

b) La información histórica del Catálogo de Terremotos para América del Sur-Colombia, Proyecto SISRA I, se ha actualizado con información de los estudios recientes de Espinosa (1993) e INGEOMINAS (1995), a la cual se le ha dado preferencia sobre los registros previos, pues se trata de estudios más detallados.

c) Del Catálogo del Observatorio Sismológico del Sur-occidente Colombiano (OSSO) de la Universidad del Valle se hizo una selección inicial de los eventos con magnitud de duración mayor o igual que 4.0, ubicados en la zona cubierta por esa red o cercanos a sus límites ($-79^{\circ} 0' \leq \text{longitud} \leq -73.5^{\circ}$; $1^{\circ} 0' \leq \text{latitud} \leq 6.0^{\circ}$). Después de hacer una equivalencia a magnitudes M_s , se seleccionaron los eventos de acuerdo con el mismo criterio que el numeral a).

d) De los eventos reportados por los catálogos internacionales, en general se han preferido las soluciones del ISC, excepto cuando otra solución aportaba mejores datos, como número de estaciones o magnitud. Los eventos que no tenían reportada magnitud en ninguna fuente no se han incluido.

e) De los Eventos reportados por el catálogo de la Red Sismológica Nacional se han seleccionado aquellos con magnitud M_s mayor o igual que 4.0.

En general, para todos los eventos del catálogo se calculó la magnitud M_s . Para los eventos que no la reportaban originalmente, ésta se ha calculado a partir de la magnitud m_b . En los casos en los cuales la magnitud m_b no había sido reportada por la fuente, se obtuvieron relaciones entre la magnitud reportada y m_b .

Los eventos seleccionados se presentan en la Figura 1.11.

1.2.2.2 Tasas de ocurrencia esperadas para Colombia

A partir de los resultados anteriores se creó una muestra artificial, o subcatálogo, que sólo incluyó los eventos ocurridos en el periodo de tiempo para el cual una determinada magnitud aparece completamente reportada. Las tasas de ocurrencia para este subcatálogo corresponden a las de la tabla 1.5, en ella se resumen los periodos de observación "completos" para cada rango de magnitud y las respectivas tasas de ocurrencia esperadas. Los valores de las tasas de ocurrencia contra los de magnitud se muestran en la Figura 1.12.

Vale la pena resaltar que los periodos de completitud y las tasas de ocurrencia encontrados, son válidos a nivel regional. Pero, es de esperarse que a medida que se reduzca el área geográfica disminuya la velocidad a la cual los datos son adquiridos. Por consiguiente se necesitan periodos de observación más largos para obtener un

RANGO MAGNITUD	PERÍODO "COMPLETO"	TASA OCURRENCIA ESPERADA (N/AÑO)
2.5	5 a 15	68.17
3.0	5 a 25	41.69
3.5	5 a 25	26.13
4.0	15 a 45	11.14
4.5	15 a 45	4.38
5.0	25 a 65	2.61
5.5	25 a 85	1.53
6.0	25 a 85	1.12
6.5	25 a 95	0.67
7.0	25 a 95	0.24
7.5	200	0.041
8.0	?	0.002

TABLA 1.5 PERÍODOS "COMPLETOS" PARA CADA RANGO DE MAGNITUD Y TASAS DE OCURRENCIA ESPERADAS EN ESTOS PERÍODOS.

muestreo adecuado de un determinado rango de magnitud para un área comparativamente más pequeña.

Los datos sísmicos empleados en el informe hacen parte del catálogo sísmico nacional que ha sido revisado intensamente por varios investigadores, recientemente fue objeto de un estudio de completitud que lo ha llevado a una depuración máxima con un total de 4516 eventos hasta finales de 1995.

No obstante, el catálogo sísmico nacional es de características deficientes y la posición de los focos sísmicos adolece de grandes restricciones que conducen a enfoques particulares para la caracterización de las fuentes sísmicas. La particularidad da origen a los denominados corredores de influencia de cada fuente sismogénica para encontrar los sismos que se supone fueron la consecuencia de rupturas en las fuentes.

1.3 AMENAZA SÍSMICA REGIONAL

En el área de influencia sísmica de Santafé de Bogotá, con 200 km de radio, se tiene noticia de 396 sismos incluyendo todas las magnitudes. Si se tiene en cuenta el registro a partir de 1957 el número total de sismos registrados en el área es de 245 de los cuales 120 tienen magnitud $M_s > 3$. Más adelante se presenta la posible asignación de la población sísmica a las diferentes fuentes.

