



# SISMICIDAD HISTÓRICA Y MODELOS SISMOTECTÓNICOS SUSTENTO DE ÍNDICES DE PELIGROSIDAD SÍSMICA

## RESUMEN

A lo largo del último siglo se han publicado una veintena de mapas de zonificación sísmica de Venezuela. Además de la diversidad de fuentes informativas, sus diferencias reflejan cambios en la percepción de sus autores sobre la eventual actividad sísmica futura, lo cual se suele sintetizar con el calificativo de mapas de ‘amenaza’ o ‘peligrosidad’. En este trabajo se presentan los resultados de dos ejercicios de validación, sustentados en la información del más reciente de los catálogos de información macrosísmica publicado en el país, el cual abarca el lapso 1530-1998. El primer ejercicio revisa la validez del último mapa vigente, empleado con fines de seguros, esencialmente fundamentado en los efectos conocidos de sismos pasados; para ello se compara el máximo grado de intensidad sísmica asignado a 108 localidades del país, según la información del catálogo, con la zonificación que ellas tienen en el mapa. El segundo ejercicio explora un procedimiento más elaborado, encaminado a validar el mapa de la Norma COVENIN 1756, que implica determinar para cada una de las 16 ciudades estudiadas, las tasas medias de excedencia de diferentes grados de intensidad sísmica y compararlas con las tasas medias de excedencia de las aceleraciones máximas del terreno determinadas por procedimientos probabilísticos en modelos sismotectónicos.

■ José Grases

Facultad de Ingeniería UCV

■ Beatriz Lirio

Facultad de Ingeniería, Universidad Santa María.

Para incorporar la eventual cercanía de las fuentes sismogénicas reconocidas en el país, ignoradas en los mapas de zonificación, se proponen seis 'índices de sismicidad' congruentes con los mapas de zonificación sísmica vigentes.

**Palabras Clave:** Venezuela; sismicidad histórica; amenaza sísmica; índices de amenaza

## ABSTRACT

Around twenty seismic zonation maps have been elaborated for Venezuela along the last century. They reflect changes in the perception of the seismic hazard due to additional macroseismic and instrumental information, as well as new seismic design requirements. This paper gives the results of the validation of two of those maps, following exercises supported on the descriptions given in the last seismic catalogue which covers the period 1530-1998. The first exercise studies the validity of the seismic zonation of 108 localities, on the basis of the maximum degree of intensity of each site according to the catalogue. The second exercise is somewhat more elaborated, and explores differences between the mean rates of annual exceedence of modified Mercalli intensity degrees and the mean rates of annual exceedences of maximum ground accelerations in 16 urban areas, supporting the most recent zonation map for engineering purposes.

In order to incorporate the nearness of known active faults, generally ignored in our zonation maps, six 'seismic indexes' are proposed, which are congruent with present seismic zonation maps.

**Key words:** Venezuela; historical seismicity; seismic hazard; hazard indexes

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Percepción del Peligro Sísmico

Innecesario recalcar que la sismicidad histórica es un valioso elemento de información en la percepción de la peligrosidad sísmica. Sobre sismos catastróficos que han afectado diversas áreas del planeta a lo largo de los últimos años del siglo XX y en los primeros de este nuevo siglo, no resulta difícil encontrar antecedentes de otros que también fueron destructores en tiempos pasados.

La forma tal vez más frecuente de sintetizar la información descriptiva de sismos pasados es en mapas; a su vez es la menos comprometida, pues la diferenciación de zonas sísmicas se reconoce como una generalización de esa amenaza. El primero de esos mapas con cobertura de todo el planeta, escala aproximada 1: 26 x 10<sup>6</sup>, basado en un extenso catálogo (1606 BC – 1850 AD) compilado por Robert Mallet y su hijo, fue publicado en tres partes (Mallet, 1852-1854). El análisis cuidadoso de ese resultado que acompaña la última parte del catálogo, permite calificar ese mapa como una muy importante y original contribución científica, pues se adelantó en identificar las zonas de interacción de placas tectónicas que, más de 100 años después, fue esgrimido, conjuntamente con los mapas de epicentros de Barazangi y Dorman (1969) como pruebas a favor de la teoría de la deriva de los continentes de A. Wegener.

Para el área geográfica de Venezuela hay tres autores que emprendieron una tarea similar:

- (i) Montessus de Ballore, basado en su inmenso catálogo que superó ampliamente al de Mallet; publicó en México el primer mapa que zonifica las áreas sísmicas de nuestro país, el cual vino a ser conocido entre nosotros ya hacia finales del siglo XX (Montessus, 1898).
- (ii) Centeno Graü, en la edición de sus *Estudios Sismológicos* el año 1940 y basado en el catálogo de sismos venezolanos más completo para ese momento, compilado por él, incluyó un mapa con indicación de localidades del país afectadas por sismos. De acuerdo con lo que sabemos, cuando la muerte sorprende a Centeno en Octubre de 1949, éste se encontraba en plena revisión de su catálogo y del mapa, aún cuando no parece que hubiese modificado el texto del libro. Esto así, pues en la edición post mortem de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales del año 1969, este último solo tiene algunas añadiduras en parte sugeridas por el Dr. F. J. Duarte; sí se constata la actualización del catálogo hasta Junio de 1949, cambios sustanciales de formato, así como del mapa base y de áreas afectadas por eventos pasados en su mapa sísmico, posiblemente no terminado. Suponemos que ese fue el material que examinó el Dr. Guillermo Zuloaga, también miembro de la Academia, quien se encargó de ordenar el material dejado

por Centeno para publicarlo como Volumen VIII de esa corporación (Centeno, 1969).

