



CAMBIOS EN LA PERCEPCIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA EN VENEZUELA

Resumen

En esta breve reseña se sintetiza los cambios que ha tenido la percepción sobre la amenaza sísmica en Venezuela desde 1898; destaca la modernización en su cuantificación con posterioridad al terremoto de Caracas de 1967. El criterio según el cual la evaluación de la amenaza consiste en identificar áreas ya afectadas por sismos sucedidos en tiempos históricos, válido hasta hace unos 40 años, ha sido ampliado a la cuantificación probabilista según modelos sismotectónicos de las acciones sísmicas esperadas, tanto temporales como permanentes. Con relación a las temporales, el empleo rutinario de los espectros de respuesta e historias de aceleraciones del terreno, ha ganado espacio gracias a la progresiva incorporación de profesionales e investigadores a esa nueva disciplina que es la Ingeniería Sismorresistente; sobre las acciones permanentes, ha habido una toma de conciencia, en particular sobre el cruce de fallas activas por líneas de vida, que se ha traducido en medidas preventivas, algunas de las cuales se ejemplifican en este artículo. Lo anterior explica la multiplicidad de iniciativas y autores venezolanos, de los cuales aquí solo se menciona una pequeña fracción. Finalmente se describen casos que ilustran la aplicación de una más objetiva cuantificación de esa amenaza natural con fines preventivos y cuantificación de la confiabilidad de sistemas. En particular se señala la necesidad de actualizar y validar los documentos normativos.

Palabras clave: amenaza sísmica; influencia del subsuelo; historia ingeniería sísmica; normalización; Venezuela.

■ José Grases G.

Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y
Naturales. Caracas, DC. Venezuela.

jgrases@gmail.com

Fecha de Recepción: 17 de enero de 2008

Fecha de Aceptación: 29 de abril de 2008

CHANGES IN THE PERCEPTION OF SEISMIC HAZARD IN VENEZUELA

Abstract

This paper summarizes changes of the perception of seismic hazard of Venezuela since 1898. Previous to the 1967 Caracas earthquake, such perception was based on the identification of areas historically affected by past events. Along the last 40 years, seismic hazard is quantified by means of the probabilistic analysis of seismic-tectonic models; in this way, short time dependent actions as well as permanent ones are evaluated. With relation to site dependent effects, the use of time histories of accelerations and normalized response spectra has gained space thanks to progressive incorporation of engineers and researchers in this new discipline. This explains the enrichment of initiatives by Venezuelan authors from which only a small number is mentioned along the paper. Finally brief descriptions of applications are given in order to illustrate preventive measures related to safer earthquake engineering decisions, as well as seismic reliability analysis of systems. Updating of seismic design codes reveals to be paramount, particularly through new available seismic hazard evaluation results.

Seismic hazard; influence of soil conditions; earthquake engineering history; codes; Venezuela

1. Antecedentes y alcance

Como consecuencia del terremoto de 1812 se pide opinión a la Diputación de Cumaná sobre las medidas más convenientes para que las construcciones de la época pudieran resistir nuevos sismos. Estas, resumidas en el llamado ‘Reglamento de Policía’ destinado a la reconstrucción de viviendas, están entre los antecedentes más antiguos en Venezuela sobre medidas para mitigar la acción vibratoria del terreno. Fueron solicitadas a las autoridades de la región del país que se consideró más experimentada en la materia, lo cual es un reflejo de la percepción sobre la mayor peligrosidad sísmica del oriente del país que aún subsiste. También puede

citarse el testimonio de observadores según los cuales, en sismos anteriores al siglo XX, ciertas áreas urbanizadas fueron más afectadas que otras como consecuencia de sismos destructores. En la (Nota 1) se citan los trabajos pioneros de Ernst con ocasión del terremoto que arruinó Cúa el año 1878.