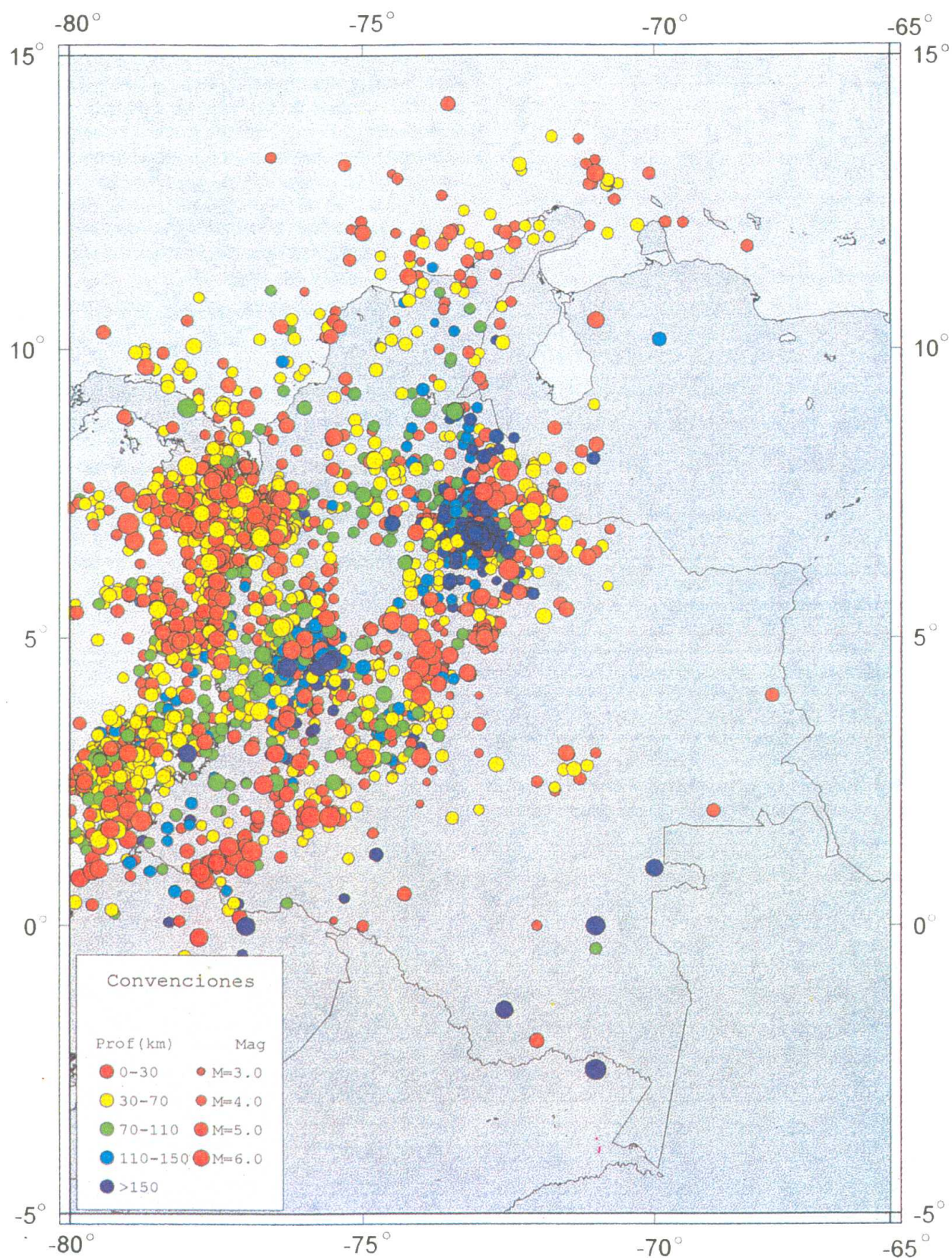


FIGURA 1.11 EVENTOS SELECCIONADOS PARA LA CONFORMACIÓN DEL CATÁLOGO

LINEA DE AJUSTE $\text{Log}(N/\text{año}) = 3.39 - 0.59 M_s$

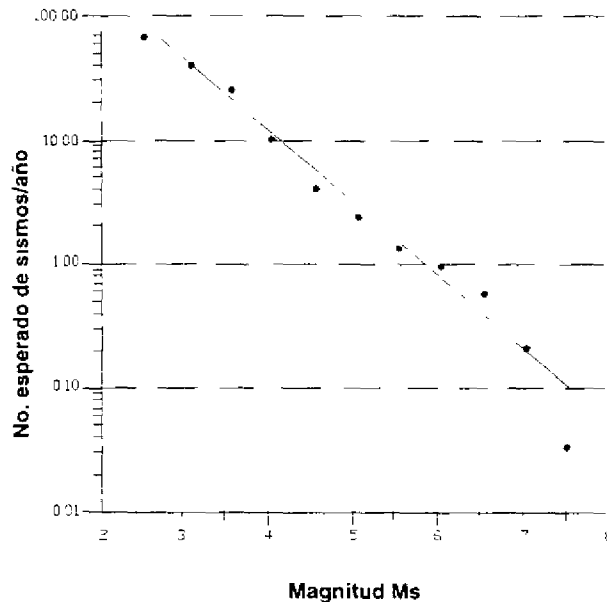


FIGURA 1.12 NÚMERO ESPERADO DE SISMOS POR AÑO PARA LOS PERÍODOS DE REPORTE COMPLETO

sismogénicas que se han identificado en la zona central del territorio nacional.

Disponiendo de la caracterización de la actividad sísmica para las diferentes fuentes sismogénicas identificadas fué posible la evaluación probabilística de parámetros para análisis sísmicos en el sitio de interés. Estos parámetros deben ser modificados para tener en cuenta los efectos locales.

1.3.1 Aspectos sismo-tectónicos de la amenaza sísmica de la ciudad de Santafé de Bogotá

1.3.1.1 Ocurrencia de sismos en la región

En la Figura 1.13 se aprecian algunos focos de los sismos registrados en Colombia. Las trazas de las 32 fallas activas (o posiblemente activas) principales se han dibujado en colores y los eventos sísmicos asignados a su actividad llevan el mismo color que la traza idealizada. Sobre la distribución espacial se ven concentraciones de epicentros en el límite con Panamá, en la Costa del Pacífico, en el Antiguo Caldas y en el Nido de Bucaramanga. Esta figura muestra que los sismos han tenido en los últimos quinientos años una distribución no uniforme dentro del territorio andino nacional.