- (iii) Fiedler con su mapa de zonificación, cuya salida a la luz pública probablemente fue precipitada por el terremoto de 1967. Este sismólogo quien, hasta donde sabemos, solo tenía en sus manos la citada edición de Centeno del año 1940 y otras obras con descripciones de sismos venezolanos, enriqueció ese mapa con sus mapas de isosistas (Fiedler, 1961a; 1961b) y los ‘focos activos’ (así los denominaba) de eventos registrados en el Observatorio Cajigal, analizados por él. Además incorporó la tectónica conocida, probablemente en buena parte sugerida por el Dr. Carlos Schubert, a quien unía afinidad de inquietudes y amistad. De modo que el mapa de zonificación sísmica del país que se incorporó a la norma provisional de 1967 (MOP 1967), además de tomar en cuenta la sismicidad histórica, no hay duda que es el primero que tiene un sustento sismotectónico, incipiente si se quiere, pero en la dirección correcta. Diez años después, Fiedler publica un mapa de zonas sísmicas más elaborado (Fiedler y Rivero, 1977).

Desde el primer mapa conocido sobre las zonas sísmicas del país (Montessus, 1898) hasta el de zonificación sísmica con fines de ingeniería de la Norma provisional del MOP (1967), los cambios en la percepción de la peligrosidad sísmica de extensas zonas del país expresados en los mapas conocidos a lo largo de esos 2/3 de siglo, están esencialmente sustentados por el conocimiento de los efectos de sismos pasados. Posteriormente, nueva información sísmica y geológica, así como nuevas necesidades para su aplicación en la Ingeniería Sismorresistente, modificaron tanto la extensión y número de las zonas sísmicas, como los parámetros empleados en su caracterización.

En mayor o menor grado, en todos ellos se han considerado las descripciones conocidas sobre los efectos de sismos pasados. Los diez que se citan en este trabajo, se han agrupado en el **Cuadro 1** según el fundamento que los sustenta.

En estos mapas se presuponen suelos competentes y se excluyen efectos locales tanto del subsuelo, como de la eventual ubicación de la localidad en las inmediaciones de fuentes sismogénicas. De modo que hasta finales de los años 60 aproximadamente, la percepción de la peligrosidad sísmica

CUADRO 1  
MAPAS EMPLEADOS EN LA EVALUACIÓN DE LA PERCEPCIÓN  
DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN VENEZUELA

FUNDAMENTO DEL MAPA DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA	REFERENCIA ( ) = año de elaboración
- Descripciones conocidas sobre los efectos de sismos pasados	Montessus, 1898; MOP, 1947 <sup>(1;2)</sup> ; Centeno, 1969 (1949) <sup>(1;2)</sup> ; MOP, 1959 (1955) <sup>(1;2)</sup>
- Descripciones conocidas sobre los efectos de sismos pasados - Información de sismos registrados en el país y ubicación de los grandes rasgos de tectonismo activo conocidos	MOP, 1967 <sup>(1;2)</sup> ; Fiedler y Rivero 1977; Superintendencia de Seguros, 1989 <sup>(1)</sup>
- Cálculo probabilístico de la peligrosidad sísmica con base en modelos sismotectónicos; complementado con descripciones sobre los efectos de sismos pasados	COVENIN, 1982 <sup>(1;3)</sup> ; PDVSA, 1991 <sup>(4)</sup> ; COVENIN, 2001 (1998) <sup>(1;3)</sup>

(1) La delimitación de zonas incorpora, parcial o totalmente, la división política por estados o municipios;

(2) La zonificación está asociada a coeficientes sísmicos de diseño; (3) Zonificación asociada a movimientos máximos del terreno con períodos medios de retorno del orden de 475 años; (4) Mapas de iso-curvas que permiten determinar las tasas medias de excedencia hasta para períodos medios de retorno de unos 2000 años; una segunda versión del año 1999 se considera menos confiable hacia el centro-occidente del país.

expresada en los mapas de zonificación sísmica de Venezuela, al igual que en los de otros muchos países, tiene un fundamento esencialmente sustentado por el historial de eventos pasados: tanto los sentidos o destructores, como los identificados con una red de sismógrafos cada vez más densa en todo el planeta.

### 1.2 Cambios en la Percepción de la Peligrosidad Sísmica

Desde el comienzo de la década de los años 60 y con el apoyo de UNESCO, comienza a sistematizarse el trabajo de campo en zonas urbanas que sufren algún tipo de destrucción por sismos. Igualmente se preconiza la instalación de equipos para el registro de los movimientos fuertes del terreno y, ya aceptada la teoría de la deriva de los continentes así como la correlación entre sismos y la neotectónica, la evaluación de las expresiones superficiales de fallas geológicas activas comienza a ser también sistemática.

La colección de registros acelerográficos debidamente corregidos e interpretados, cuyo inicio lo marca en buena medida el sismo de San Fernando, California, en 1971, vino a suministrar información básica que progresivamente facilitó las propuestas de modelos sismotectónicos en áreas reconocidamente sísmicas. Lo anterior y el desarrollo de algoritmos ad-hoc, facilitó la cuantificación probabilística de la amenaza sísmica.

En Venezuela, si bien la creación de FUNVISIS cinco años después del terremoto cuatricentenario de Caracas era una necesidad para canalizar algunas iniciativas en respuesta a los efectos del sismo, los antecedentes recién anotados también tuvieron sus efectos en el mundo profesional. En el dominio de la neotectónica destaca, entre otros, el trabajo pionero de Carlos Schubert (véase: Audemard, 1996). Por ejemplo, una de sus importantes contribuciones es la primera estimación de tasas de desplazamiento de fallas activas en el país, sustentada por los movimientos postglaciales en un sector de la falla de Boconó (Schubert y Sifontes, 1970).

Por último y sin ser exhaustivos, después del terremoto de Caracas se generaliza entre los ingenieros estructurales el interés por los sismos, tanto en Venezuela como en muchos otros países. Estos profesionales comenzaron a requerir de parte de los sismólogos y geólogos información para aplicar una estrategia preventiva debidamente sustentada,

lo cual explica que algunos de los primeros trabajos sobre peligrosidad sísmica y mapas fundamentados en modelos probabilísticos fueron elaborados por ingenieros.