Veinte años después, se publica en México en México el primer mapa de zonificación sísmica del territorio que hoy es Venezuela. Fue obra de un pionero de lo que en su época se denominaba la ‘geografía sísmica’, primeras consideraciones formales sobre la amenaza sísmica [50] (Figura 1). Ese mapa, desconocido en nuestro medio hasta fines del siglo XX, al igual que las observaciones de campo citadas más arriba, no alcanzaron a ser de utilidad práctica en nuestra Ingeniería Estructural.

En este trabajo se hace énfasis en las implicaciones que el Terremoto Cuatricentenario de Caracas (29 de julio de 1967) tuvo en la evaluación de la amenaza sísmica y sus aplicaciones; el mismo puede considerarse dividido en tres grandes partes: (a) contribuciones y Normas hasta 1967; (b) Normas COVENIN y especificaciones con fines de diseño sismorresistente hasta el presente; (c) aplicaciones para la reducción del riesgo sísmico, con énfasis en los estudios de sitio. La primera parte, Sección 2, facilita la comprensión de las dos siguientes.

2. Contribuciones y normas hasta 1967

2.1. Mapas de las Primeras Normas

En las décadas de los años 30 y 40 del siglo pasado se publican en Venezuela algunos trabajos dirigidos a mitigar los efectos vibratorios generados por los sismos; destaca entre ellos la tesis de Juan Francisco Stolk, en la cual se dan recomendaciones constructivas especialmente dirigidas hacia la mampostería reforzada, aún válidas [68]. Si tuvieron repercusión, fue de ámbito muy limitado; algo similar puede decirse sobre otras recomendaciones hechas públicas en el país a comienzos del siglo pasado (Nota 2).

En 1939, el Ministerio de Obras Públicas promulgó la primera Norma para el Diseño de Estructuras [54]. En su Capítulo 2, Art. 7, N° 31, se establece lo

siguiente: “Es necesario estudiar la estabilidad de las edificaciones contra los movimientos sísmicos, debiéndose comprobar dicha estabilidad en aquellos edificios de más de tres pisos en todo el país y, en particular para las regiones montañosas de los Andes y la costa, se hará en todos los casos”. Es decir, que: ‘...las regiones montañosas de los Andes y la costa’ reflejan la percepción de una elevada amenaza sísmica en ese entonces.

Este documento fue sustancialmente ampliado y, por resolución N° 2 del Ministerio de Obras Públicas del 23 de agosto de 1947, se declara oficial con carácter de: “Normas para el Cálculo de Edificios” [47]; estas se promulgan por disposición de la Junta Revolucionaria de Gobierno, por ser: “... la práctica usual del Ministerio”. En este documento se establece la acción de los movimientos sísmicos, con el mapa de zonificación sísmica del país que se reproduce en la Figura 2a. Destacan allí tres aspectos: (i) el mapa de zonación sísmica recién mencionado no refleja lo que ya se había publicado en el país sobre sismos históricos, especialmente el contenido de la obra de Centeno Graü, Estudios Sismológicos, editado en Caracas el año 1940; (ii) por vez primera se establecen coeficientes sísmicos de diseño función de las zonas sísmicas del mapa; los mayores en el oriente de país; (iii) se dan criterios para la repartición de las fuerzas cortantes actuantes en la base de edificaciones de más de un nivel (Nota 3).

Antes de referirnos a las Normas MOP en su versión de 1955, no puede omitirse un hecho que llama la atención. Es el aparente desconocimiento de la obra del Dr. Centeno Graü, quien fuera: destacado Ingeniero Civil, Decano de la Facultad de Ingeniería de la UCV, académico de renombre pues además de fundador de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales fue su presidente entre los años 1945 y 1947 (Nota 4).