1. Arco de Dabeiba
2. Bahía Solano
3. Benioff Intermedia
4. Benioff Profunda
5. Bocono
6. Bolivar
7. Bucaramanga- Sta. Marta Norte
8. Bucaramanga- Sta. Marta Sur
9. Cauca
10. Cimitarra
11. Comprensión Sur Caribe Este
12. Comprensión Sur Caribe Oeste
13. Cuiza
14. Espintu Santo
15. Fallas del Magdalena
16. Falla de la Cordillera Oriental
17. Garrapatas
18. Ibagué
19. Junín Sanbiambi
20. Murindó Atrato
21. Normal Panamá Pacífico
22. Oca
23. Palestina
24. Parijá
25. Puerto Rondón
26. Romeral
27. Romeral Norte
28. Salinas
29. Sinú
30. Suárez
31. Subducción
32. Uribante Caparo

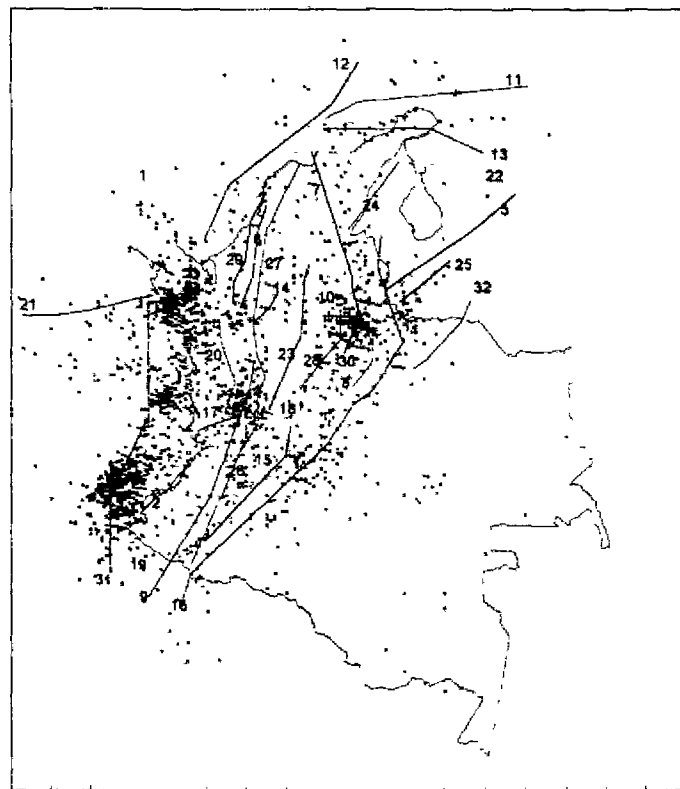


FIGURA 1.13 FOCOS DE LOS SISMOS PARA EL TERRITORIO COLOMBIANO Y TRAZAS IDEALIZADAS DE LAS FALLAS

La ocurrencia de los sismos en el territorio nacional está asociada a uno de los tres procesos siguientes: rupturas en las zonas de subducción, ruptura de la placa subducida que conforma la llamada zona de Benioff y ruptura en alguna falla de las ya mencionadas, o alguna desconocida en la actualidad

Los sismos que ocurren en la zona de subducción y en las fallas geológicas tienen profundidades focales menores a 60 km (aunque en este estudio tal es el valor máximo estimado debido a los fuertes errores en la profundidad focal) mientras que aquellas que ocurren en la zona de Benioff de la placa subducida pueden llegar a tener focos con profundidades que oscilan entre unos 40 km en la parte más occidental y tal vez un máximo del orden de 600 km en la parte más oriental de la planicie inclinada de Benioff. La variación de la profundidad focal en la zona de Benioff, de Occidente a Oriente, se aprecia en las Figuras 1.14 y 1.15 (Costa, 1990)

Al norte del territorio colombiano la sismicidad no solamente es más escasa sino que en promedio los sismos ocurren con magnitudes menores. La razón de este comportamiento es apenas parcialmente entendida. Una hipótesis es que la placa subducida termina a unos 7.5° N; por otra parte, la placa Caribe parece unirse con la

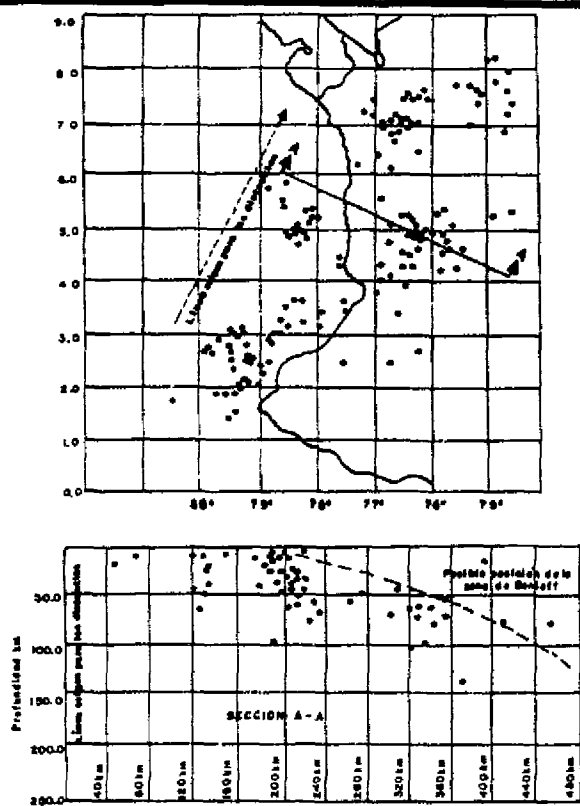


FIGURA 1.14 VARIACION DE LA PROFUNDIDAD FOCAL EN LA ZONA DE BENIOFF (SECCION A)

