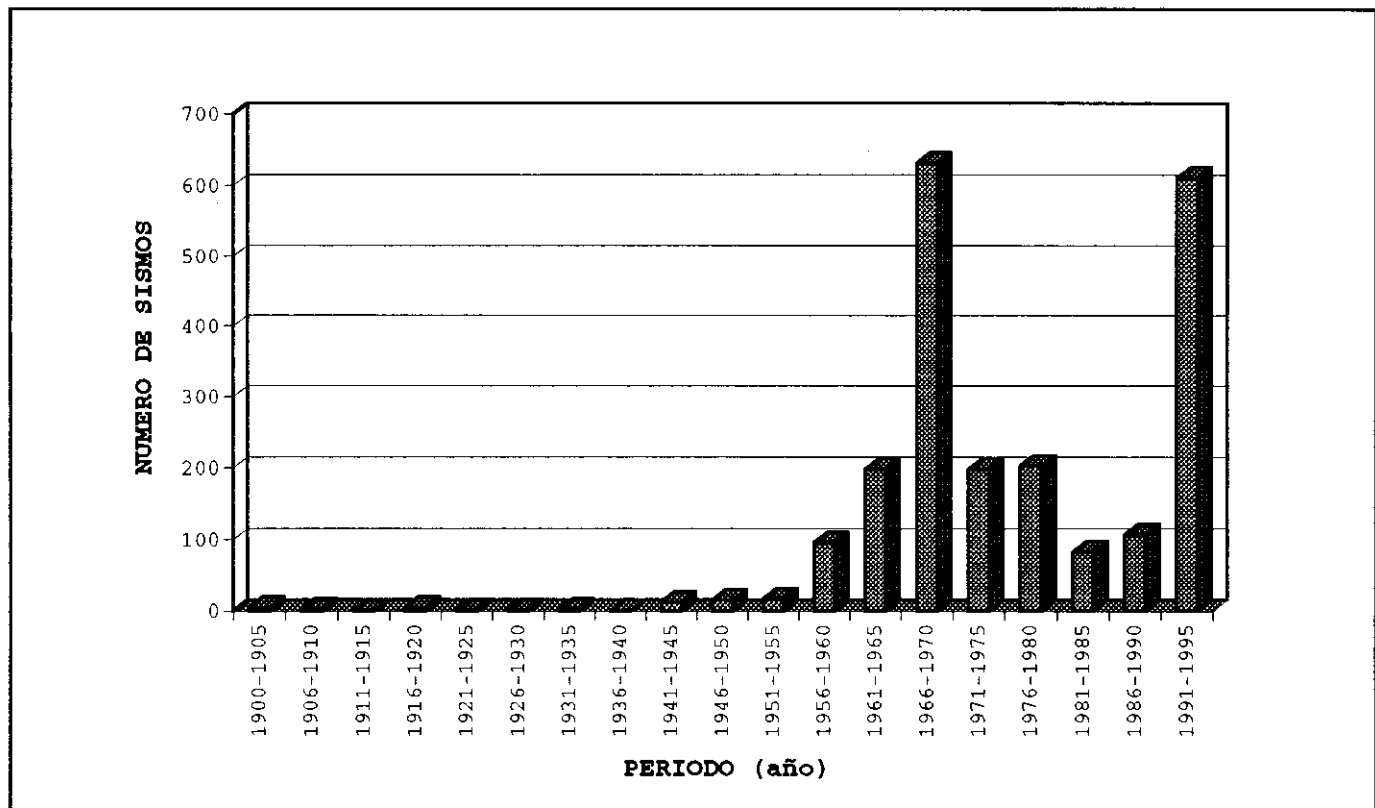


Figura 3. Distribución del número de sismos con el tiempo, para eventos con $m_s > 3,0$ ocurridos entre 1900 y 1995. Llama la atención la presencia de los picos en los períodos de 1966-1970 y 1991-1995.

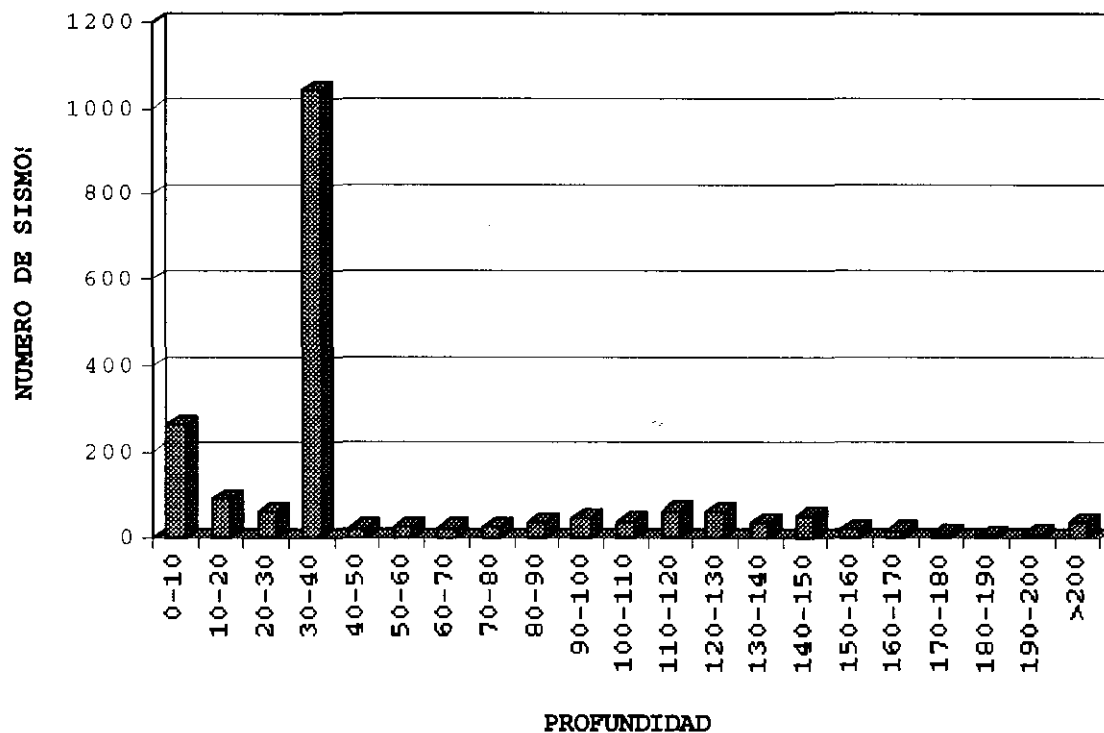


Figura 4. Distribución del número de sismos con la profundidad, para eventos con $m_b \geq 3,0$ ocurridos entre 1900 y 1995. Es notoria la gran sismicidad en el intervalo de 30-40 kilómetros.

