

Riesgo sísmico de Medellín

Por: Gonzalo A. Jiménez Cálada*

Trabajos anteriores (1, 3, 4, 7, 9) han estado dirigidos a la estimación de los espectros elásticos de aceleración, velocidad y desplazamiento para diferentes períodos de retorno y para diferentes factores de amortiguación en varias zonas del país. El presente estudio pretende determinar los parámetros de riesgo sísmico, para la ciudad de Medellín, prescritos en la norma "Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes" (10). Decreto 1400 de 1984.

1. EL MODELO EMPLEADO

El modelo usado (1,4) tiene como objetivo determinar la aceleración y la velocidad máximas esperadas en un sitio, para un determinado período de retorno, en nuestro caso y según recomendaciones del código ATC - 3, este período se tomó de 50 años con una probabilidad de no excedencia del 90%/o. El modelo tiene en cuenta la recurrencia de las magnitudes (ec.1); la longitud de falla, sus magnitudes asociadas y la atenuación del parámetro considerado con la distancia (ec. 2).

$$N = \alpha e^{-\beta M} \quad (1)$$

$$Y = b_1 e^{b_2 (R + b_3)} \cdot b_4$$

La ecuación 1 indica que la frecuencia de ocurrencia N de un sismo es una función exponencial de la magnitud M ; α y β son parámetros locales hallados utilizando ecuaciones de regresión.

La ecuación 2 dice que la magnitud Y de algún parámetro (Y puede ser aceleración, velocidad o desplazamiento del suelo) en el sitio de interés depende de la distancia R de este sitio a la fuente que lo originó. Los parámetros b_1, b_2, b_3, b_4 de la ecuación 2 son deducidos de estudios que compran la magnitud Y en la fuente con la magnitud en el sitio de interés, y se denominan "Funciones de Atenuación".

2. TECTONICA DE LA ZONA DE MEDELLIN

La figura 1 nos muestra que el área está cruzada por numerosas fallas de dirección predominante Norte Sur. Las más importantes son (4):

- Cauca y Romeral, pertenecientes al megacizallamiento Dolores Guayaquil. Son de gran actividad sobre todo en

el viejo Caldas. Para la aplicación del modelo, las fallas Romeral se consideró desde 4.5° Lat. Norte hasta 6.0° Lat. N. y la falla Cauca se consideró hasta 7.0° Lat. Norte.

- Atrato: Dividida en dos partes: Sur y Norte. El criterio separación tuvo en cuenta que desde los 4.5° Lat. N. hasta aproximadamente 6.2°, los eventos asignados con el criterio de cercanía tienen profundidades y magnitudes marcadamente mayores a los asignados desde los 6.2° a los 7.3° Lat. N.
- Baudó: A ella se asignaron los eventos con epicentros desde los 76.9° Long. W. hasta 77.3° Long. W. Esto implica no considerar la falla Bahía Solano, lo cual se justifica porque este mecanismo focal queda dentro del mar, y no ha marcado eventos importantes para el área considerada.
- Arco de Sautatá: Considerada en su parte norte ya que hacia el Sur parece que toda la actividad sísmica es debida a la falla Atrato.
- Sinú: Sin ninguna característica que la haga distinguir su actividad de las fallas Sabanalarga y Atrato Norte, excepto el sismo de septiembre 26 de 1.977, caracterizado por una serie de réplicas que se extendieron hasta diciembre del mismo año.
- Espíritu Santo: Esta falla del sistema Cauca - Romeral, se distingue por la gran actividad que tienen desde Liborina hasta Cáceres.
- Salinas: Recorre gran parte de Cundinamarca, pero los eventos ocurridos en el período de estudio tienen sus epicentros situados entre los 5.5° Lat. N. hasta los 6.5° Lat. N.
- Cimitarra y Otú: Pertenecen al sistema Palestina, al igual que la falla Bagre.

En las figuras 1 - 2 se muestran las fallas mencionadas su longitud y dirección.

3. HISTORIA SISMICA DE LA ZONA

Se elaboró un catálogo de sismos que afectan la zona en estudio, con base en la información disponible en ISA, Instituto Geofísico de los Andes, Asociación de Ingeniería Sísmica (AIS) y las referencias 1, 4, 8, y 9. Este catálogo se trasladó al mapa de la figura 3.

DYNA No. 103 MAYO/84 MEDELLIN

* Profesor Asociado
Universidad Nacional
Facultad de Minas

4. APLICACION DEL MODELO

Con la información descrita en los numerales 2 y 3 se procedió a la aplicación del modelo con las siguientes consideraciones.

Como no se tienen estudios de actividad de fallas que cubran toda la región, sino de partes muy específicas y por parte de entidades que hacen reconocimientos para algún proyecto particular, se optó por simplificar el estudio a la asignación de eventos a fallas consideradas activas en el cuaternario, teniendo en cuenta la vecindad epicentral, y con base en ello determinar la frecuencia de eventos para cada falla, la geometría y su contribución al riesgo sísmico de Medellín.

Las fallas que se tuvieron en cuenta fueron relacionadas en el numeral 2 y que concuerdan con las del mapa elaborado por Ingeominas en 1.979.

Estas fallas fueron dibujadas en un mapa del departamento de Antioquia realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi en 1.981 con escala 1: 500000; se señalaron los eventos sísmicos con magnitud mayor o igual que cuatro, figura 3; luego se procedió a la asignación de sismos a las diferentes fallas siguiendo el criterio de vecindad, se usó un corredor de 60 Kmts. de ancho centrado en la falla. Este procedimiento hizo que finalmente no se tuvieran en cuenta todas las fallas, pues su geometría y ocurrencia podrían crear alguna distorsión en la aplicación del modelo, ya impreciso por su generalidad. Obviamente que todos los eventos se tuvieron en cuenta, asignándolos a las fallas consideradas representativas.