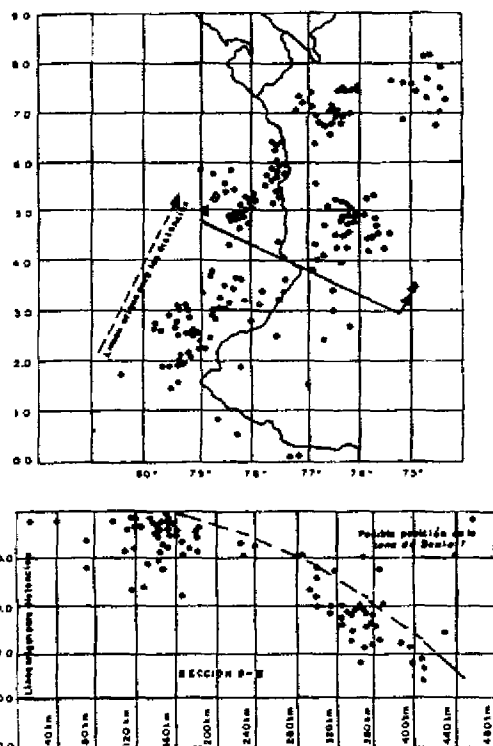


FIGURA 1.15 VARIACION DE LA PROFUNDIDAD FOCAL EN LA ZONA DE BENIOFF (SECCION B)

Sur América dentro del territorio nacional desde los 7.5° N hasta los 9° ó 9.5° N, en un tipo de unión difuso que promueve la fracturación de las placas en bloques relativamente pequeños; en esta forma la liberación de la energía se realizaría en una forma menos concentrada; además existe la posibilidad que se libere energía en forma de flujo plástico generando una sismicidad imperceptible. Todo esto es hipotético.

Otros autores (Pennington, 1981) postulan que la placa Caribe limita con la Sur América a lo largo de la falla Boconó en Venezuela, en el territorio colombiano el límite seguiría por la falla Frontal de la Cordillera Oriental y llegaría hasta el Golfo de Guayaquil. Esta hipótesis la respalda con la ocurrencia de sismos de alta magnitud a lo largo de algunos tramos de la falla Frontal, con los mecanismos focales estudiados y con otra serie de consideraciones de orden morfológico y sismológico.

Resulta razonable considerar que las fallas con rumbo sensiblemente norte-sur que abundan en Colombia pueden producir sismos de mayor magnitud en el centro y sur del país que al norte de éste. Debe exceptuarse la falla Frontal de la Cordillera Oriental que conforma una estructura que puede representar una amenaza sísmica significativa, ya sea que haga parte de un límite de placa o que sea una falla geológica intraplaca.

1.3.1.2 Fallamientos activos en el centro de Colombia

En la Figura 1.16 se aprecian las fuentes sismogénicas empleadas en la actualización de la normativa sismo resistente y los sismos asignados correspondientes, los cuales pertenecen al catálogo de 4516 eventos. Las ocho fuentes que se aprecian en la figura son: Bucaramanga - Santa Marta, Magdalena, Cordillera Oriental, Ibagué, Palestina, Romeral, Salinas y Suárez. En la figura 1.17 se aprecian los sismos no asignados a ninguna de las ocho fuentes que se consignan en la figura

La información empleada por el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (Presidencia de la República, 1984) y su actualización no publicada en la actualidad (AIS, 1996), se ha integrado de una gran cantidad de estudios geológicos y algunos neotectónicos adelantados en Colombia a lo largo de años de trabajos sobre el tema, desarrollados con motivo de las actividades normales de INGEOMINAS, de la exploración para la búsqueda de hidrocarburos y principalmente de los estudios para grandes proyectos de ingeniería civil como carreteras y centrales hidro y termo eléctricas

Además se debe mencionar la Zona de Benioff que se subdivide en dos partes: Benioff Intermedia y Benioff Profunda. La zona de Benioff se idealiza como la placa

marina (Nazca) subducida debajo del territorio continental de Sur América

Por su parte, el estudio neotectónico (Vergara et al, 1996), agrupa la actividad tectónica del área de influencia en dos grupos de fallas. El primer grupo lo denomina fallas de la región noroccidental, el cual lo conforman las del Valle del Magdalena y de la Cordillera Central. El segundo grupo lo denomina fuentes de la región suroriental y lo conforman esencialmente fallamientos del ambiente de la Cordillera Oriental.

Los fallamientos de la región noroccidental son los siguientes. Romeral, Palestina, Chapetón-Pericos, Cucuana-Rio Bogotá, Ibagué, Vianí, Samaria - La Colorada, Magdalena y Noroeste.