rísticas de instrumentación y distribución de la red sismológica local utilizada para la detección de muchos de estos eventos. Es posible que este pico no sea tan fuerte, si se tiene en cuenta que para el período en que la instrumentación no era de óptima calidad para la correcta interpretación de los registros, a la mayoría de los sismos ocurridos en el país se les asignaba, cuando no había mucha certeza de su identificación, una profundidad caracterizada como “normal”, igual a 33 kilómetros aproximadamente (ITEC - ISA, 1980; Ramírez 1975).

La figura 5, que muestra la distribución del número de sismos con la magnitud, nos indica que en la región ha predominado una sismicidad caracterizada por la ocurrencia de eventos con magnitudes pequeñas, que están en un rango entre 2,0 y 4,0. Como puede apreciarse, el número de eventos con magnitud m_b mayores o iguales que 5,5 en el período analizado es bastante bajo. De esta figura notamos algo muy importante, es el caso de la presencia de “baches” en ciertos valores de magnitud, que van desde las más pequeñas hasta las más grandes. La presencia de

estos baches o huecos podemos atribuirlos a las deficiencias que presentan los diferentes catálogos sísmicos elaborados para el territorio nacional, los que generalmente se originan por la calidad y cobertura de la instrumentación en la región.

Puesto que este es un factor de gran importancia en estudios de amenaza sísmica se hace necesario realizar trabajos de complementación de los catálogos, mediante métodos estadísticos, de tal manera que se subsanen los problemas de los “baches” en los diferentes grados de magnitud registrados, lo que nos servirá para tener una mayor certeza en la valoración de las magnitudes máximas y los períodos de recurrencia.

3.2. Consideraciones Teóricas y Datos

3.2.1. Frecuencia de Ocurrencia de Terremotos

En el presente trabajo el análisis se realiza partiendo del gráfico de ocurrencia de terremotos que puede expresarse, como se dijo anteriormente, por medio de la rela-

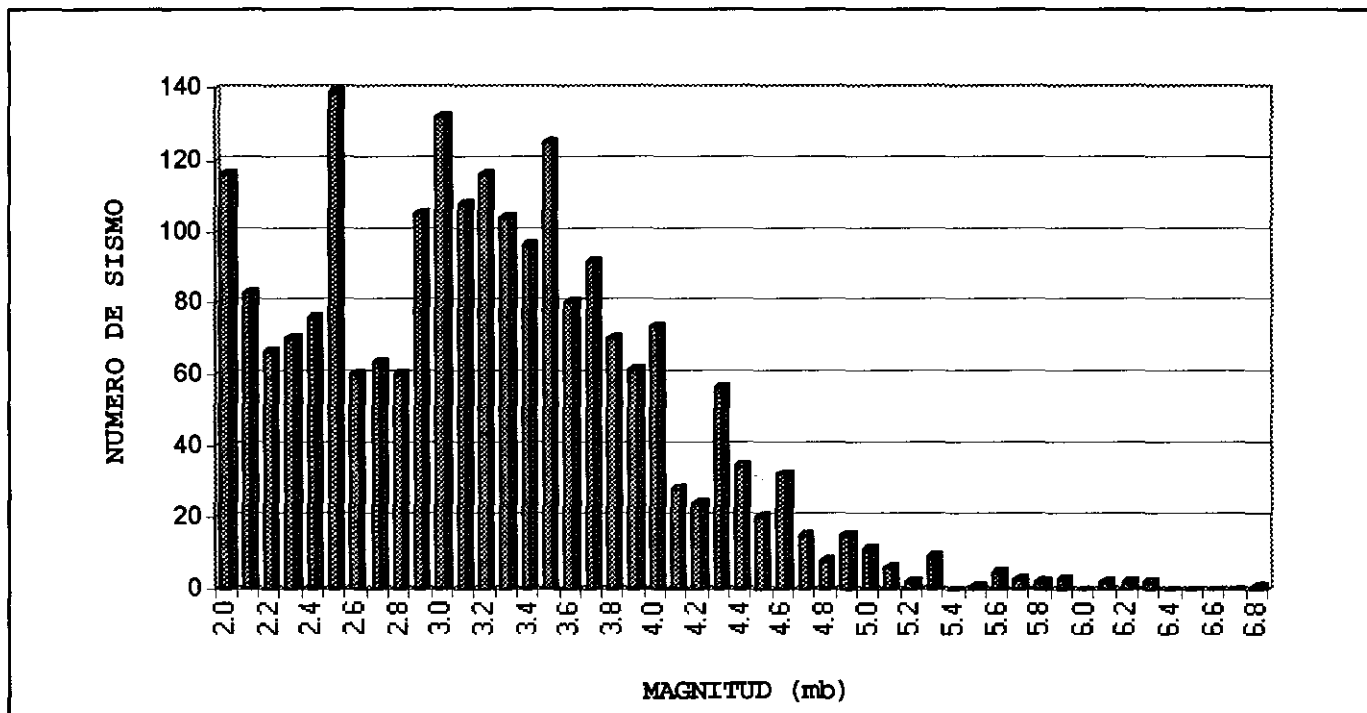


Figura 5. Distribución del número de sismos con la magnitud. Sismicidad entre 1900 y 1995.