A finales de los años 40, en otros países ya se manejaba un amplio bagaje de conocimientos sobre esta nueva disciplina; de ello ha quedado constancia en publicaciones norteamericanas y europeas que eran de aparición periódica. Entre los múltiples aportes que dejaron huella, se debe señalar aquí la síntesis de la experiencia japonesa hecha por Suyehiro, ingeniero japonés algo olvidado, en un

ciclo de conferencias que dictó en California [70] y que sin duda tuvo repercusiones en el primer código sísmico de la ciudad de Los Ángeles en 1933 (Nota 5); la promulgación de este documento, probablemente fue precipitada por el sismo destructor del 10 de marzo de ese año en el área de Long Beach, cercana de Los Ángeles. Esa normativa, modificada en 1943, fue adoptada por el MOP en 1947. También deben señalarse las contribuciones de Westergaard [74], Biot [10], así como la de Housner [34], y tantas otras que sería largo enumerar. El resultado de estas contribuciones modificó la vieja percepción de la ‘geografía sísmica’, pues el problema de la amenaza sísmica, en adición a la identificación de zonas riesgosas, se centró en la forma de cuantificar sus acciones vibratorias con fines de ingeniería. Este nuevo enfoque, resultado de la necesidad de ingenieros proyectistas y constructores, fue sintetizado en un documento pionero en estos temas presentado por el Comité Conjunto SEAONC- ASCE; en él se incorpora por vez primera, los espectros de respuesta y fórmulas simplificadas para la estimación de períodos de vibración de edificaciones de cierta altura, proposición publicada en 1949 [62] (Nota 6).

Tal como se explica en la recién mencionada Nota 6, las ideas recién mencionadas fueron conocidas en Venezuela y no tuvieron acogida. Prueba de ello es que en 1955, el MOP modifica con pocos cambios la versión de la vieja Norma del año 1947 y se publica cuatro años después [48]. Las acciones sísmicas sufren modificaciones discretas y el mapa de zonación es actualizado (véase la Figura 2b); el mapa aprobado en 1955 amplía las áreas de mayor peligrosidad, como consecuencia de los efectos de sismos ocurridos en los Andes y El Tocuyo, y suprime las áreas de la frontera sur del país, erradamente supuestas como sísmicas en la versión anterior del mapa.

2.2. Inicio de la Sismología Instrumental en el País

A mediados de los años 50 el Dr. Günther Fiedler es invitado a incorporarse al observatorio Cajigal para hacerse cargo de la interpretación de los registros sismográficos; ya a partir de 1959, Fiedler da inicio a la publicación mensual de los Boletines del Cajigal los cuales aparecieron en for-

ma ininterrumpida hasta 1978. Por su formación e inquietudes, estudia las descripciones conocidas sobre los grandes sismos venezolanos [23] e inicia la elaboración de un mapa de zonación más realista que los anteriores del MOP. Intercambia información con geólogos y, en la versión del mapa que se hará pública poco después del sismo de 1967 (Figura 3), es fácil reconocer que en adición a lo que se sabía sobre la historia sísmica del país desde inicios del siglo XVI, Fiedler también tomó en consideración la información tectónica conocida en esa época, así como la interpretación hecha por él de los registros sismográficos de eventos sucedidos en territorio venezolano durante la década anterior; vistos los efectos constatados en diferentes áreas, urbanizadas o no, al tipo de subsuelo se le da cierta importancia.

De modo que este último mapa, incluido en la Norma Provisional del MOP [49], ya refleja un progreso con relación a todos los mapas que le preceden, pues en los anteriores la amenaza sísmica con fines de Ingeniería Estructural está exclusivamente sustentada por los efectos conocidos de sismos pasados; es decir, esos mapas debían ajustarse a los efectos de nuevos sismos, con lo cual perdían su carácter preventivo.

Debe destacarse aquí que dos años después del sismo de 1967 y por iniciativa de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, se publica la edición post mortem de Estudios Sismológicos del Dr. Melchor Centeno Graü; acompaña esta segunda edición, un nuevo mapa de zonación posiblemente inconcluso cuando llega el fin de sus días en octubre de 1949 (véase la Nota 4). En ese mapa, la región de Caracas ya estaba señalada como de máximo peligro, coincidente con el desconocido mapa de Montessus del año 1898 (Figura 1) y con el recién aprobado de Fiedler.