En la región suroriental el estudio de neotectónica (Vergara et al, 1996), ha identificado los siguientes fallamientos: Servitá-Santa María, Guaicáramo, Yopal y fallamiento Zona Axial (F. Boyacá, F. San Francisco, F. Soapaga)

Con el fin de simplificar un poco el modelo sismogénico que permite evaluar la aceleración local máxima probable fué necesario hacer algunas agrupaciones de fallamientos muy cercanos entre sí. Esto con el objeto de manejar un criterio razonable dentro de la evalua-

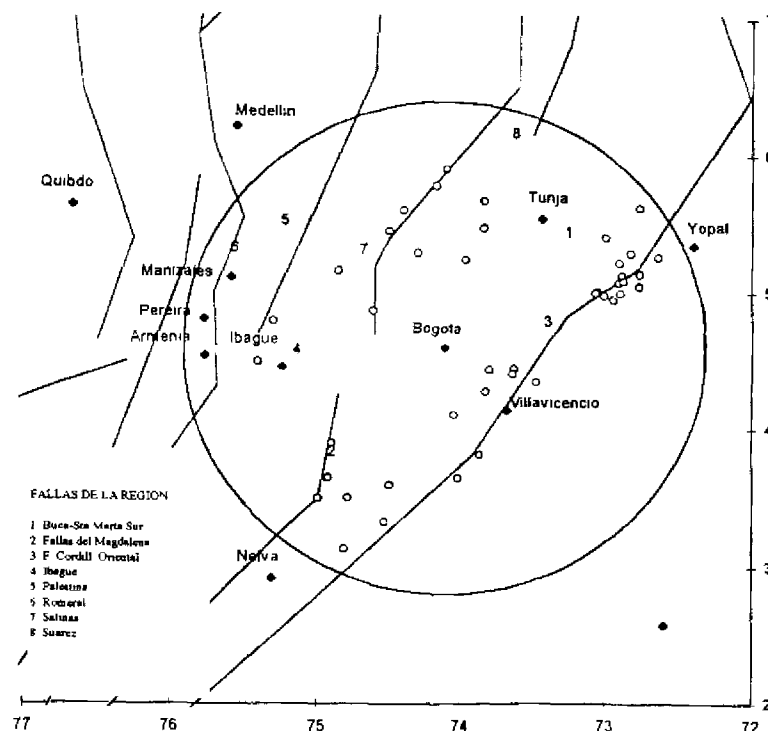


FIGURA 1.16 SISMOS ASIGNADOS PARA BOGOTÁ R=200 KM

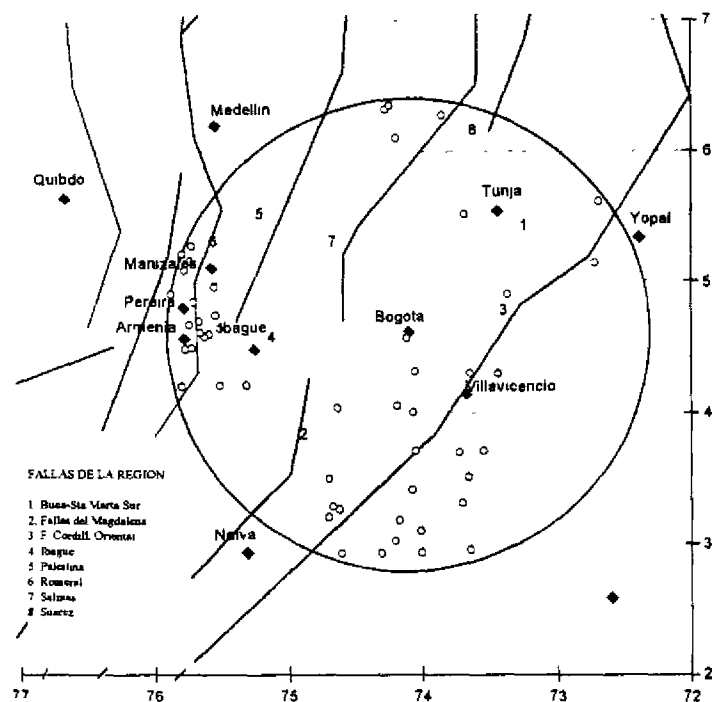


FIGURA 1.17 SISMOS NO ASIGNADOS PARA BOGOTÁ R=200 KM

ción de la amenaza sísmica local, modelación dentro de la cual dos parámetros básicos son la frecuencia media de ocurrencia y la magnitud última M_u .

La simplificación del modelo a partir de las fallas del estudio neotectónico (Vergara et al, 1996), conduce a las fuentes sismogénicas siguientes Romeral, Palestina, Chapetón, Mulatos, Trigo-Bituima, Viani, Ibagué, Cucuana-Rio Bogotá, Cambao-Cambras, El Chocho, Servitá-Santa María, Guacáramo, Yopal, Soapaga

1.3.1.3 Aspectos generales sobre la sismicidad

Puede encontrarse una clara correlación entre el número de sismos N , que ha igualado o superado una magnitud M en una fuente sismogénica y la magnitud (Richter, 1958). Richter empleó este concepto usando datos en su investigación que provenían de varias fuentes alrededor del mundo. Gran número de estudios posteriores, hechos ya para diferentes fuentes sismogénicas, han mostrado la validez de este concepto y a menudo se habla de la ley de Richter, la cual se puede expresar así

$$M = A + B \log N \quad \text{Ec. 1.1}$$

En esta expresión, N es el número de sismos que dentro de la muestra estudiada, igualan o superan a una magnitud de referencia M , mientras que A y B son parámetros

ligados a la magnitud máxima a que puede conducir la muestra y a la distribución relativa de las magnitudes de ésta entre grandes y pequeñas. A y B se evalúan por regresión.