5. RECURRENCIA DE MAGNITUDES Y FUNCIONES DE ATENUACION

Para efecto de determinar los parámetros de la ecuación 1, valores necesarios en todo el modelo, usualmente se trunca la distribución en una magnitud M_0 considerada de efecto despreciable sobre el riesgo. El valor más comúnmente aceptado para truncar es de M_0 igual a 4.0. Para el caso de Colombia algunos especialistas recomiendan valores muy por debajo de 4.0; esta recomendación la basan principalmente en el hecho que siendo la información escasa, tomar un rango de magnitudes más amplio aumenta la población de datos y por tanto aumenta la confiabilidad de los resultados. Aquí se optó por tomar M_0 igual a 4.0, teniendo en cuenta que si la información es pobre se debe a que también lo es nuestra red de sismógrafos y por lo tanto es más fácil que registre todos los eventos de magnitud grande que los de magnitud moderada, igualmente la figura 4 nos muestra que para $M < 4$, la curva de regresión deja de ser una recta.

Para la determinación de β se escogió el período histórico 1.959 - 1.979. Este se considera el más confiable, pues "a partir de 1.958 se logró mantener en operación permanente tres o más estaciones sismológicas en el país y adicionalmente la red internacional mejoró notablemente. . ." (1). El valor de β calculado fue de 1.6 figura 4. Este valor está de acuerdo con los encontrados para toda la región pacífica de América; adicionalmente en las regresiones hechas

para períodos intermedios, teniendo en cuenta solamente los registros donde se conociera la profundidad focal, el valor de β tiende a estar cerca de 1.6.

Las funciones de atenuación empleadas, dado que en el país nunca se ha realizado un estudio que considere la ocurrencia real, fueron las de Mc GUIRE figura 5. Esta hipótesis fue general para los estudios de todo el país.

VALORES DE PARAMETROS b_i PARA LA ECUACION DE Mc GUIRE

	b_1	b_2	b_3	b_4
Aceleración	472.3	0.64	1.301	25
Velocidad	5.64	0.942	1.202	25
Desplazamiento	0.393	0.999	0.885	25

6. DESARROLLO DEL MODELO

El desarrollo del modelo conduce a la obtención de la expresión:

$$P(Y \geq y / M \geq M_0) = \frac{CG y^{(-\beta / b_2)}}{L} \quad (3)$$

donde:

$$C = b_1 \left(\frac{\beta}{b_2} \right) e^{(\beta M_0)} \quad (3.1)$$

$$G = \int_{L_1}^{L_2} \left(\sqrt{x^2 + d^2} + b_4 \right)^{-\psi} dx \quad (3.2)$$

$$d = \sqrt{d'^2 + h^2} \quad (3.3)$$

d' = Distancia de la falla de sitio de interés.
 h = Profundidad "media" de los focos atribuidos a la fuente.

$$\psi = \frac{\beta b_3}{b_2} \quad (3.4)$$

L = Longitud de la falla

L_1 y L_2 = Longitudes parciales de la falla. Son positivas si la falla no pasa por el sitio de interés y de signo contrario si pasa.

$P(Y \geq y / M \geq M_0)$ = La probabilidad de que en el sitio de interés ocurra un $Y \geq y$, dado que ocurrió un sismo de interés ($M \geq M_0$). Y , puede ser aceleración, velocidad o desplazamiento.

Finalmente se obtiene:

$$y(T) \left[\frac{v C G}{L n \left(\frac{T}{T-I} \right)} \right]^{b_2 / \beta} \quad (4)$$

Donde

y (T) es el valor de Y para un período de retorno T

v es la frecuencia de sismos en la fuente por unidad de longitud.

Como los parámetros de la ecuación de Richter fueron calculados con base en el período histórico 1.959 - 1979, por tanto y para ser congruentes, la frecuencia anual de ocurrencia en las fallas también fue calculada a partir de este mismo lapso de información.

Para las diferentes fuentes sismogénicas, en la tabla 1 se muestra la frecuencia anual de ocurrencia v, la profundidad estimada del foco H, y la magnitud última de la fuente.

TABLA 1.

FALLA	Frecuencia Anual V	Profundidad Focal H(km)	Magnitud Última
Romeral	0.50	127	8.0
Cauca	1.15	103	8.2
Atrato Sur	0.80	73	8.0
Baudó	0.80	42	7.8
Sautatá	0.20	57	7.7
Atrato Norte	0.20	45	7.8
Sinú	0.25	55	7.1
Espíritu Santo	0.35	70	7.5
Casabe	0.35	167	7.7
Salinas	0.40	104	7.8
Cimitarra	0.15	101	7.4
Otú	0.10	76	7.7

La geometría y frecuencia de eventos sísmicos de las fallas se encuentra en la tabla 2.

TABLA 2

FALLA	L	L ₁	L ₂	d'	h	v	\bar{v}
Romeral	175	202	27	11	127	0.50	0.0029
Cauca	270	195	-75	40	103	1.15	0.0043
Atrato S.	186	202	17	85	73	0.80	0.0043
Baudó	137	52	-85	163	42	0.80	0.0058
Sautatá	111	88	199	75	57	0.20	0.0018
Atrato N.	125	-10	135	86	45	0.20	0.0016
Sinú	46	29	75	130	55	0.25	0.0054
Espíritu S.	85	58	143	59	70	0.35	0.0041
Casabe	64	208	144	110	167	0.35	0.0055
Salinas	134	140	6	150	104	0.40	0.0030
Cimitarra	68	195	127	39	101	0.15	0.0022
Otú	118	161	43	101	76	0.10	0.0008

Nota: El signo menos en la longitud L₁ aparece por la convención de signos para realizar las integrales cuando la falla pasa por el sitio de interés.