ción de energía sísmica o de la magnitud, que enuncia la ley de frecuencia de ocurrencia de los terremotos. Mediante la energía sísmica, ésta se expresa por la fórmula

$$\lg N = \lg A - \gamma(K - K_0); \text{ cuando } K_{min} \leq K \leq K_{max} \quad (1)$$

donde; A - actividad sísmica; γ - pendiente del gráfico de ocurrencia; K_0 - una magnitud fija para una clase de terremotos (generalmente se usa $K_0 = 10$, $K_0 = 13$, $K_0 = 15$; para las cuales se relaciona la actividad sísmica A correspondiente a A_{10} , A_{13} , A_{15}). La expresión con la magnitud para la ecuación del tipo (1) se representa con la ecuación de Gutenberg y Richter

$$\lg N = a - bM \quad (2)$$

De esta manera, la cantidad análoga a K_0 de la ecuación (1) resulta ser igual a cero. Para hacer la transformación de la magnitud (2) a la clase energética K en (1) o viceversa, se utiliza la fórmula siguiente (Rautian, 1960):

$$K = 4 + 1,8M \quad (3)$$

donde $K = \lg E$ con E - energía sísmica liberada. Entonces, para el paso de hacia γ , calculando la ecuación (3) a partir de (1) y (2) obtenemos

$$\gamma = b/1,8 \quad (4)$$

Así, se obtiene que la pendiente $b = \gamma_m$ del gráfico de ocurrencia de sismos respecto a la magnitud se relaciona con la pendiente $\gamma = \gamma_K$ del gráfico de ocurrencia respecto a la energía. La pendiente b o γ es un parámetro muy importante del régimen sísmico, el cual se define directamente de los gráficos de ocurrencia de terremotos. Como vemos, el parámetro b de la fórmula de Gutenberg y Richter (2) tiene igual sentido para el análisis del gráfico de ocurrencia de terremotos que el parámetro γ . Generalmente, la magnitud b está muy cerca del valor 1. El valor del parámetro b de una región determinada está relacionado con el campo de esfuerzos tectónicos. Varios autores afirman que su disminución con el tiempo, frecuentemente está relacionada con el aumento de esfuerzos y viceversa (Bune y Gorshkov, 1980; Risnichenko, 1985).

Entre los sismólogos de todo el mundo, se plantea frecuentemente la pregunta sobre la constante aproximación

o la variación γ de en el espacio y en el tiempo, en dependencia de las propiedades de las rocas en una u otra región sísmica y de las condiciones de deformación relacionadas con la tectónica y con los diferentes estados del proceso sísmico. Lo cierto es que esta dependencia ha sido bien demostrada en experiencias de laboratorio (Vinoogradov, 1964; Risnichenko, 1965). Para construir nuestro gráfico de frecuencia de ocurrencia de sismos elegimos el parámetro b .

La figura 6 muestra la relación entre $\log N$ y M , la que está construida con datos experimentales; ésta sigue una línea recta en un rango específico de magnitudes. El punto en el cual la recta decae en los eventos de magnitudes bajas, en este caso la clase de magnitud 3,2 representa el umbral mínimo de detección para las redes sismológicas en la región. El valor de esta clase de magnitud abarca las magnitudes incluidas en el rango de 3,0 a 3,4.

Si usamos este valor junto con el de las magnitudes superiores, y aplicamos el método de mínimos cuadrados, podemos ajustar los puntos de la gráfica a una línea recta. La relación obtenida es

$$\log N = 5,41 - 0,76 m_b; R^2 = 0,96 \quad (5)$$

De acuerdo con la ecuación (2), se tiene que $a = 5,41$ y $b = 0,76$. Según la relación (4), $\gamma = 0,42$, este es el valor promedio para este parámetro, muy similar al valor obtenido en diversas regiones de la antigua URSS (Bune y Gorshkov, 1980). Estos autores describen que el significado comparativo de γ en diferentes regiones, es tal que en aquellas zonas donde son conocidos epicentros de terremotos grandes en el pasado el valor de γ es notablemente menor que en los lugares donde han tenido lugar muchos terremotos pequeños sin que aún no haya ocurrido un sismo grande.

A partir de la relación (5), que expresa la ley de ocurrencia de terremotos en la región, podemos conocer el umbral máximo de magnitudes M_{\max} de los posibles terremotos que se presenten en ella. De acuerdo con esto, el valor M_{\max} posible en la región central de Colombia, como aquí la hemos demarcado, es de 7,1 en la escala m_b .

Este valor puede estar subestimado si tenemos en cuenta que en los diferentes grados de magnitud, en especial los más pequeños, se nota una muestra incompleta; por tanto, para mejorar el valor anterior necesitamos realizar un trabajo para completar el catálogo creando una base de datos artificial y así poder comparar los dos valores, el

obtenido arriba y el que se podría obtener con la base de datos completada estadísticamente.

Por tal razón, no entraremos a discutir la precisión del valor anterior de M_{\max} en concordancia con la sismicidad histórica y las actuales condiciones tectónicas de la región.

3.2.2. Actividad Sísmica (A)

Por actividad sísmica A en un punto dado, entendemos el valor promedio del número de focos de terremotos en un rango de magnitud energética definida, la cual ocurre alrededor de este punto en la unidad de espacio - volumen o área (si el rango de profundidad es condicional) - y en la unidad de tiempo.