El catálogo de 4516 eventos ha sido revisado por INGEOMINAS a la luz de la posible conversión de sus datos que la entidad estima se asemejan a la noción de magnitud M_L y la magnitud M_s . Luego de tal análisis se ha llegado a un factor de conversión que permite pasar de M_L a M_s , que es lo más apropiado para homogenizar la muestra y darle así la mayor consistencia posible. En consecuencia, para el estudio de la amenaza sísmica local se han empleado los valores M_s corregidos por INGEOMINAS de acuerdo con el procedimiento anotado

Con respecto a la ecuación de Richter, la caracterización de los parámetros A y B para cada fuente sismogénica no siempre es posible. A veces el tramo de la fuente cubierto por el área de influencia de interés resulta muy corto y por tanto el número de sismos es muy pequeño. A menudo simplemente no se detecta un sismo dentro del tramo fuente. Otras veces puede resultar que la información disponible no cuente con datos sobre profundidad o que las magnitudes sean muy pequeñas

Sobre la noción de magnitud última creíble, la cual desempeña un papel trascendental en la evaluación de la amenaza sísmica local, puede haber fuertes discrepancias en especial cuando se trata de evaluar dicho parámetro fuera de un contexto regional. En el presente caso se han utilizado conceptos generados a partir del parámetro A de las correlaciones y a partir de las observaciones y recomendaciones neotectónicas y de acuerdo con las condiciones locales y regionales.

1.3.1.4 Análisis de magnitudes

La primera aproximación para el estudio de Amenaza Sísmica local del área urbana de Santafé de Bogotá D.C. consistió en estudiar las fuentes sísmogénicas de la actualización del CSR aplicándoles la información del catálogo depurado que contiene 4516 eventos. La segunda, consistió en formular un modelo a partir de los estudios neotectónicos (INGEOMINAS-Universidad de los Andes, 1996-a) al cual se le aplicó la misma información de catálogo. Como se verá más adelante, los resultados de los dos modelos tienden a ser muy similares.

La Figura 1.18 muestra a título ilustrativo la recurrencia para toda la región, de los sismos no asignados, para la fuente Benioff Intermedia y para la fuente Benioff Profunda. Análisis similares se realizaron para todas las fuentes activas de la región.

De manera análoga se estableció la correlación de las magnitudes de los registros con el número de eventos ocurridos, para el modelo correspondiente al sistema de fallas geológicas del estudio neotectónico pero simplificado a la concepción de fuentes sísmogénicas antes explicado y de acuerdo con la ecuación 1.1.

1.3.2 Aceleración e intensidad local máximas probables

Para completar el estudio de amenaza sísmica para el área urbana de Santafé de Bogotá fue necesario hacer estimativos sobre las aceleraciones e intensidades máximas probables, así como de las probabilidades de ocurrencia de niveles máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento en terreno firme.

La aceleración local máxima probable se evaluó en terreno firme siguiendo procedimientos establecidos en la bibliografía. Para ello se hizo uso del modelo sísmotectónico y las fuentes sísmogénicas que se integran en un modelo que evalúa la aceleración local máxima probable anotada.

La intensidad local máxima probable dominante en el área urbana se evalúa a partir de la aceleración local máxima probable en terreno firme. Este estudio demuestra que existe un importante efecto local producido por el terreno blando y grueso en gran parte del área urbana.