Con respecto a la Tabla 2. Se hacen los siguientes comentarios:

- Para efectos del cálculo de la frecuencia anual de ocurrencia, se hizo una evaluación de la vecindad de los epicentros y la sucesión en el tiempo para determinar cuáles eventos conforman un racimo y de éste, tener en cuenta el temblor de mayor magnitud ya que si se tenía en cuenta toda la secuencia de réplicas, habría gran distorsión en la ecuación de regresión.
- Respecto a la profundidad promedia, se hizo caso omiso de la no linealidad de la intensidad de un sismo con la profundidad y se calculó ésta como el promedio aritmético de todos los eventos asignados a la fuente incluyendo las réplicas.
- La magnitud última se calculó a partir de la ecuación de Ambrassey de mejor ajuste (ec. 5), ya que en Colombia no tenemos ningún estudio respecto a la longitud de ruptura y la magnitud asociada.

$$L = e^{(1,596 M - 7,56)} \quad (5)$$

La contribución de las diferentes fuentes al riesgo sísmico fue evaluada a partir de las ecuaciones 3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4 y 5.

Con base en los valores de las tablas 1 y 2 se obtienen los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento para varios períodos de retorno. Los resultados para suelo firme se muestran en la tabla 3.

TABLA 3

	Período de Retorno T (años)			
	25	50	100	200
a : Aceleración (cm/s ²)	50	66	87	116
v : Velocidad (cm/s)	8	12	19	28
d : Desplazamiento (cm)	4	7	10	16

7.

ESPECTROS DE DISEÑO

A partir de valores máximos espectrales en suelo firme y para diferentes períodos de retorno se obtienen valores máximos para relaciones de amortiguación del 2, 5, y 7 por ciento según la tabla 4 tomada de Newmark y Resenblueth.

TABLA 4

Amortiguación §	Valores Espectrales		
	Sa	Sv	Sd
2°/o	4.3 a	2.8 v	1.8 d
5°/o	2.6 a	1.9 a	1.4 d
7°/o	1.9 a	1.5 v	1.2 d