La actividad sísmica (A) se relaciona con el número de terremotos mediante la siguiente relación (Risnichenko, 1985):

$$N_{\Sigma} = A \frac{10^{-b(M_{\min} - M_0)}}{1 - 10^{-b}} \quad (6)$$

donde: M_{\min} - magnitud mínima de los terremotos registrados (umbral mínimo de detección instrumental); M_0 - magnitud para la cual se calcula la actividad sísmica. Matemáticamente la actividad sísmica se calcula por el método de sumatoria, mediante la siguiente fórmula (Risnichenko, 1964; Zajarova, 1972):

$$A = \frac{1 - 10^{-\gamma}}{10^{-\gamma(K_{\min} - K_0)}} \left(\frac{S \cdot N_{\Sigma}}{\Delta S \cdot T} \right) \quad (7)$$

donde: N_{Σ} - número de terremotos que, comenzando de la clase K_{\min} y superior, caen en la ventana espacio-temporal dada; K_0 - clase de terremotos para la cual se define la actividad A ; S - unidad de área de normalización; para el caso particular de A_{10} se toma igual a 1000 kilómetros cuadrados (Risnichenko, 1985); ΔS - área de estudio, en kilómetros cuadrados, y T - ventana de tiempo en la cual realizamos el cálculo.

A pesar de que la actividad sísmica se ha normalizado respecto al área, lo que nos interesa no es su valor absoluto como esta se entiende, sino su variación en el tiempo como veremos más adelante.

Para el presente trabajo hemos calculado $A = A_{10}$, la cual define el número de terremotos de magnitud $K = 10 \pm 0,5$ ($M_0 = 3,3 \pm 0,3$). De acuerdo con la figura 6, tomamos a $M_0 = 3,5$. Este valor ha sido escogido, puesto que al se-

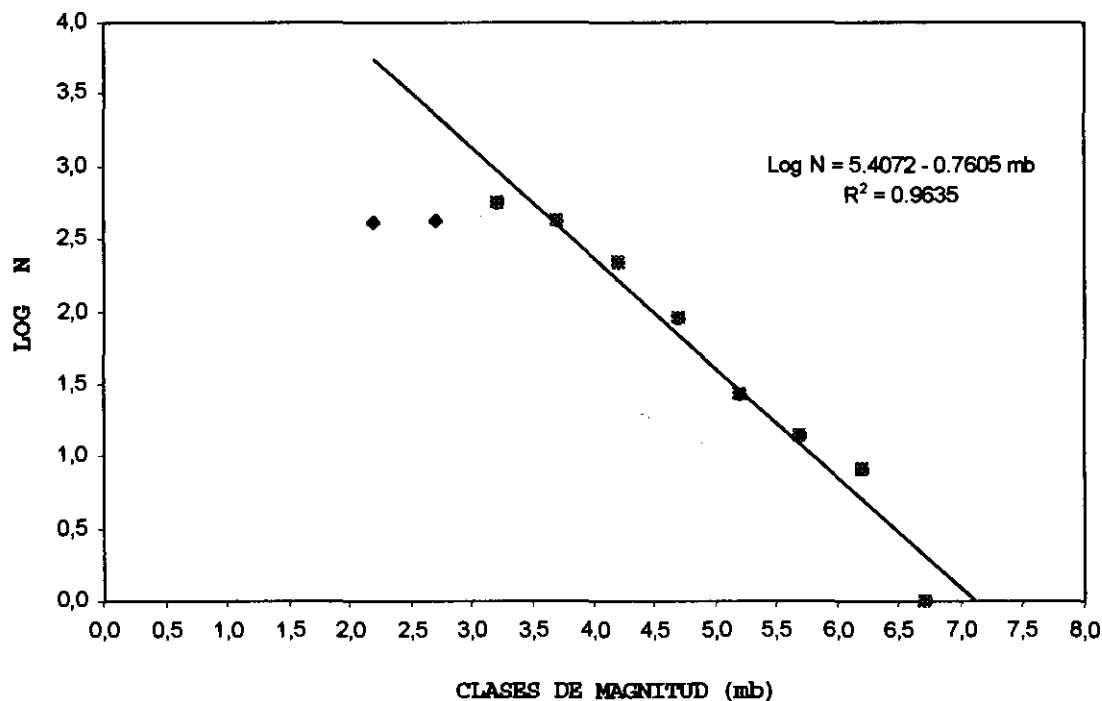


Figura 6. Frecuencia de ocurrencia de sismos. Sismicidad entre 1900 y 1995. La línea de regresión se obtuvo por el método de mínimos cuadrados.

leccionar las clases de magnitud para la elaboración del gráfico de frecuencia de ocurrencia de terremotos en la región, obtenemos un valor mínimo de clase de magnitud igual a 3,2, el cual abarca el rango de magnitudes entre 3,0 y 3,4. Pero, utilizando la fórmula (3) vemos que, para esta clase de magnitud, el intervalo de magnitudes escogido puede extenderse hasta el valor de 3,5. Al mismo tiempo, este valor corresponde al umbral mínimo de detección de terremotos encontrado para todo el territorio colombiano (Salcedo et al. 1994a, b).

4. Variación de los parámetros b y A_{10} como precursor de terremotos

La relación entre los parámetros del régimen sísmico y el proceso de ocurrencia de un terremoto fuerte ha sido destacada en muchos trabajos experimentales y teóricos. Entre los teóricos es importante destacar las investigaciones de Kuznetzova (1976, 1984), donde muestra el proceso de ocurrencia de un próximo terremoto y se examina la relación entre las diferentes etapas de este proce-

so y el carácter de variación en el tiempo de los índices del régimen sísmico (pendiente del gráfico de frecuencia de ocurrencia de terremotos - parámetro b y actividad sísmica - A). Esta relación dada originalmente por Kormakov y Simonova (1990) se presenta en la tabla 1.

Es necesario anotar, que este esquema de ocurrencia de un terremoto fuerte no contradice los modelos que se tienen acerca del foco sísmico, tales como: por dilatación, basada en la saturación de agua en las grietas de las rocas; por movimientos de rocas inestables debido a la formación de rupturas, que terminan en una concentración de grietas en una zona estrecha y por grandes fallas activas y, también, por otros modelos muy cercanos a los dos primeros.