### 1.3 Necesidad de la Validación

Los trabajos y cambios de percepción citados, se reflejan en las modificaciones hechas a las normas sísmicas desde 1982 en adelante. Aún cuando esto facilitó la modernización de las técnicas para sintetizar la percepción de la 'amenaza' mencionada, no obstante las normas carecen del deseable sustento de registros acelerográficos locales. Entre otras razones porque la tasa media de desplazamiento anual de nuestros accidentes tectónicos es inferior a unos 9 mm/año; es decir, unas 8 a 10 veces menores que las de otras zonas sísmicas del planeta, con lo cual la tasa de sucesos de interés también resulta ser menor en nuestro territorio.

El objetivo principal de este trabajo es presentar los resultados de dos ejercicios de validación de mapas de zonificación: uno analiza el último de los mapas basado en la generalización de efectos de sismos pasados (Superintendencia de Seguros, 1989) y el segundo evalúa el mapa de la Norma COVENIN 1756 (2001), sustentado en la cuantificación probabilística de modelos sismotectónicos. Tal validación no puede dejar de lado la limitación de este último, en el cual se ignora la eventual cercanía a fallas tectónicas reconocidamente activas; su consideración facilita y sustenta la caracterización de los denominados 'índices de peligrosidad sísmica' que se proponen más adelante

## 2. METODOLOGÍA

La alternativa de esperar un par de siglos 'para ver como andamos', no es preferible a otras que, con todo y ser debatibles, permiten explorar el empleo de la información histórica en la propuesta de validación. De modo que, a conciencia de las múltiples incertidumbres propias de la interpretación de descripciones sobre los efectos de sismos pasados, para los dos ejercicios señalados se empleó la base de información histórica que se consideró más completa: el último catálogo de sismos sentidos o destructores de Venezuela (1530-1998), obra publicada como homenaje de instituciones académicas del país con ocasión de los 50 años de la muerte de

ese pionero de la sismología venezolana que fue el Dr. Melchor Centeno Graü (Grases et al., 1999).

En el manejo de compilaciones de eventos sísmicos y estimaciones de tasas de ocurrencia de eventos, rápidamente afloran limitaciones entre las cuales destacan las tres siguientes: (i) la desigualdad de fuentes de información (desde ausencia total de citas como pueden ser pueblos de la costa norte central, hasta una muy amplia cobertura por la presencia de aficionados o profesionales de la sismología, como es el área de Ciudad Bolívar y alrededores); (ii) problemas de localización debido a toponimias idénticas, sin distinción segura del estado o ubicación geográfica; por ejemplo, El Pao puede ser una de 11 localidades diferentes, áreas o valles de ríos con igual nombre en el país (véase Vila, 1964), o bien la mención generalizada de áreas geográficas ('Fuertemente sentido en Perijá', 'Sentido en toda Guayana' o 'Sentido en todo el país'); (iii) áreas urbanas de crecimiento relativamente reciente como es el caso de Puerto La Cruz, o de reciente desarrollo como El Tablazo, para las cuales el tiempo de observación es excesivamente breve.

Sin perder de vista estas y otras limitaciones, se procedió a la asignación de grados de intensidad y al cálculo de sus tasas medias de excedencia anual. Cita aparte merecen zonas cercanas a la presa de Guri, cuya sismicidad probablemente esté afectada por la presencia del embalse.

## 2.1 Ejercicios de Validación

El *primer ejercicio* se fundamenta en la máxima intensidad asignada a una muestra de localidades, con información descriptiva que puede llegar a ser, como se acaba de indicar, tan escueta como: "Sismo sentido", con una sola entrada en todo el catálogo. Para evaluar ese tipo de información se consideró mas conveniente el empleo de la escala de tres grados que John Milne utilizó en su catálogo que va del año 7 al de 1899 (Milne, 1911). Esta fue la misma escala seleccionada por el padre Jesús Emilio Ramírez (s.j.), pionero de la sismología colombiana, para asignar intensidad a todos los eventos compilados en su obra titulada: *Historia de los terremotos en Colombia* (Ramírez, 1975).

En forma muy gruesa, su equivalencia con escalas de doce grados como la Modificada de Mercalli o la macrosísmica europea, se da en el Cuadro 2.

Esta escala ha servido de guía en el primer ejercicio de validación, en el cual lo que interesa es la intensidad máxima asignada en una muestra de

CUADRO 2 EQUIVALENCIA APROXIMADA ENTRE LAS ESCALAS DE INTENSIDAD DE TRES Y DE DOCE GRADOS

Escala de Tres Grados	I	II	III
Escala de Doce Grados	≤ IV	V-VI	≥ VII

localidades. En esa tarea surgen inevitables dudas; estas se han expresado como: grado I-II ó grado II-III, con lo cual se alcanza una escala de cinco grados. El reconocimiento de tal incertidumbre es comparable, por ejemplo, a la de las asignaciones del mapa de zonificación de la norma Suiza, vigente para el año 1989, cuyo territorio de 41 mil km<sup>2</sup> fue dividido en cuatro zonas sísmicas con base en la escala MSK de 12 grados: Zona sísmica 1 (VI a VII,  $A_0 = 0,06g$ ); Zona sísmica 2 (VII<sup>+</sup>,  $A_0 = 0,10g$ ); Zona sísmica 3 (VIII<sup>-</sup>,  $A_0 = 0,13g$ ); Zona sísmica 4 (VIII<sup>+</sup>,  $A_0 = 0,16g$ ). Por ejemplo, Basilea, que fue destruida por un sismo el 18 de Octubre de 1356, está ubicada en la Zona sísmica 2 (IAEE, 1996).

Con todo, el empleo de esta 'herramienta de medición' tiene la ventaja que descripciones del tipo: 'Agrietamiento de viviendas en mal estado', 'Santa Lucía sufrió serios daños en este temblor', 'Sentido sin consecuencias', o similares, requieren menos inventiva que cuando se emplean escalas de doce grados. Dado que en este ejercicio se trataba de identificar la máxima intensidad en tiempos históricos, la ventaja de renunciar al uso de escalas mas refinadas, con mas grados, es la de poder ampliar el número de localidades de la muestra. De esta forma se alcanzó un total de 108 localidades.