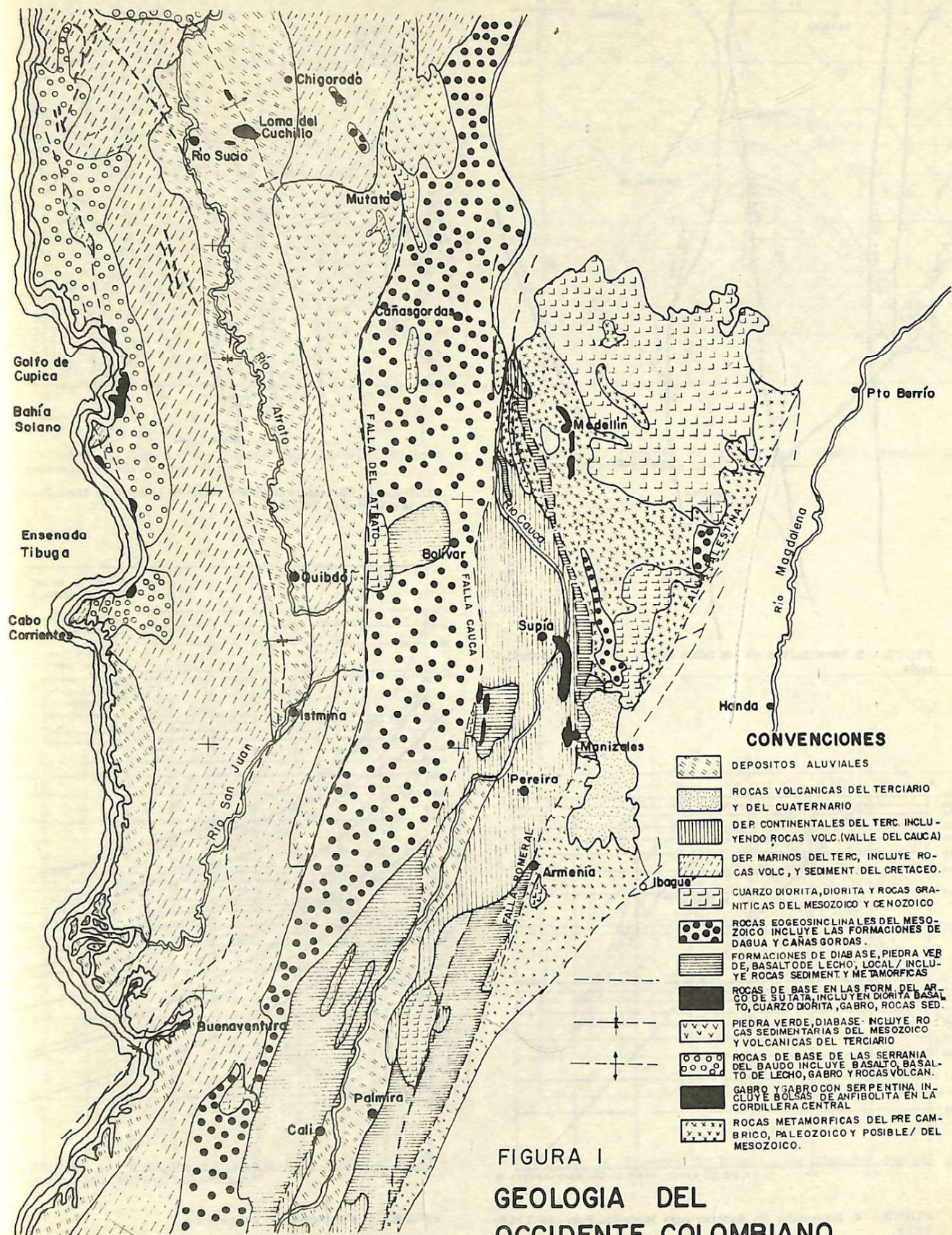


FIGURA I
GEOLOGIA DEL
OCCIDENTE COLOMBIANO

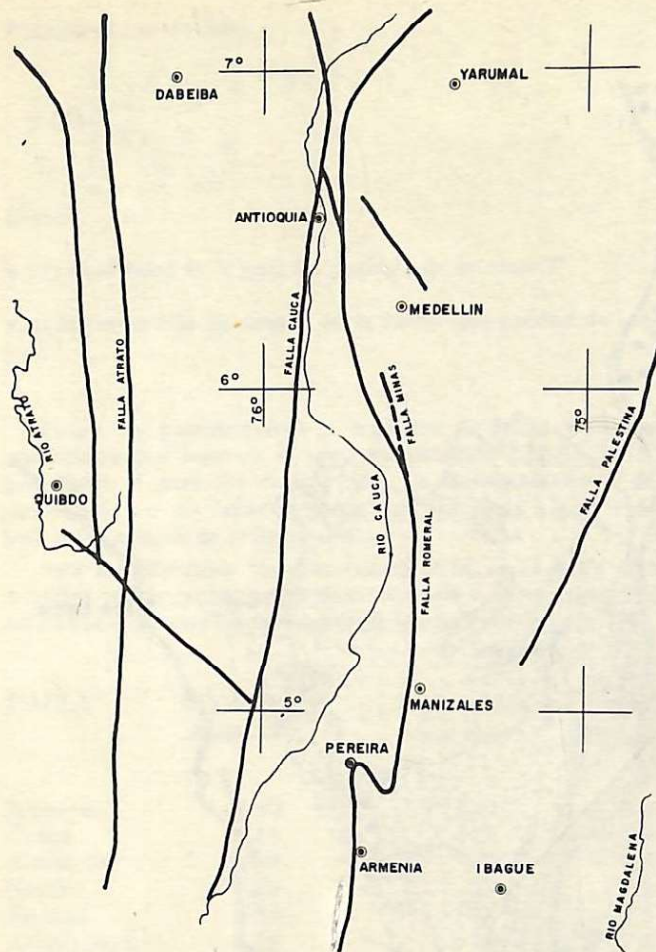


FIGURA 2. Idealización de las fallas dentro de la zona considerada.

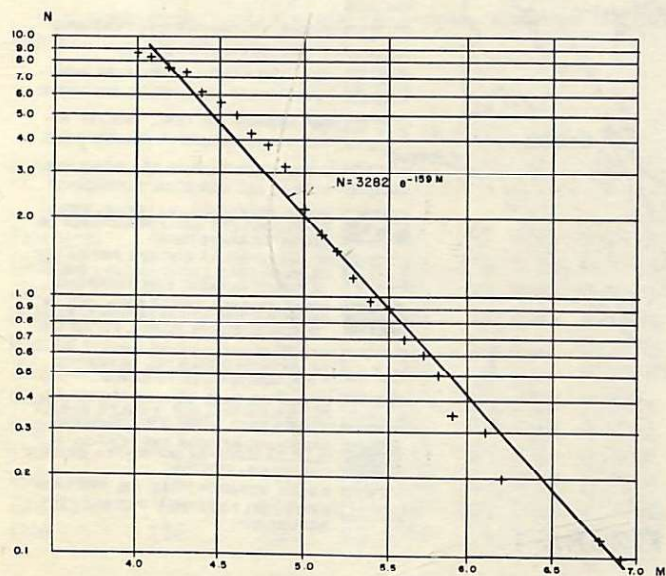


FIGURA 4. Regresión de Richter para Medellín. Período 1959-1979.

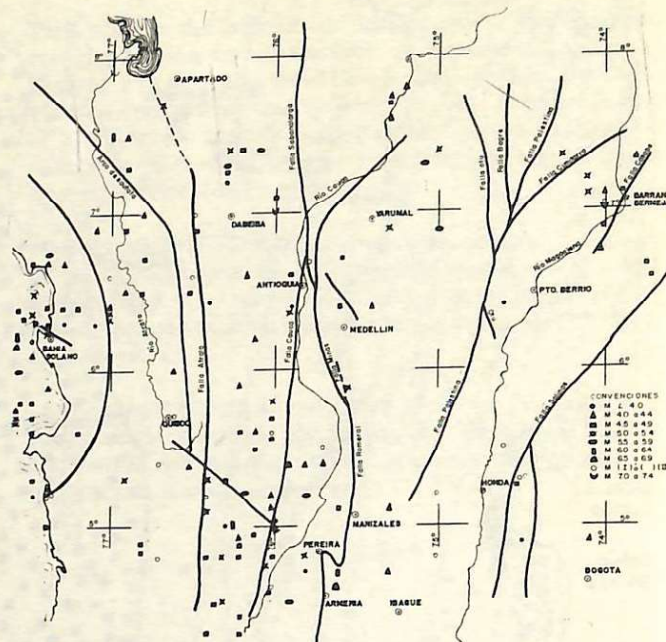


FIGURA 3. Historia Sísmica y fallas de la zona de Medellín. Distancia a Medellín 200 Km.