Partiendo de las consideraciones teóricas anotadas en la tabla anterior, hacemos el pronóstico retrospectivo en el tiempo de algunos fuertes terremotos ocurridos en la región central del territorio colombiano. En este sentido, se analiza la variación en el tiempo de los indicadores del régimen sísmico en la zona: pendiente del gráfico de frecuencia de ocurrencia de terremotos (b) y la actividad

sísmica (A). Estos parámetros fueron calculados para el período entre 1900 y 1995. El crecimiento de la distribución magnitud - frecuencia de ocurrencia de los terremotos se obtuvo por la fórmula (2). Los datos utilizados se tomaron de los catálogos mencionados en las secciones anteriores.

Dentro de la ventana de tiempo utilizada se calcularon los respectivos parámetros estadísticos; entre ellos, parámetros de regresión, error cuadrático medio, coeficiente de correlación etc., lo cual nos aseguró un control estadístico de los valores. Se probaron varias ventanas de tiempo T , iguales a 0,2 años, 1 año y 10 años.

Finalmente, los cálculos se llevaron a cabo con la ventana de tiempo de 10 años y un paso de cada 2 años. Los intervalos no siempre fueron suficientes como para obtener una buena estadística de eventos; especialmente esta característica prima para los primeros 40 años del período observado. En las figuras 7a y 7b se muestran las curvas del comportamiento en el tiempo de los parámetros b y A_{10} respectivamente para la ventana de tiempo y paso indicados. Con estos tiempos se revelan fuertemente los

rasgos característicos del comportamiento de los gráficos. Las fechas mostradas en la figura 7b corresponden al año en que se presentó un fuerte terremoto en la región; al lado aparece el valor de su magnitud correspondiente.

Veamos cuales son las principales variaciones que se pueden apreciar en estos gráficos:

Podemos notar que después del año 1940, la pendiente del gráfico de frecuencia de ocurrencia (parámetro b) tiene un rápido incremento, al mismo tiempo que aumenta un poco la actividad sísmica; estos incrementos alcanzan su máximo valor en el año 1943 y decrece hasta 1945, fecha a partir de la cual alcanza un valor casi promedio, hasta 1953, respecto al valor hasta ahora presentado. Dentro de este período de valor medio (1943 - 1953) se presentan en la zona algunos sismos moderados, entre los cuales podemos destacar dos con magnitud $M_s = 6,0$ ocurridos en 1950 (tabla 2).

En 1955 nuevamente se presenta un fuerte pico en el parámetro b , disminuyendo luego hasta 1957 para alcanzar un valor medio que permanece por casi 10 años, au-

Tabla 1. Relación entre el proceso de ocurrencia de terremotos fuertes y los índices del régimen sísmico (Kormakov y Simonova, 1990).

Etapas de ocurrencia del terremoto	Pendiente del gráfico de frecuencia de ocurrencia (Parámetro b)	Actividad Sísmica (A)
Enjambre de terremotos débiles, la cantidad de estos aumenta; ocurre una acumulación de rupturas, pero estas se orientan sin ningún orden, entre ellas mismas impiden su propagación; surge una acumulación de energía.	Crece	Crece
El tamaño de las rupturas crece, el número de estas aumenta y su orientación se establece más ordenada; se origina una "avalancha" de surgimiento y unión de las pequeñas rupturas.	Cae	Continua Creciendo
Calma - Silencio. Se crea una situación que temporalmente dificulta la prolongación de la ruptura; el esfuerzo disminuye a causa de la lenta viscosidad de los desplazamientos en la ruptura (falla); separadamente pueden ocurrir algunos eventos sísmicos lo suficientemente fuertes; la viscosidad del medio aumenta.	Disminuye	Cae
Fuerte terremoto.	Retorna a su valor medio en un período largo	Fuertemente crece