El *segundo ejercicio* es más elaborado ya que su finalidad es determinar, para cada localidad estudiada, la tasa media de excedencia anual de diferentes niveles de intensidad y, posteriormente, compararla con la tasa media de excedencia anual de aceleraciones del terreno de esa localidad sustentada por modelos sismotectónicos (Lirio, 2004). Para ello se requiere: (i) la selección de poblaciones con la mayor cantidad de eventos posibles registrados en tiempos históricos, y; (ii) el uso de

una escala de 12 grados como la Modificada de Mercalli; en su aplicación se adoptaron algunos de los ajustes propuestos por Brazeo, 1979. Esta escala es esencialmente coincidente con la propuesta por Medvedev, Sponheuer y Karnik (MSK) en la versión macrosísmica europea compilada por Grünthal, 1998. De esta forma se lograron estudiar 16 localidades, en su mayoría capitales de estado, para cada una de las cuales se determinó la relación empírica:

$$\log \lambda = C_1 - C_2 (IM) \quad (1/año) \quad (1)$$

donde:  $\lambda$  es la tasa media de excedencia anual de la intensidad de Mercalli grado IM; las constantes  $C_1$  y  $C_2$  son propias de cada localidad y se obtienen por regresión.

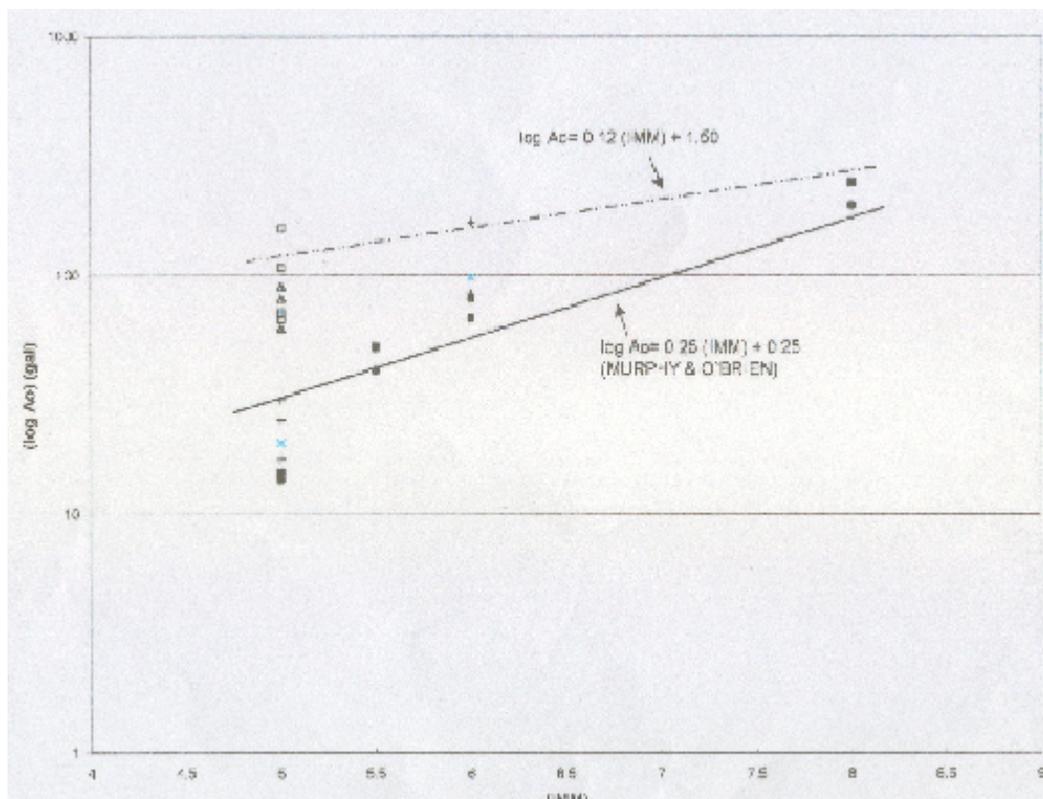
Tomando en consideración los objetivos de la validación del segundo ejercicio, es preciso determinar la equivalencia entre los grados de intensidad (IM) y la aceleración máxima del terreno ( $A_0$ ), variable esta que se establece en los mapas de zonificación vigentes con fines de ingeniería; aún cuando hay razones para considerar que con la velocidad máxi-

ma del terreno probablemente se logre una mejor correlación, en este caso resulta obligado retener el parámetro especificado en las normas para la validación propuesta.

El número de registros acelerográficos obtenidos en localidades del país donde, además de  $A_0$  también se conozca el valor asignado de IM, es limitado; estos son eventos sucedidos en el oriente del país y se dan en la **Figura 1**. Vista la dispersión que se observa en dicha figura (24 componentes de registros acelerográficos, provenientes de 5 sismos con magnitudes comprendidas entre 4,5 y 6,8), típica de la pobre correlación esperada entre esas dos variables, lo usual es establecer una regresión muy cercana a la envolvente; en este caso la envolvente queda descrita por la fórmula:

$$\log A_0 = 1.5 + 0.12 (IM) \quad (\text{gal}) \quad (2)$$

Con fines de comparación, se indica la relación propuesta por Murphy and O'Brien, la cual fue empleada para estudios de peligrosidad sísmica en el país (INTEVEP, 1990).