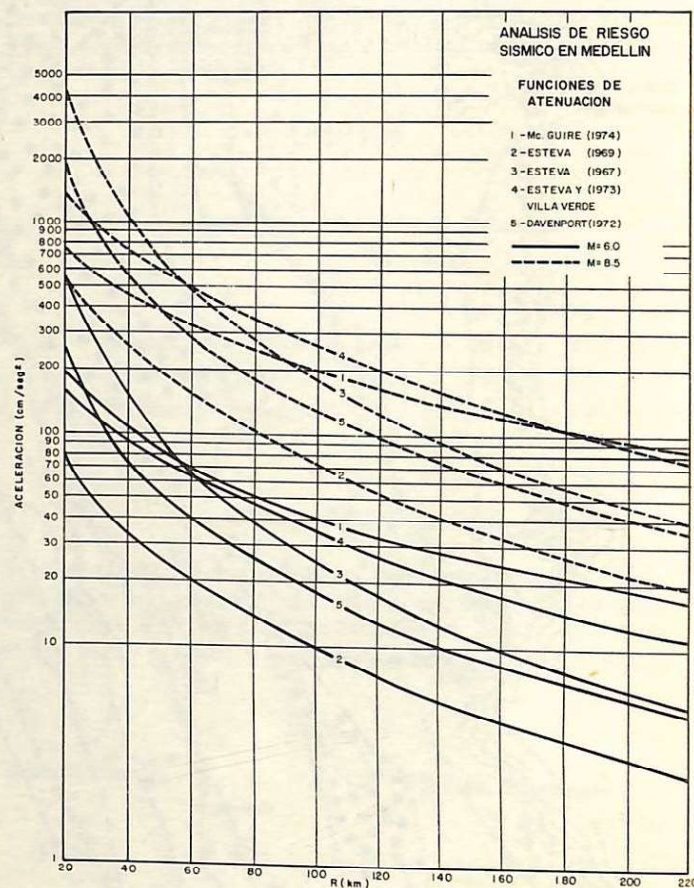


FIGURA 5. Funciones de Atenuación

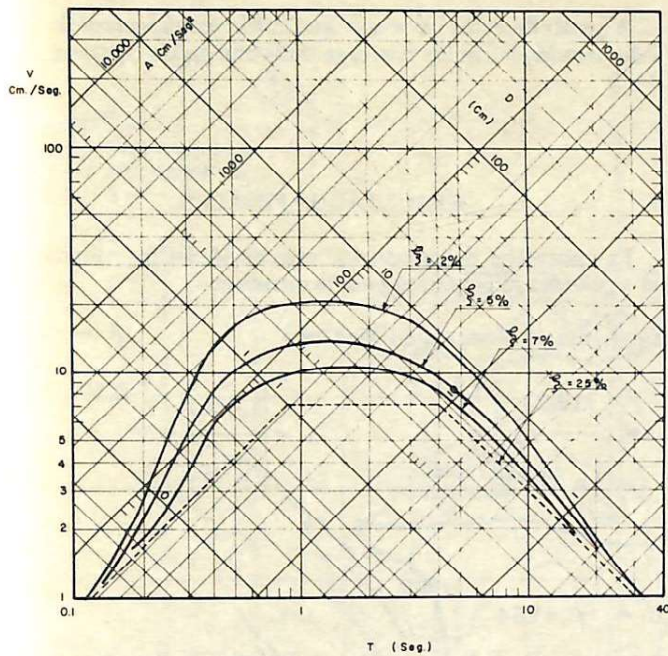


FIGURA 6. Espectro de Diseño para Medellín. Período de retorno 25 años en suelo firme

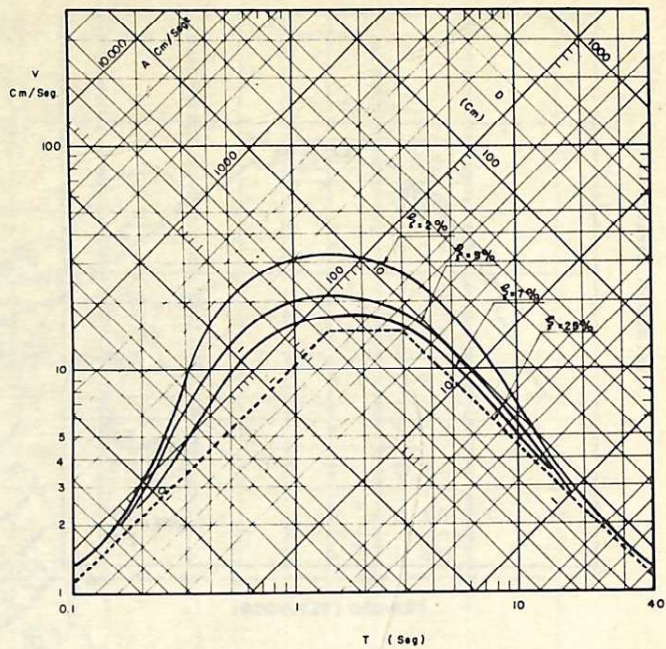


FIGURA 7. Espectro de Diseño para Medellín. Período de retorno 50 años en suelo firme