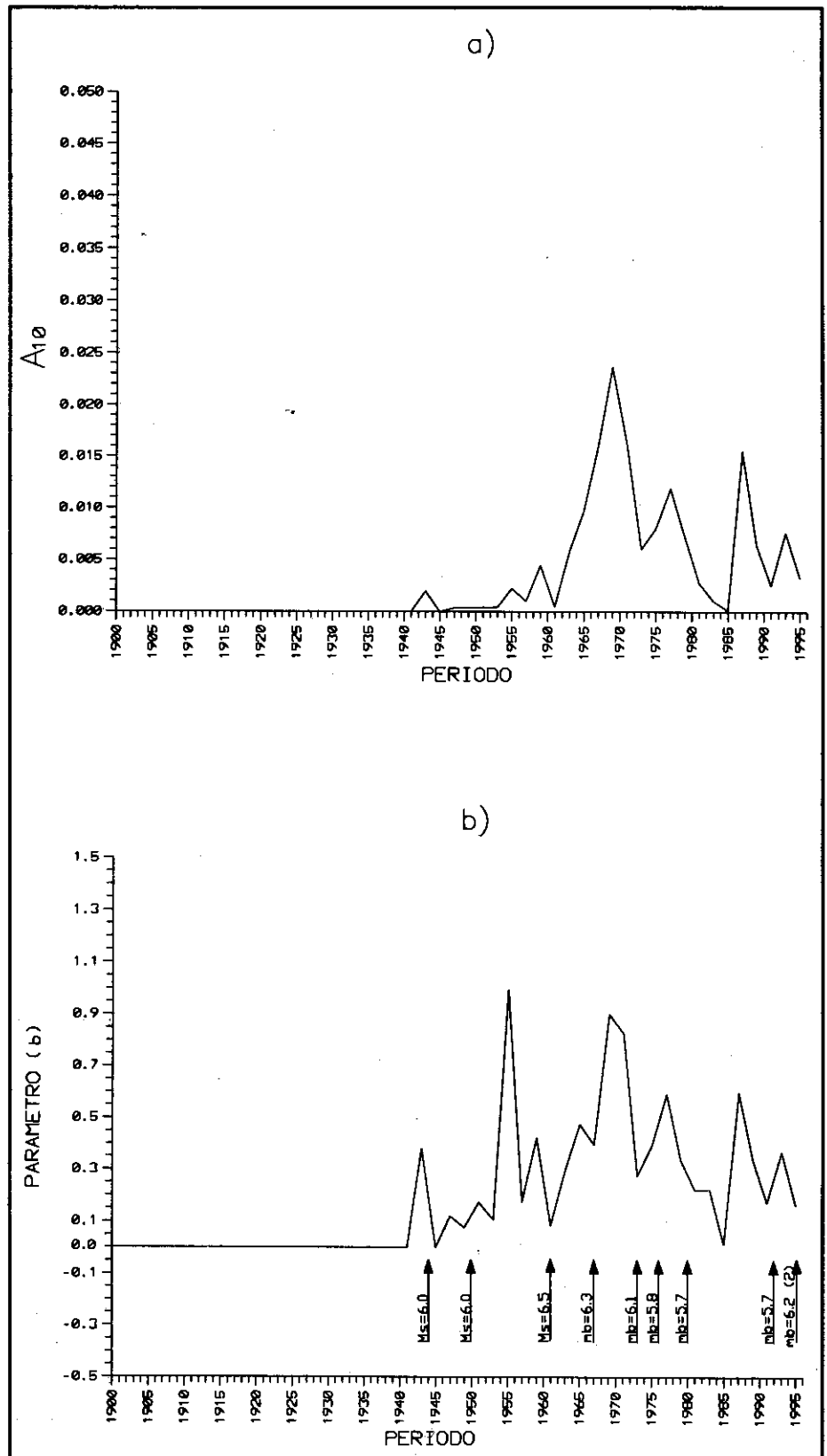


Figura 7. Variación temporal de los parámetros del régimen sísmico: a) actividad sísmica (A_{10}), calculada con ventana de tiempo de 10 años; b) pendiente del gráfico de frecuencia de ocurrencia, parámetro b, calculado con $m_b = 3,5$ como magnitud mínima de detección. Las flechas muestran el año de ocurrencia de los sismos fuertes, indicándose la magnitud correspondiente.

Tabla 2. Terremotos fuertes ($M > 5.5$) ocurridos en la región Central del territorio colombiano en el periodo 1940 - 1990.

FECHA			TIEMPO DE OCURRENCIA	COORDENADAS DEL FOCO			MAGNITUD		
Año	mes	día		$\varphi^{\circ}\text{N}$	$\lambda^{\circ}\text{W}$	Profun. (Km)	m_b	M_s	M_L
1942	5	22	10:30:50.0	4.50	75.00	130	5.8*	5.8	-
1944	5	9	14:29:57.0	2.50	75.50	100	5.9*	6.0	-
1950	4	10	16:48:48.0	4.60	75.40	128	5.9*	6.0	-
1950	7	2	22:49:24.0	4.00	73.50	-	5.9*	6.0	-
1961	12	20	13:25:34.0	4.60	75.60	176	6.3*	6.5	-
1967	2	9	15:24:45.3	2.93	74.83	36	6.3	6.6*	-
1973	4	3	13:54:01.0	4.70	75.67	146	6.1	6.3*	-
1976	5	19	04:07:16.4	4.49	75.76	161	5.8	6.4	-
1980	6	25	12:04:57.1	4.50	75.73	160	5.7	6.0	-
1992	1	2	19:41:46.4	5.70	73.80	146	5.7	5.4	-
1995	1	19	00:05:05.0	5.01	72.96	25	6.2**	6.4**	6.6
1995	8	19	00:43:33.7	5.11	75.71	110	6.2**	6.4**	6.6

* Calculada mediante la fórmula $M_s = 1,51m_b - 2,96$ (ITEC - ISA, 1988).

** Calculada a partir de las fórmulas $m_b = M_L - 0,4$ ($M_L > 5,3$) y $m_b = 1,24 M_L - 2,0$ ($M_L > 5,3$) en sismos localizados por la RSNC (Ingeominas, 1995).

mentando nuevamente a partir de 1967; en este intervalo, donde b tiene un valor medio, se nota que el parámetro A_{10} ha crecido fuertemente hasta alcanzar el máximo valor en el año 1969. Este proceso explica una nueva acumulación de energía y esfuerzos tectónicos en la región, que se disipan con la ocurrencia de dos fuertes terremotos: uno en el año 1961 con magnitud $m_b = 6,3$; y otro en 1967 cuya magnitud es $m_b = 6,3$ (tabla 2).

En el año 1969 el parámetro b nuevamente alcanza un máximo, y a partir de aquí decae a un valor promedio en 1973; en este intervalo, la actividad sísmica también disminuye. Justamente en el año 1973 sucede un fuerte evento sísmico, el cual alcanza una magnitud $m_b = 6,1$. Podemos considerar al intervalo entre 1967 y 1969 como el tiempo precursor de este fuerte evento en la región estudiada.

A partir de 1977 el parámetro b , ha alcanzado un nuevo máximo; luego, este empieza a disminuir hasta 1979,

donde obtiene un valor medio que se prolonga hasta 1983. Aquí sigue disminuyendo para alcanzar un valor mínimo en el año 1985, donde de nuevo rápidamente se incrementa hasta 1987; al mismo tiempo, la actividad sísmica A_{10} cae fuertemente hasta 1985, donde otra vez aumenta hasta un máximo en el año 1987. Este fenómeno genera la ocurrencia de nuevos eventos sísmicos, destacándose entre ellos uno en 1980 de $m_b = 5,7$.

Desde 1987, ambos parámetros, b y A_{10} disminuyen fuertemente hasta 1990. A partir de aquí b crece hasta alcanzar un valor medio, mientras que A_{10} ha aumentado fuertemente en 1993. Después de esta marcada variación en ambos parámetros, ocurrió un terremoto en 1992 que alcanzó una magnitud de $m_b = 5,7$; luego, en 1995 tiene lugar la ocurrencia de otros dos eventos fuertes con magnitud de $m_b = 6,2$ cada uno, causando grandes efectos destructivos.