D

FIGURA 1 Envolvente de la Relación entre IM y  $\log A_0$  expresada por la Fórmula (2). Datos de cinco sismos del Oriente de Venezuela. (Mayo 1982; Marzo y Abril de 1983; Junio 1986; Julio 1997)

De las fórmulas (1) y (2) se deriva la que relaciona la tasa de excedencia anual  $\lambda$  y la aceleración máxima del terreno  $A_o$  en función de  $C_1$  y  $C_2$ , coeficientes estos que caracterizan la sismicidad histórica de cada localidad:

$$\log \lambda = (C_1 + 12,5 C_2) - 8,33 C_2 \log A_o \quad (3)$$

La fórmula (3) es similar a la que se desprende de los resultados obtenidos del cálculo de peligrosidad sísmica a partir de modelos sismotectónicos. En algunas especificaciones como por ejemplo la PDVSA JA-221 del año 1991, esta se expresa cuantitativamente por la expresión:

$$\log \lambda = \gamma \log a^* - \gamma \log A_o \quad (4)$$

donde  $a^*$  y  $\gamma$  pueden leerse en los correspondientes mapas de iso- $a^*$  e iso- $\gamma$  para cualquier lugar del país.

Finalmente, para la comparación de resultados de este ejercicio, el valor de la aceleración máxima obtenida con la fórmula (3) se identifica como  $(A_o)_{hist.}$  y, el correspondiente valor de la fórmula (4) que haya sido empleado en la norma, se ha designado como  $(A_o)_{norma}$ ; en el cálculo de este último valor se adoptaron valores muy cercanos a los que se obtienen de la aplicación de la especificación PDVSA JA-221 ya citada. El cociente  $\Gamma = (A_o)_{hist.} / (A_o)_{norma}$  calculado para períodos medios de retorno  $T = 475$  años, valor nominal usado en los mapas de las normas COVENIN 1756 de 1982 y 2001, se considera un buen índice de comparación; obsérvese que para períodos de retorno de ese orden, se puede aceptar que  $T = 1/\lambda$  (años).

### 2.2 Índices de Peligrosidad Sísmica

Los mapas de zonificación sísmica citados en el Cuadro 1 constituyen índices generalizados de peligrosidad sísmica. Otros índices igualmente

importantes, incorporados o no en las normativas, modifican lo establecido en los citados mapas. Entre ellos, tres son fundamentales: (i) el factor de importancia o de uso, que mayor los valores de las acciones establecidas en los mapas para el caso de obras de importancia excepcional; (ii) las condiciones locales del subsuelo, y; (iii) la cercanía de fallas activas.

De los tres, los dos primeros, ya incorporados en las normas desde el año 1967 y modificados en documentos normativos subsiguientes, conducen a cambios importantes en la cuantificación de la peligrosidad en un sitio dado: (a) cambios en las ordenadas espectrales, y; (b) reducción en las probabilidades de excedencia de los valores a ser empleados en el diseño o en la verificación de la seguridad. Por ejemplo, para el análisis o diseño de una obra de importancia excepcional, fundada en suelos blandos, con un periodo natural de 1 segundo, la aplicación de la norma sísmica vigente puede hasta triplicar las ordenadas espectrales a ser utilizadas en el diseño de una edificación no esencial, fundada en roca, con el mismo periodo natural.

Por su importancia para el caso de fuentes sismogénicas superficiales como las que predominan en Venezuela, el índice identificado más arriba como

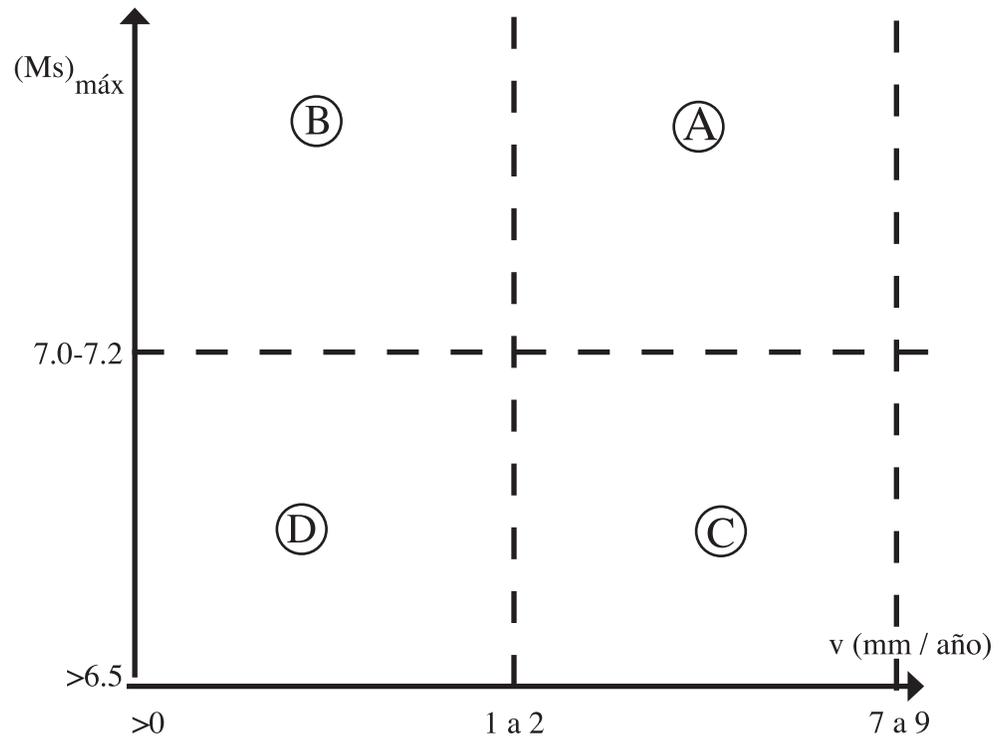


FIGURA 2 Tipificación de Fallas Geológicas Activas como Fuentes Sismogénicas Superficiales

CUADRO 3  
NÚMERO DE LOCALIDADES CON GRADO DE INTENSIDAD MÁXIMA ASIGNADO CON LA ESCALA DE TRES GRADOS VS CUATRO ZONAS DEL MAPA DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA CON FINES DE SEGUROS

ZONA	GRADO MÁXIMO DE INTENSIDAD ASIGNADO <sup>(a)</sup>				
	I	I – II	II	II – III	III
4 <sup>(b)</sup>	3 (1) <sup>(c)</sup> (2) (18)	4 (9) (15) (17)(19)	8 (3) (7) (8) (12) (14) (21) (22) (23)	23	16
3	4 (5) (10) (16) (20)	7	5	3	3 (4) (6) (11)
2	14	8	4	1 (13)	0
1	5	0	0	0	0

(a) Escala de tres grados. (b) Máxima peligrosidad según mapa de zonificación de Superintendencia de Seguros, 1989. (c) Las Notas entre paréntesis se dan en la Cuadro 4.