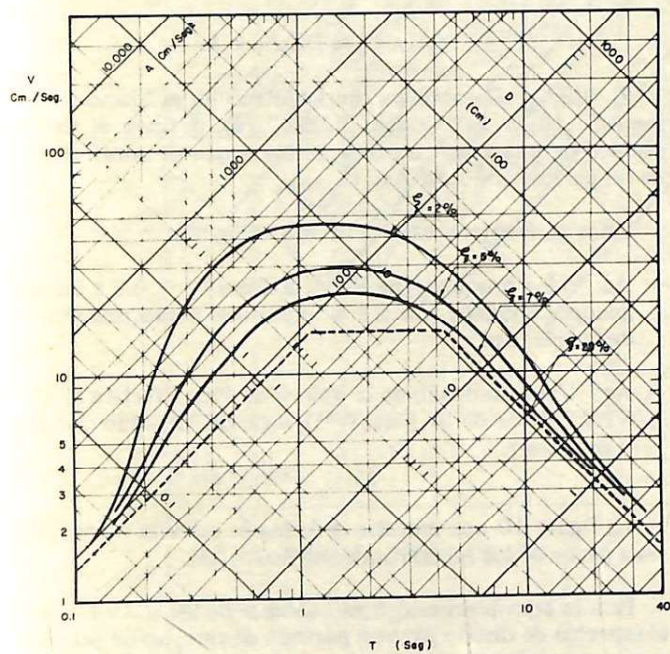


FIGURA 8. Espectro de Diseño para Medellín. Período de retorno 100 años en suelo firme

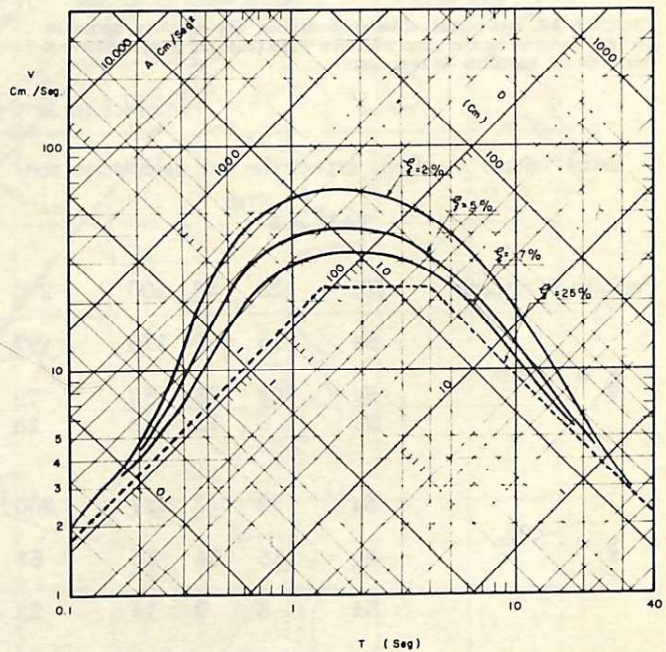
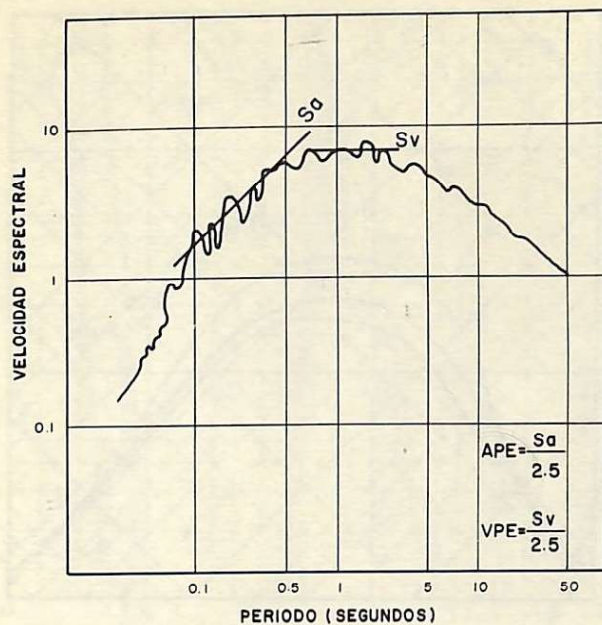


FIGURA 9. Espectro de Diseño para Medellín. Período de retorno 200 años en suelo firme



VPE (cm/s) Av

30	0.40
15	0.20
7.5	0.10
3.75	0.05

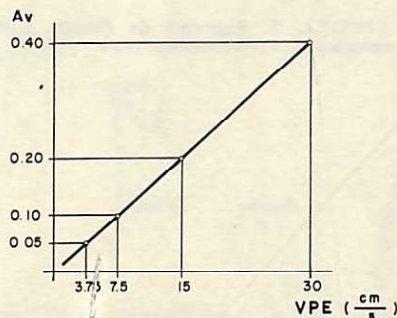


FIGURA 10. Representación esquemática que muestra como se obtiene la aceleración pico efectiva y la velocidad pico efectiva a partir de un espectro de respuesta

Estos valores máximos espectrales así calculados son:

TABLA 5

Período de retorno	(T)	25	50	100	200
$\xi = 2\%$	Sa	215	285	375	497
	Sv	23	35	53	79
	Sd	8	12	18	28
$\xi = 5\%$	Sa	130	172	227	300
	Sv	16	24	36	54
	Sd	6	9	14	22
$\xi = 7\%$	Sa	95	126	166	220
	Sv	12	19	28	42
	Sd	5	8	12	19

A partir de estos valores se graficaron los espectros de diseño para Medellín los cuales se muestran en las figuras 6, 7, 8 y 9.

8. RESULTADOS FINALES

La aplicación del modelo al caso de Medellín, condujo a las siguientes expresiones para la ecuación 4.

Funciones de atenuación: Mc Guire $\beta = 1.6$

$$a = \left[\frac{719,23}{\ln \left(\frac{T}{T-1} \right)} \right]^{0.40} ; \quad v = \left[\frac{1,4667}{\ln \left(\frac{T}{T-1} \right)} \right]^{0.59}$$

$$d = \left[\frac{0,4164}{\ln \left(\frac{T}{T-1} \right)} \right]^{0.62} \quad (6)$$

T= período de retorno

Con estas expresiones se obtienen los valores de aceleración a, velocidad v y desplazamiento d máximos esperados en suelo firme para Medellín y de ellos los espectros de diseño, de las figuras 6, 7, 8 y 9.