Entre 1990 y 1995, se detecta que el parámetro b alcanza un valor promedio respecto al comportamiento general de la curva y notamos al mismo tiempo un aumento de la actividad sísmica, obteniendo un máximo en 1993. Este hecho, de acuerdo con la tabla 1, podemos tomarlo como un indicio para haber precedido la ocurrencia del terremoto fuerte ocurrido el día 19 de enero de 1995, o la otra secuencia de sismos fuertes ocurrida durante el mismo año dentro de la región estudiada.

5. Relación tiempo precursor y magnitud

En la tabla 3, se muestra una dependencia de los tiempos precursores para cada uno de los eventos fuertes considerados, y en la figura 8 se da su dependencia con la magnitud de los terremotos asociados, usando el método de los mínimos cuadrados obtenemos la regresión lineal que se expresa como:

$$\log_{10} T = 0,48M - 0,70; R^2 = 0,53$$

la cual también es mostrada en la figura 8.

Es interesante notar que esta ecuación genera períodos de recurrencia relativamente cortos para magnitudes

mayores de 6.0; esto puede explicarse por el hecho de que para el estudio hemos tomado una ventana espacial demasiado grande, la cual encierra diversas fuentes y zonas sismogénicas, que dentro del contexto geodinámico regional pueden activarse en tiempos paralelos o muy cortos para generar terremotos fuertes. Como ejemplo de este hecho podemos mencionar los últimos dos sismos ocurridos en 1995 (tabla 2), los cuales con magnitud $m_b = 6,2$ tuvieron lugar en diferentes zonas sismogénicas, pero la diferencia en tiempo de ocurrencia fue tan solo de siete meses.

6. Discusión

Como lo muestra la tabla 1, la variación de los parámetros b y A_{10} del régimen sísmico en una región dada no debe observarse como una dispersión natural, sino como la relación premonitoria a la ocurrencia de fuertes terremotos.

De esta manera, vemos que el proceso de ocurrencia de un fuerte terremoto, está muy fuertemente ligado con el incremento de la pendiente del gráfico de frecuencia de ocurrencia de terremotos y que después de esto, este parámetro es lo suficientemente pequeño, mirada su variación en el tiempo; la actividad sísmica aumenta fuerte-

Tabla 3. Total de tiempos precursores, tomados a partir de las variaciones de los parámetros b y A_{10} que disparan la ocurrencia del terremoto.

FECHA			COORDENADAS DEL FOCO		MAGNITUD	TIEMPO PRECURSOR
Año	mes	día	$\varphi^\circ N$	$\lambda^\circ W$	m_b	Años
1950	4	10	4.60	75.40	5.9*	5,3
1950	7	2	4.00	73.50	5.9*	5,6
1961	12	20	4.60	75.60	6.3*	5
1967	2	9	2.93	74.83	6.3	10
1973	4	3	4.70	75.67	6.1	4,3
1976	5	19	4.49	75.76	5.8	7,4
1980	6	25	4.50	75.73	5.7	3,5
1992	1	2	5.70	73.80	5.7	2,7
1995	1	19	5.01	72.96	6.2**	5,1
1995	8	19	5.11	75.71	6.2**	5,7

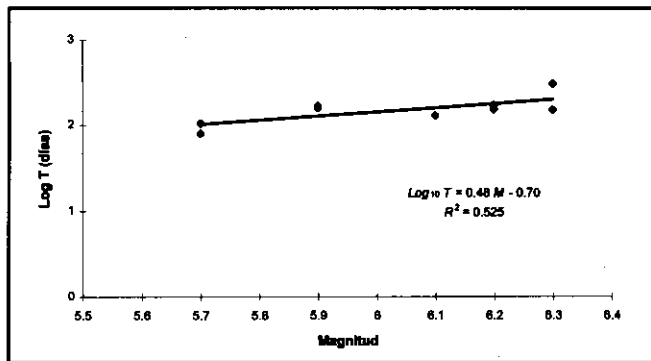


Figura 8. Logaritmo del tiempo precursor en días como una función de la magnitud, para los sismos de la tabla 3.

mente, hecho que está relacionado con la actividad producida por el gran número de réplicas generadas por un fuerte evento sísmico.

Cabe subrayar, que un buen control estadístico en el cálculo de estos parámetros permitiría realizar pronósticos de un fuerte terremoto, solo que debemos tener adicionalmente una gran cantidad de elementos necesarios para esta tarea, pues como hemos visto, hay una gran incertidumbre en el tiempo en que puede ocurrir el fuerte evento después que se cumplan las etapas de variaciones de los parámetros que indica la tabla 1.

Por otra parte, debemos anotar que la tabla 1 puede ser ampliada teniendo en cuenta otros parámetros sismológicos. Puede ser también observada, simultáneamente, la variación de la relación de las ondas sísmicas, parámetros de la deformación sismotectónica, características de las ondas sísmicas, etc.

Puede ocurrir que en ocasiones no sean tan claras las variaciones de los dos parámetros considerados, lo que puede tener explicación en la calidad de los datos analizados, es decir, que el catálogo de sismos utilizado para el análisis no sea completo y totalmente depurado. Esto implica realizar un estudio para completarlo por medio de relaciones estadísticas, que son los métodos más utilizados.

Queremos dejar en claro que, para el presente trabajo hemos realizado nuestro análisis con los datos originales tomados de los catálogos arriba mencionados, sin haber realizado previo estudio de complementación. Además de esto, es necesario realizar estudio sistemático para las réplicas que figuran en los catálogos; lo que tradicionalmente se ha hecho en Colombia al respecto es el reconocimiento por métodos elementales de ventanas de tiempo y espacio.