(iii) se ha incluido en documentos relativamente recientes; véase por ejemplo, el código UBC (ICBO, 1997). Para ello, y con la información sobre las fallas geológicas activas del país hasta inicios del año 2000, antes que nada es preciso agruparlas, por ejemplo, en la forma que se da en la **Figura 2**: en ordenadas se anota la magnitud máxima

asociada según la segmentación o longitud más probable de rotura establecida por especialistas en neotectónica y, en abscisas, la tasa media de desplazamiento anual (mm/año), asignada a la falla activa en consideración.

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS

#### 3.1 Validación del Mapa de la Superintendencia de Seguros

El resultado de este *primer ejercicio* con la escala de tres grados, se presenta en el **Cuadro 3**. Ese cuadro recoge los resultados de la asignación de intensidades máximas en 108 localidades del país. Se comparan con la ubicación en las cuatro zonas sísmicas del mapa de zonificación sísmica de la Superintendencia de Seguros ya citado. Tomando en consideración la equivalencia aproximada con escalas de 12 grados que se da en el **Cuadro 2**, las localidades que queden ubicadas en las áreas sombreadas en el **Cuadro 3** pueden considerarse adecuadamente representadas por el índice de peligrosidad sísmica de ese mapa (85 del total de 108).

En el citado cuadro se observa un conjunto de localidades que quedan fuera del área sombreada: 19 ubicadas en zonas sísmicas más riesgosas del mapa que el riesgo inferido de la sismicidad histórica y 4 ubicadas con una peligrosidad subestimada en el mapa; todas ellas identificadas por las notas (número entre paréntesis). El nombre de las 23 localidades y algunas particularidades sobre su información, se

dan en las correspondientes notas agrupadas en el **Cuadro 4**; se anotan también aquí posibles cambios de zonificación esencialmente sustanciados por nueva información sismotectónica posterior al año de elaboración del mapa de la Superintendencia de Seguros, 1989, así como localidades que requieren estudios adicionales.

#### 3.2 Ejercicio de Validación del Mapa de la Norma COVENIN 1756-2001

Tal como se indicó en la **Sección 2.1** de este trabajo al describir el *segundo ejercicio*, en este se calcularon las tasas de excedencia de intensidades de Mercalli con base en la información del catálogo. En el **Cuadro 5** se indican cuales fueron las localidades estudiadas, el lapso de observación, el número de eventos reportados en el catálogo y los coeficientes de la fórmula (1) representativos para cada población. Igualmente, se determinó el valor  $(A_o)_{hist.}$ , así como el valor  $(A_o)_{norma}$ , con lo cual se determinó el cociente  $\Gamma = (A_o)_{hist.} / (A_o)_{norma}$  para periodos medios de retorno  $T = 475$  años; estos también se dan en el **Cuadro 5**.

El cociente adimensional  $\Gamma$  se ha empleado como un buen índice de la validación de las 16 localidades estudiadas. Tomando en consideración: (a) los criterios de zonificación y; (b) incertidumbres en las fórmulas (1) y (2), la zonificación del mapa se considera representativa de la sismicidad histórica cuando se cumpla la condición siguiente:

$$0,8 \leq \Gamma \leq 1,3 \quad (5)$$

CUADRO 4  
NOTAS DEL CUADRO 3

NOTA	LOCALIDAD	DATOS DEL CATÁLAGO		EVENTUAL CAMBIO DE ZONIFICACIÓN
		NÚMERO DE EVENTOS	LAPSO DE OBSERVACIÓN	
(1)	Aragua de Maturín	5	1908 – 1926	Pasar a Zona 3
(2)	Araira	1	1951	Pasar a Zona 3
(3)	Aregüe	3	1927 – 1991	Mantener en Zona 4
(4)	Barinas	24	1674 – 1993	Elevar a Zona 4
(5)	Bejuma	3	1886 – 1957	Mantener en Zona 3
(6)	Boca del Tocuyo	2	1989	Elevar a Zona 4
(7)	Carora	55	1865 – 1997	Mantener en Zona 4
(8)	Carorita	1	1772	Mantener en Zona 4
(9)	Casigua El Cubo	2	1952 – 1954	Pasar a Zona 3
(10)	Guanape	2	1900 – 1967	Mantener en Zona 3
(11)	Guanare	35	1782 – 1991	Requiere estudios adicionales
(12)	La Victoria	14	1812 – 1998	Pasar a Zona 3
(13)	Maracaibo	116	1672 – 1997	Requiere estudios adicionales
(14)	Maracay	48	1766 – 1993	Pasar a Zona 3
(15)	Maturín	33	1766 – 1986	Pasar a Zona 3
(16)	Ospino	3	1812 – 1933	Mantener en Zona 3
(17)	Puerto La Cruz	19	1950 – 1998	Mantener en Zona 4
(18)	Quiriquire	2	1963 – 1974	Pasar a Zona 3
(19)	Río Tocuyo	10	1927 – 1991	Pasar a Zona 3
(20)	Tinaquillo	4	1931 – 1974	Mantener en Zona 3
(21)	Tucupita	35	1918 – 1993	Pasar a Zona 3
(22)	Valencia	63	1812 – 1996	Mantener en Zona 4
(23)	Valera	48	1888 – 1991	Mantener en Zona 4

De las 16 ciudades estudiadas, solo 2 no satisfacen la condición anterior: Maracaibo ( $\Gamma = 1,44$ ) y Guanare ( $\Gamma = 1,35$ ); los valores mas bajos corresponden a Tucupita ( $\Gamma = 0,8$ ) y Puerto La Cruz ( $\Gamma = 0,86$ ), probablemente debido al corto lapso de observación histórica.