9. CALCULO DE Aa y Av

El "Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes" (10) y El "Código ATC-3" (6), definen el riesgo sísmico de una zona con base en los mapas de zonificación de los parámetros Aa y Av.

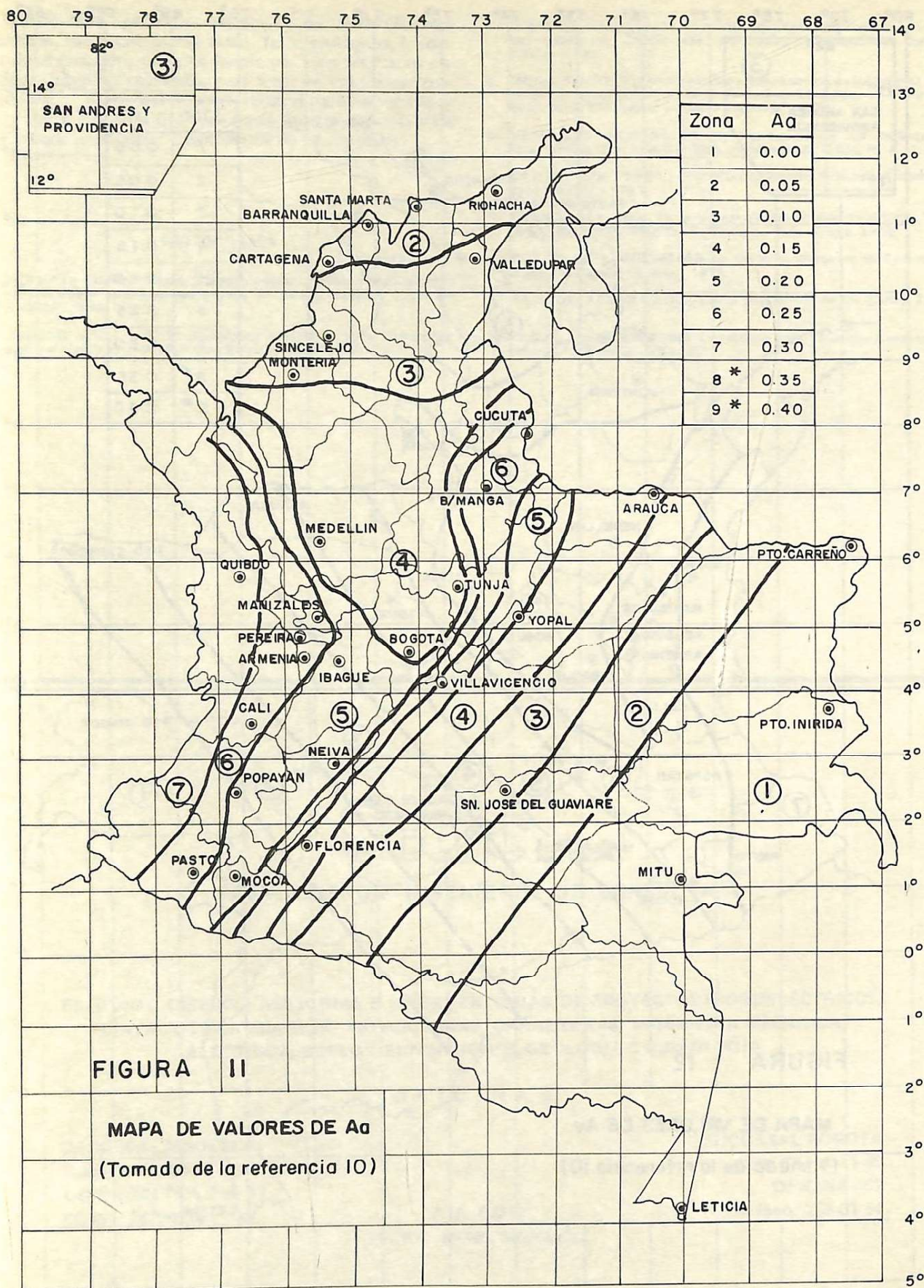
Estos parámetros están definidos como (2):