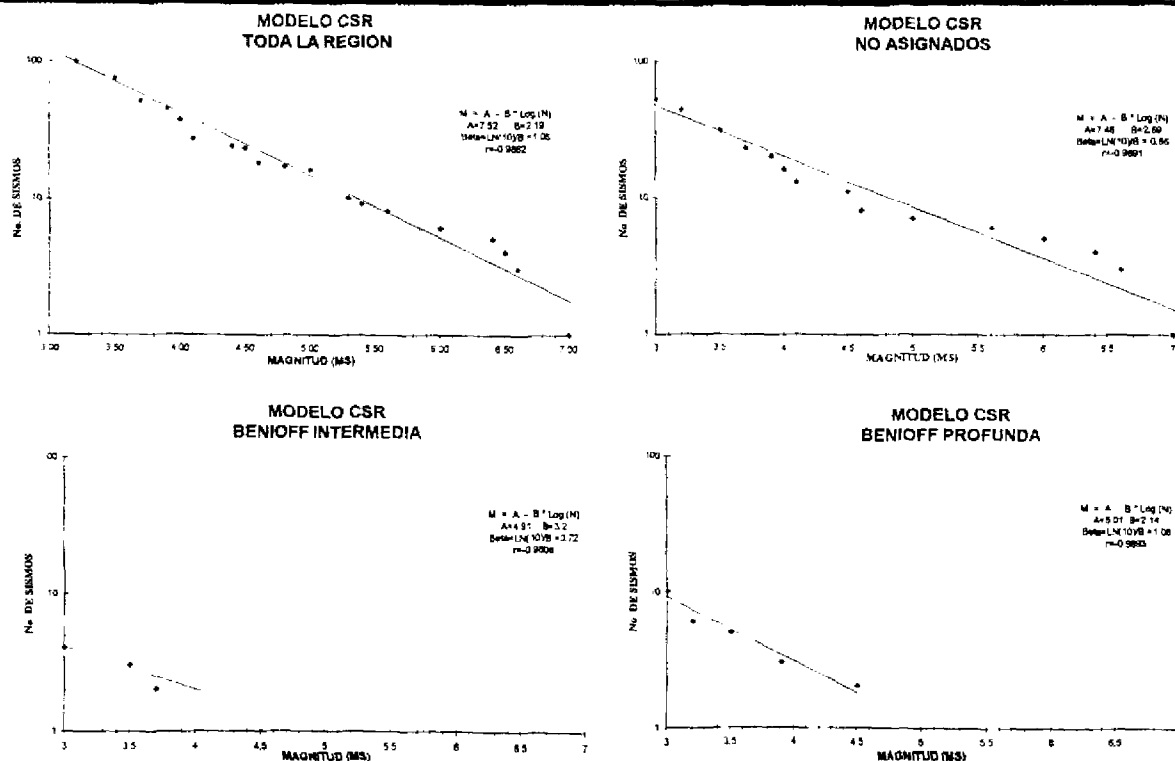


FIGURA 1.18 RECURRENCIA PARA LA REGIÓN ESTUDIADA EN LOS SISMOS NO ASIGNADOS

En consecuencia, la intensidad local máxima probable dominante obtenida a partir de terreno firme se debe incrementar de alguna manera concordante con los efectos de amplificación encontrados durante la investigación.

Las fuentes sismogénicas que involucren una o varias fallas geológicas activas, conforman anchos corredores que para el estudio analítico se deben convertir en abstracciones caracterizadas por un eje hipotético de la traza, su longitud, la frecuencia y profundidad de los eventos asignados a la fuente, la magnitud última que se ha deducido para cada una de las fuentes y la posición y forma de la traza con respecto al área urbana de la capital de Colombia.

Establecidas las características geométricas y físicas del modelo, se introduce la noción de atenuación de las aceleraciones y se producen rupturas ficticias en las diferentes fuentes del modelo. Estas rupturas envían señales hacia el área urbana de Santafé de Bogotá, las cuales se van debilitando.

El modelo integra las señales provenientes de cada una de las fuentes y las adiciona en términos de la probabilidad de que generen determinado nivel de aceleración local; se llega a la aceleración local máxima probable en terreno firme producida como consecuencia de rupturas independientes de las diferentes fuentes sismogénicas que conforman el modelo.

1.3.2.1 Aceleración máxima probable

La aceleración máxima que un sismo futuro puede generar en una localidad determinada, depende de la magnitud del sismo, de la distancia entre el foco y el sitio bajo consideración, de la atenuación con la distancia y de las condiciones locales en el sitio de interés.

La magnitud máxima que puede generarse en una región depende esencialmente del ambiente sismotectónico regional, tal como se ha discutido anteriormente.

La distancia entre el foco del futuro sismo y el sitio de estudio está íntimamente asociada a la posición relativa de las fuentes sismogénicas regionales dentro de la zona de influencia. Por esta razón es necesario el estudio detallado de la sismotectónica regional.

La atenuación depende de dos fenómenos principales, cada uno de los cuales depende a su vez de complejas situaciones que todavía no han podido manejarse analíticamente sino por modelos de una sencillez tal, que su parecido con la realidad es a menudo casi inexistente; los dos fenómenos son los llamados atenuación geométrica y atenuación mecánica.

La atenuación geométrica condiciona la energía intrínseca del estado de esfuerzos que se desplaza ya que se refiere al proceso de dispersión de la energía a medida que se aleja de la fuente. La misma cantidad de energía pasa por áreas cada vez mayores a medida que las ondas viajan.

La atenuación mecánica condiciona el contenido frecuencial del tren ondulatorio puesto que involucra un proceso de fricción intergranular que se origina en la transmisión del estado de esfuerzos.

Ante las formidables dificultades físico-matemáticas que impone el proceso de atenuación, los ingenieros han recurrido a la interpretación semi-empírica de datos de aceleración registrados a diferentes distancias focales para magnitudes conocidas. En esta forma se ha establecido la aceleración a en función de la distancia por la expresión siguiente:

$$a = b_1 e^{b_2 M} (b_3 + R)^{b_4} \quad \text{Ec. 1.2}$$

En la cual

a = aceleración horizontal máxima local en cm/s/s (gals)

b_1, b_2, b_3, b_4 son constantes que se obtienen por regresión

R = distancia epicentral en kilómetros

M = magnitud M_s del sismo

Se ha anotado que en Colombia no se han podido realizar estudios de esta naturaleza porque no existían los acelerógrafos para el registro, aunque en épocas muy recientes comenzó a aparecer una información básica de la RSNC que permitirá en el futuro al menos iniciar estudios sobre el tema. Por esta razón fué necesario hacer uso de las muchas funciones de atenuación desarrolladas por investigadores extranjeros. Las siguientes ecuaciones son las más empleadas en la actualidad y fueron propuestas por Esteva, Donovan y McGuire, respectivamente.

$$a = 1230 e^{0.90M} (R+25)^{-2.00} \quad \text{Ec. 1.3}$$

$$a = 1320 e^{0.58M} (R+25)^{-1.52} \quad \text{Ec. 1.4}$$

$$a = 472 e^{0.64M} (R+25)^{-1.30} \quad \text{Ec. 1.5}$$

En estas expresiones M está en la escala M_s , R en kilómetros y la aceleración horizontal " a " resulta en cm/s/s , evaluada en terreno firme. Cada uno de los autores le establece a su propia función una medida de la dispersión como criterio para cuantificar la incertidumbre asociada al fenómeno. En este estudio se emplean las funciones de atenuación presentadas, aunque debe anotarse que existen muchas más y que cada autor pretende que la suya resulte más apropiada que la de los otros. Conviene anotar aquí que el término $(R+25)$ corresponde a la distancia focal.

En la Figura 1.19, se aprecian gráficas de las ecuaciones 1.3, 1.4 y 1.5, respectivamente, en comparación con la información disponible de eventos recientes en Colombia.