### 3.3 Índices de Peligrosidad Sísmica

Vistos con la perspectiva de los últimos 15 a 20 años y con ayuda de la tipificación propuesta en la **Figura 2**, en los mapas de zonificación con fines de ingeniería de las normas se identifican 5 niveles o 'índices de peligrosidad'. Una posible caracterización se da en el **Cuadro 6**, la cual tiene por finalidad hacer énfasis en las tres observaciones siguientes: (i) los mapas constituyen una generalización de la

amenaza sísmica, aún cuando en ellos se ignoran los efectos de eventuales fallas cercanas; (ii) la experiencia demuestra que la incorporación de éstas en los denominados estudios de sitio no necesariamente aumenta los valores establecidos en la Norma COVENIN 1756, aún cuando tiene la ventaja de evaluar modelos alternativos y determinar con mas precisión los coeficientes de la fórmula (4); (iii) según la importancia de la obra, o las eventuales consecuencias de su mal funcionamiento, los estudios de peligrosidad o estudios de sitio pueden ser necesarios cualquiera que sea el índice de peligrosidad. Otras acciones sísmicas, directas o indirectas, pueden incorporarse en caracterizaciones más exhaustivas de los índices de peligrosidad.

CUADRO 5  
LOCALIDADES EVALUADAS CON LA ESCALA DE 12 GRADOS,  
COEFICIENTES DE LA FÓRMULA (1) Y VALOR DE  $\Gamma$

NOMBRE DE LA POBLACIÓN O LOCALIDAD	LAPSO DE OBSERVACIÓN (a)	NÚMERO DE EVENTOS	$C_1$	$C_2$	RANGO DE VALIDEZ (b)	VALOR DE $\Gamma$
Barquisimeto	1736-1996	116	2,189	0,589	III-VIII	1,07
Ciudad Bolívar	1766-1998	98	1,799	0,643	III-VI	1,10 <sup>(c)</sup>
Coro	1812-1993	52	0,950	0,423	III-VI	1,25 <sup>(d)</sup>
Cumaná	1530-1998	127	1,258	0,419	III-VIII	1,08
Guanare	1782-1991	41	0,704	0,378	III-VIII	1,44 <sup>(d)</sup>
Güiria	1825-1998	65	1,393	0,464	III-VII	0,90
Maracaibo	1672-1997	140	1,440	0,456	III-VII	1,35 <sup>(d)</sup>
Maturín	1766-1986	33	1,539	0,513	III-VI	1,03
Mérida	1599-1998	285	2,136	0,591	III-VIII	1,03
Puerto la Cruz	1950-1998	18	1,210	0,483	III-VI	0,86
Puerto Ordaz	1957-1998	51	2,110	0,630	III-VI	1,30
San Cristóbal	1597-1998	154	1,771	0,510	III-VII	1,20
San Felipe	1812-1982	18	1,540	0,540	III-VIII	0,93
San Fernando de Apure	1886-1957	4			III-IV	-
Tucupita	1913-1993	32	1,370	0,557	III-VI	0,80
Valencia	1812-1996	85	1,003	0,458	III-VII	1,00

(a) Años del primer y último evento reportado en el catálogo; (b) Rango de valores de IM asignados en la escala de 12 grados; (c) Zonificación de la ribera izquierda del río Orinoco frente a Ciudad Bolívar.

CUADRO 6  
ÍNDICES O NIVELES DE PELIGROSIDAD INFERIDOS DE LOS  
MAPAS DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA Y DE LA FIGURA 2

ÍNDICES DE PELIGROSIDAD	ANTECEDENTES HISTÓRICOS EN ÁREAS HABITADAS	FALLAS MÁS CERCANAS		ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO (gal) (3)	
		Tipo (1)	R (km) (2)	400 a 500 años	~ 1200 a 1500 años
Muy alto	Sismos destructores	A ó B	$\leq 8$	$\geq 350$	$> 500$
Alto	Sismos destructores	A B C ó D	$< 30$ a $40$ $< 15$ a $20$ $< 4$	$\geq 250$	$> 320$
Intermedio	Sismos que han ocasionado algún tipo de daño	A B C ó D	$> 40$ $> 20$ $< 15$ a $20$	$\geq 150$	$> 200$
Bajo	Sismos sentidos. Ocasionalmente daños leves	A B C ó D	$> 180$ $> 100$ $> 20$	$< 150$	$\leq 200$
Zonas cercanas a embalses de mas de 80 m de la columna de agua (4)	Depende de la ubicación. Pueden ser eventos raros antes de la construcción del embalse	Requiere consideraciones sobre la posible sismicidad inducida por el embalse		Máximas acciones sísmicas esperadas en el sitio (5)	

(1) En una determinada localidad, puede darse la condición de cercanía de una o más de las fallas tipificadas; (2) R = distancia epicentral, focos someros; (3) Puede sustituirse por velocidades máximas, ordenadas espectrales u otro parámetro; (4) Según norma COVENIN 1756; (5) Acciones directas o indirectas, según la International Committee on Large Dams (ICOLD)

## 5. CONCLUSIONES

De los ejercicios hechos y tomando en consideración las incertidumbres propias del procedimiento empleado, se constata que la información disponible sobre los efectos de sismos pasados, puede considerarse esencialmente reflejada en los mapas de zonificación sísmica analizados. De la interpretación de la sismicidad se desprende que las ciudades de Maracaibo y Guanare requieren atención en próximas revisiones de los citados mapas.

Como resultado de los cambios constatados en la evaluación de la amenaza sísmica, se propone caracterizar en cuatro grupos las fallas geológicas activas del país, según sus tasas medias de desplazamiento y segmentaciones probables establecidas por los Geólogos. Su incorporación a los valores establecidos en los mapas de zonificación sísmica vigentes en el país, permite identificar cinco índices o niveles de peligrosidad sísmica cuya caracterización se propone en este trabajo.