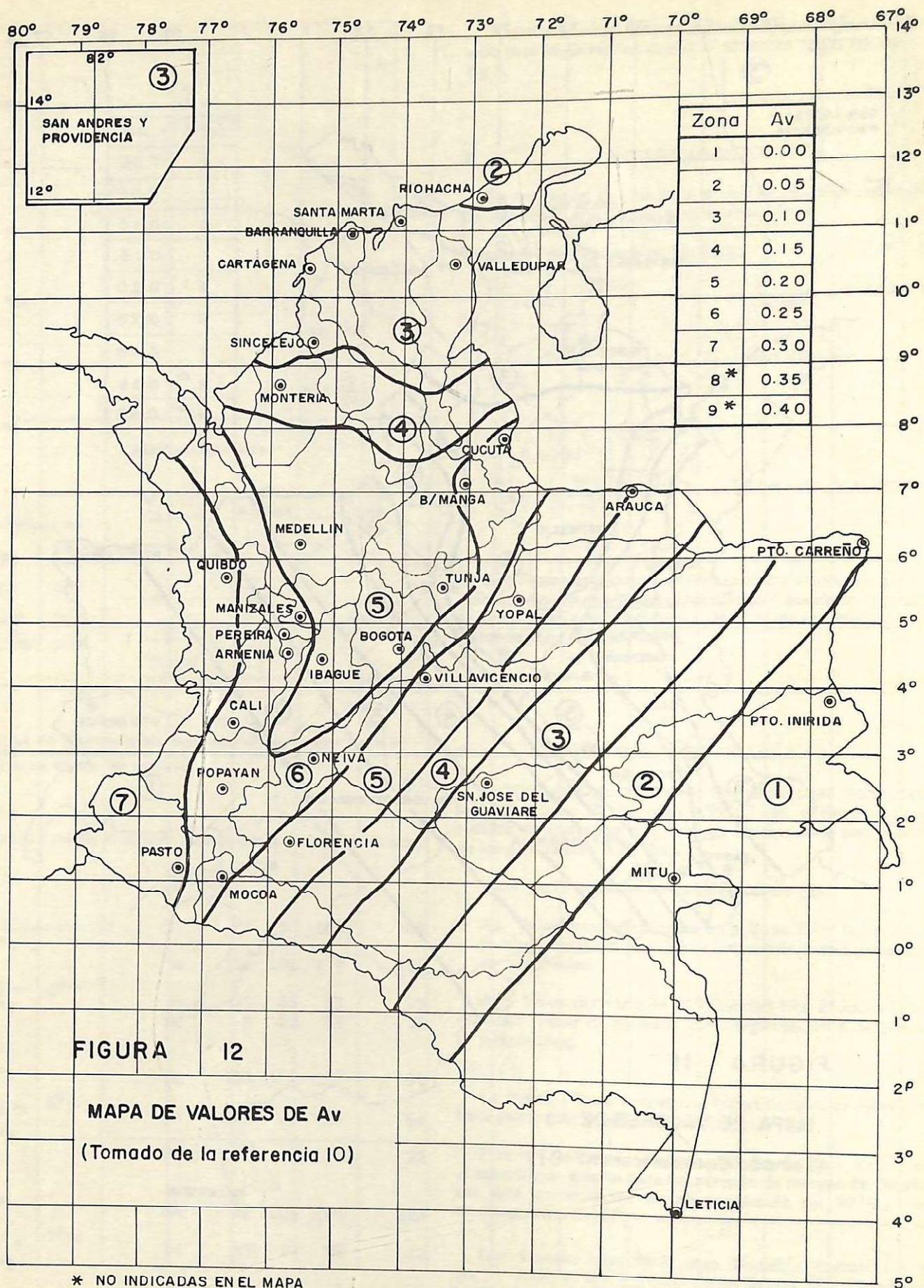
- Aa: Valor promedio de Sa en la Zona T = 0.1 a 0.5 segundos, dividido por 2.5 y expresado como porcentaje de la gravedad.
- Av: Valor derivado de la Velocidad Pico Efectiva (VPE)
- VPE: Valor de Sv para T = 1 segundo, dividido por 2.5 y en cm/seg.

La figura 10 nos muestra la forma de calcular estos valores a partir de los espectros de diseño.

Para la zonificación del país (Mapas de Aa y Av) se usó el espectro de diseño para un período de retorno de 50 años con una probabilidad de no excedencia del 90% y una amortiguación del 5%.

Los valores obtenidos para Medellín fueron los de Aa = 0,15 y Av = 0,20 en las figuras 11 y 12 se muestran los valores para todo el territorio nacional.





Debido a la naturaleza incierta de los datos (Eventos ocurridos, magnitud, profundidad, fallas geológicas, funciones de atenuación, modelos fuente etc.) los resultados obtenidos deben ser corregidos para tener en cuenta su "confiabilidad". Estos análisis se efectuaron para los valores de Aa y Av y ello se refleja en valores ligeramente más altos que los que se obtienen directamente de los espectros.

BIBLIOGRAFIA

1. BERNAL, Carlos y otros. Estudio preliminar del riesgo sísmico en Colombia con base en curvas de isoaceleración. U. de los Angeles 1.980.
2. CODIGO ATC — 3. Disposiciones tentativas para desarrollar códigos sísmicos para edificios. Traducción ACIS 1.978.
3. JIMENEZ, Gonzalo A. Algunos aspectos sobre el diseño sísmo resistente. Conferencia Asociación de Ingenieros Estructurales 1.982.
4. MESA, TORO. Algunas consideraciones acerca de las fuerzas para el diseño sísmoresistente en la ciudad de Medellín, U. Nacional. Tesis de Grado Asesor Gonzalo Jiménez. 1.979.
5. NEWMARK. ROSENBLEUTH. Fundamentals Of Earthquake Engineering. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1.971.
6. NORMA AIS 100-83. Versión preliminar. Requisitos Sísmicos para Edificios 1983.
7. PEREZ, ALVARO. Es necesario el diseño sísmoresistente. 1er. Seminario Nacional sobre Edificios de Baja Altura. 1982.
8. RAMIREZ, J. E. S. J. Historia de los terremotos en Colombia. Instituto Agustín Codazzi. 1975.
9. SARRIA, ALBERTO. Ingeniería Sísmica U. de los Andes, 1982.
10. Código Colombiano de Construcciones Sísmico-Resistentes. Decreto-Ley 1400 de 1984.

Sedic LTDA.

SERVICIOS DE INGENIERIA DE CONSULTA

ESTUDIOS, DISEÑOS, ASESORIAS E INTERVENTORIAS DE PROYECTOS HIDROELECTRICOS,
LINEAS DE TRANSMISION, ESTRUCTURAS, CARRETERAS, INGENIERIA MECANICA,
ELECTRICA, SUELOS, FUNDACIONES, GEOLOGIA E HIDROLOGIA

OFICINAS:

PRINCIPAL MEDELLIN
Calle 49 No. 45-65
Edificio ICETEX, Piso 11
CONM. 242 86 06

A. A. 52217
TELEX: 65345 SEDIC CO.

SUCURSAL BOGOTA
Calle 63 No. 11-45
OFICINA 402
Teléfono: 255 01 54