La integración de la sismicidad pasada y la sismotectónica regional se puede lograr mediante cualquier modelo que permita transferir al sitio de interés las aceleraciones que se derivan de sismos regionales que ocurran en el futuro dentro del área de influencia. Para el estudio regional de Colombia se empleó el llamado modelo de la "Línea Fuente" (Der Kiureghian et al, 1975). En este modelo se involucran variables como las magnitudes máxi-

ma y mínima, distancia entre la fuente de actividad sísmica y el sitio de interés, sismicidad media pasada; características de la fuente; distribución de la sismicidad pasada y atenuación de la aceleración. Estas variables se introducen en el modelo geométrico a la vez que se les da un cubrimiento por las incertidumbres asociadas, para luego evaluar la probabilidad de que se iguale o sobrepase determinada aceleración en función de períodos de retorno prefijados.

El modelo de la "Línea Fuente" parte de la independencia física de los eventos, lo cual es aceptable tal como ya se ha analizado en este informe. Este modelo ha sido empleado por varios grupos de ingenieros desde 1.979 en numerosos estudios para obras del desarrollo nacional de Colombia. También es de amplio empleo internacional.

Introducidos los parámetros al modelo Línea Fuente con un cubrimiento por incertidumbre a la función de atenuación del 90% se generan las curvas de aceleración horizontal local máxima probable en terreno firme (para el caso se supone que es la roca base de la cuenca de Santafé de Bogotá).

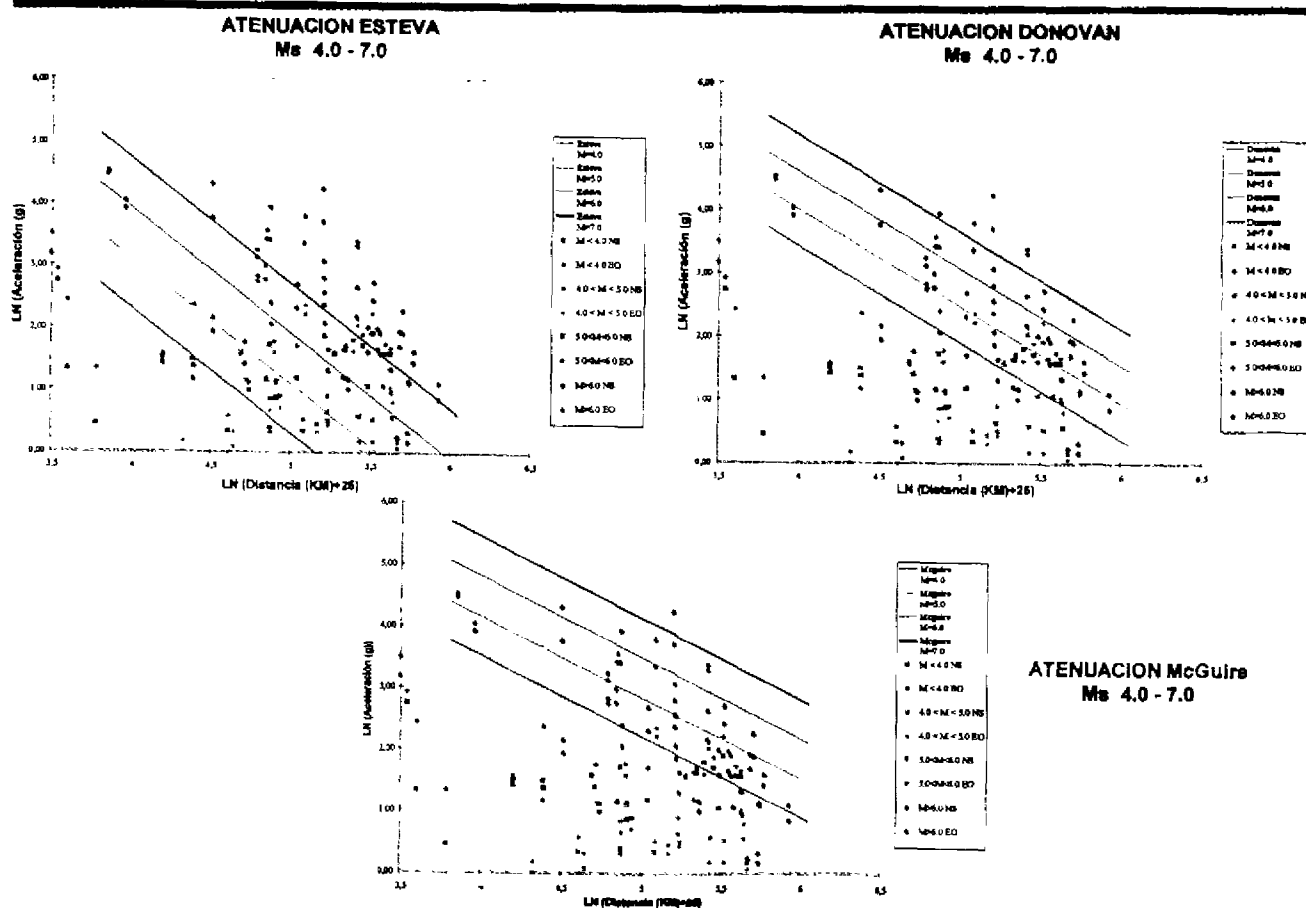


FIGURA 1.19 GRÁFICAS DE ATENUACIÓN DE LA ACCELERACIÓN DADAS POR ESTEVA, DONOVAN Y MCGUIRE