Caracas, 26 -12-2004

## REFERENCIAS CITADAS EN EL TEXTO

- AUDEMARD, F. (1996). Contribución del Dr. Carlos Schubert Paetow (1938-1994) al conocimiento de la Neotectónica del Caribe; visión crítica de un colega neotectonista. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos*, 21 (2), 23-37.
- BARAZANGUI, M and DORMAN, J. (1969). World seismicity maps compiled from EESA, Coast and Geodetic Survey, epicenter data 1961-1967. *Bull. Seism. Soc. of America*, 59, 369-380.
- BRAZEE, R.J. (1979). Reevaluation of modified Mercalli intensity scale for earthquakes using distance as determinant. *Bull. Seism. Soc. of America*, vol 69, pp 911-924.
- CENTENO GRAÜ, M. (1969). *Estudios sismológicos*. 2ª edic. Vol VIII de la Biblioteca de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas. /La primera edición, del año 1940, se encontraba en revisión por parte de su autor para la fecha de su fallecimiento en Octubre de 1949; el mapa de zonificación sísmica, en vías de ser rehecho sobre un mapa base diferente al de la edición de 1940, fue publicado por vez primera en 1969 con ocasión de la segunda edición de la obra de Centeno/.
- COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES, COVENIN (1982). *Edificaciones antisísmicas*. Norma Venezolana, MINDUR-COVENIN 1756-82. Caracas, 67 p + comentarios
- COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES, COVENIN (2001). *Edificaciones sismorresistentes*. Norma Venezolana, MINDUR-COVENIN 1756-01, Fondonorma. Caracas, 71 p + comentarios + referencias + índice analítico.
- FIEDLER, G. (1961a). Áreas afectadas por terremotos en Venezuela. *Memorias III Cong. Geol. Venez.*, Tomo IV, pp 1811-1814, Caracas.
- FIEDLER, G. (1961b). El gran terremoto de El Tocuyo del 3 de Agosto de 1950 y el fenómeno mecánico en el foco. *Memorias III Cong. Geol. Venez.*, Tomo IV, pp 1787-1790, Caracas.
- FIEDLER, G. y RIVERO, L. (1977). *Mapa sísmico. Principales sismos ocurridos en Venezuela (1530-1975)*. Cartografía Nacional, Caracas. /En 1969, Fiedler publicó: *Mapa de epicentros, superficies de volúmenes sísmicos e isosistas para el período 1530 a 1969*, el cual contiene en un recuadro, las principales fallas geológicas del país. Escala 1:2000000, Comandancia General de la Marina, Instituto Sismológico, MOP-Cartografía Nacional, Caracas./
- GRASES, J., ALTEZ, R. y LUGO, M. (1999). *Catálogo de sismos sentidos o destructores. Venezuela 1530/1998*. Vol XXXIII, Acad. de Cien. Físic., Matem. y Nat., y Fac. de Ing., UCV. Ed. Innov. Tecn., ISBN : 980-6195-06-X, Caracas, 654 p.
- GRÜNTHAL, G. ed. (1998). *European macroseismic scale 1998*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol 15, Conseil de l'Europe, Luxembourg, 99 p.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR EARTHQUAKE ENGINEERING (IAEE) (1996). *Regulations for Seismic Design: a World List*. Tokyo.
- INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING OFFICIALS (ICBO) (1997). *Uniform Building Code, UBC*. Vol 2, Whittier, California.
- INTEVEP (1990). Relaciones de atenuación empleadas en el mapa de zonificación sísmica para la especificación PDVSA JA-221. Informe Interno, El Tambor, Edo. Miranda.
- LIRIO, B.A. (2004). Comparación de los estudios de la amenaza sísmica con la información histórica de sismos en Venezuela en el período 1530-1998,

- en diferentes ciudades del país. Trabajo Especial de Grado, Esc. de Ing. Civil, Fac. de Ing., Universidad Santa María, Caracas, 192 p.
- MALLET, R, and MALLET, J.W. (1852; 1853; 1854). *Third report on the facts of earthquake phenomena. Catalogue of recorded earthquakes from 1606 B.C. to A.D. 1850*. Reports of researches in Science of the British Association for the Advancement of Science. Third report (1852) pp 1-176; idem (1853) pp 118-212; idem (1854) pp 1-326.
- MILNE, J. (1911). *A catalogue of destructive earthquakes A.D. 7 to A.D. 1899*. British Association for the Advancement of Science, Portsmouth Meeting, London, 94 p.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) (1947). *Normas para el cálculo de edificios*. Dirección de Edificios e Instalaciones, Imprenta Nacional, Caracas.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) (1959). *Normas para el cálculo de edificios, 1955*. Dirección de Edificios e Instalaciones, Tipografía Italiana, Caracas, pp 164-171.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) (1967). *Norma provisional para construcciones antisísmicas*. Caracas, 18 p. + mapa.
- MONTESSUS DE BALLORE, F. (1898). L'Amérique Centrale et l'Amérique du Sud Sismiques. *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate*, XI :34, pp 263-277, México.
- PDVSA (1991). Diseño antisísmico de instalaciones industriales, PDVSA JA-221. *Manual de Ingeniería de diseño de PDVSA*. Especialidad 18, 'Estructuras', Caracas.
- RAMIREZ, J.E. s.j. (1975). *Historia de los terremotos de Colombia*. Segunda edición, aumentada y corregida de la primera de 1969. Inst. Geogr. Agustín Codazzi, Santa i.e. de Bogotá, 250 p.
- SCHUBERT, C. and SIFONTES, R. (1970). Boconó fault, Venezuelan Andes: evidence of postglacial movements. *Science*, 170:66-69.
- SUPERINTENDENCIA DE SEGUROS (1989). *Mapa de zonificación sísmica (1:2000000)*. *Tarifa de seguros de terremoto*. Consejo Nacional de Seguros, República de Venezuela, Caracas.
- VILA M.A. (1964). *Nomenclator geo-histórico de Venezuela (1498 - 1810)*. Colección histórico-económica venezolana, Vol X, Banco Central de Venezuela. Harte rafia, Caracas, 501 p.