7. Conclusión

A pesar de que en nuestro análisis hemos utilizado los datos naturales del catálogo, sin realizar un previo estudio estadístico de complementación de la muestra, hemos mostrado que la variación de los parámetros b y A_{10} está relacionada con la ocurrencia de fuertes terremotos. Esta variación es en el sentido que lo muestra la tabla 1, en la cual se interpreta la ocurrencia de sismos fuertes como un proceso que tiene que ver con incrementos y decrementos periódicos de los dos parámetros, que si son bien analizados, se muestran como hechos premonitorios para el terremoto.

En este trabajo vemos que, generalmente antes del terremoto, el parámetro b al ir disminuyendo ha alcanzado un valor promedio; junto con esto, el parámetro A_{10} ha caído fuertemente. Estos niveles presentados muestran un período de calma, que generalmente, como se ha visto en muchas regiones del mundo, preceden la ocurrencia de un fuerte sismo.

Ha sido muy difícil aquí deducir una ley de tiempo precursor, acorde con las periodicidad de los sismos mostrados en las tablas: esto demuestra que este tipo de análisis debe realizarse en una región que no involucre zonas sismogénicas con características diferentes, puesto que tomadas en común pueden activarse en tiempos paralelos y en períodos de tiempos muy cortos.

También, estamos seguros de que se lograría una mayor exactitud y facilidad para deducir la ley de tiempo precursor teniendo un catálogo completo, el cual se puede obtener mediante la creación de una base de datos artificial usando métodos estadísticos.

Agradecimientos

Este trabajo se elaboró dentro del proyecto "Sismotectónica del Territorio Colombiano", identificado con el código P92F01, en el INGEOMINAS (Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química), a cuya directiva expresamos nuestro más sincero agradecimiento por el apoyo institucional que nos brindan al hacer posible este tipo de investigación. Expresamos también nuestro reconocimiento al personal técnico de la RSN, quien nos proporcionó parte de los datos utilizados.

Bibliografía

Bune V. I. & G. P. Gorshkov, (Editores), 1980. *Zonificación Sísmica del Territorio de la URSS*. Moscú. 307 p. (en Ruso).

- Escallón J., J. E. Pinzón & I. C. Gómez**, 1993. Proyecto Sismotectónica de Colombia. Actualización de la información sísmica de Colombia. *INGEOMINAS*, 93p.
- Escallón J.**, 1995. Propuesta para la instalación de una estación remota de la Red Sismológica Nacional y de 14 acelerógrafos digitales en la zona de influencia de los proyectos de Empresas Públicas de Medellín en el Departamento de Antioquia. *INGEOMINAS*.
- INGEOMINAS**, 1995. *Estudios Sismológicos, Subproyecto No. 5, Sismicidad Instrumental*. En: Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. 41p. (inédito)
- IITEC Ltda., Ingenieros Consultores**, 1988. *Actualización de la información sísmica de Colombia*, Interconexión Eléctrica S.A. ISA.
- Kormakov N. P. & I. A. Simonova**, 1990. *Análisis de la ocurrencia del terremoto de agosto 31 de 1986 basado en datos de los parámetros del régimen sísmico*. En: El terremoto de los Cárpatos de 1986. Kishiniev, p. 15-17 (en Ruso).
- Kuznetzova K. I.**, 1976. *Esquema de distribución de rupturas en el medio heterogéneo y modelo estadístico del régimen sísmico*. En: Investigaciones de la física de los terremotos. Nauka, p. 114-126 (en Ruso).
- _____, 1984. *Solidez y flujo sísmico de la masa rocosa*. En: Métodos de valoración del peligro sísmico. Kishiniev, p. 80-87. (en Ruso).
- Ogata Y., & Katsura K.**, 1993. Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude-frequency distribution inferred from earthquakes catalogues, *Geophys. J. Int.*, 113, 727-738.
- París G. & J. Romero**, Fallas activas en Colombia, *Boletín Geológico Ingeominas*, Vol. 34 (2-3), p.3-25.
- Ramírez J. E.**, 1975. *Historia de los Terremotos en Colombia*, Bogotá, 250p.
- Rautian T. G.**, 1960. Energía de los terremotos. En: *Método detallado de estudio de sismicidad*. Obras del Inst. de Física de la Tierra de la Academia de Ciencias de la URSS, No. 9, 176p. (en Ruso).
- Rikitake T.**, 1975. Earthquake precursors, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, p. 1133-1162.
- Risnichenko Yu. V.**, 1964. Método sumatorio de terremotos para el estudio de la actividad sísmica. *Izvestia Acad. de Ciencias de la URSS. Serie Geofizika*, No. 7, p. 969-977. (en Ruso).
- _____, 1965. Acerca del proceso sísmico en la masa rocosa. En: *Dinámica de la corteza terrestre*. Moscú, Nauka. p. 56-63. (en Ruso).
- Risnichenko Yu. V.**, 1985. *Problemas de la Sismología*. Obras Escogidas. Nauka, 408p. (en Ruso).
- Salcedo E., G. París, A. Espinosa, J. Escallón, J. Romero, J. Pinzón, C. Rivera, A. Gómez & I. Gómez**, 1994a. "Sismotectónica del Territorio Colombiano". *Informe interno INGEOMINAS*, Bogotá. 48p.
- _____, 1994b. "Particularidades del Proceso Sísmico en el Territorio Colombiano". (Resumen). *XI Seminario Internacional sobre el Pronóstico de Terremotos. Septiembre 19 - 23, San José de Costa Rica*.
- Smith W. D.**, 1981. The *b*-value as an earthquake precursor, *Nature*, 29, p. 136-139.
- Suyehiro S.**, 1966. Difference between aftershocks and foreshocks in the relationship of magnitude to frequency of occurrence for the great Chilean earthquake of 1960, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 56, 185-200.
- Vinogradov S. D.**, 1964. Investigaciones acústicas de los procesos de ruptura de las rocas. Moscú, Nauca, 84p. (en Ruso).
- Zajarova A. Y.**, 1972. Cálculo de los parámetros del régimen sísmico en IBM. Tashkent. 143 p. (en Ruso).