El sismo de 1967 despierta interés en el mundo académico. Además de los trabajos relacionados con los efectos en edificios de varios niveles de Caracas y Caraballeda, así como los efectos del subsuelo, se dan a conocer los resultados de estudios sobre aspectos de la amenaza sísmica en diferentes áreas del país: Sardi [61]; Fiedler [24] y [25]; Bergeret [9]; Lustgarten [43]. Son manifestaciones de una inquietud que se materializó con la creación de FUNVISIS en 1972.

2.3. Información Tectónica sobre la Región

Centro-Norte del País

El interés por la tectónica de la región centro-norte del país es comprensible pues en ella se encuentra ubicada su capital. Entre los primeros estudios deben citarse los de los Geólogos Pedro I. Aguerreverre (1925) [2] y Santiago E. Aguerreverre (1932) [3]; años después se publica la muy completa interpretación sobre la neotectónica del norte de Venezuela [60].

En el órgano de divulgación de la Unión Americana de Geofísica, *Journal of Geophysical Research*, se publica en 1968 un vasto estudio ('a comprehensive study') sustentado por 155 contribuciones de especialistas en geología, tectónica, geofísica, sismología, gravimetría, batimetría y otras disciplinas, cuyo resultado final es el ensamblaje de la información sismológica y de tectónica activa conocida en ese momento. Ese trabajo [37], valida la teoría de la deriva de los continentes postulada por Alfred Wegener a inicios del siglo XX. Según ella, la región centro-norte de Venezuela es zona de interacción de dos placas tectónicas: la del Caribe, que se desplaza hacia el este, respecto a la de América del Sur que se traslada hacia el oeste.

Esto no hizo sino despertar el interés de geólogos y geofísicos, y poco después comienzan a publicarse trabajos relacionados al tema de la correlación sismo-tectónica entre los cuales es pionero el de Fiedler en 1970 [25]. Pocos años después destaca el valioso empeño del Dr. Carlos Schubert por una mejor comprensión de la tectónica del área; entre sus contribuciones se señalan [63], [64], [65], [66] y [67].

Con todo, el umbral de registro instrumental de sismos seguía siendo alto, razón por la cual durante años solo queda constancia de una fracción de los eventos sísmicos. En las Figuras 4a y 4b se compara la sismicidad del área en dos lapsos consecutivos: 1955-1982 y 1982-1996, respectivamente, cambio esencialmente atribuible a una mejor red de registro sismográfico en fechas más recientes. También se aprecia al comparar esas dos figuras una más completa información tectónica, en buena medida resultado de la compilación del geólogo Carlos Beltrán a escala 1:2.000.000 [28].

3. Normas covenin y especificaciones para el diseño sismorresistente

3.1. Antecedentes

No es el momento de una revisión sobre esta parte de nuestra historia reciente; en la Nota 7 se mencionan algunos de los trabajos que contribuyeron en la fase de preparación de las nuevas normas. Sí corresponde destacar aquí, por ser tema de esta reseña, que el primer mapa con fines de aplicación en proyectos de Ingeniería, con un sustento probabilista, puede considerarse resultado de tres acciones complementarias: (a) las iniciativas que surgieron en el Curso Multinacional de Postgrado a Nivel de Maestría en la UCV, iniciado en 1973 y que ha perdurado sin mayores interrupciones; (b) la síntesis sismo-tectónica del país organizada y explicada por el Profesor Virgil Winkler, en el curso pionero que sobre esa materia dictó desde 1973 en el seno de la Maestría recién mencionada, complementado por la inquietud de investigadores sobre la tectónica del país como Carlos Schubert, Alirio Bellizia, Günther Fiedler y otros; (c) los trabajos hechos en el seno de FUNVISIS por Jean Pierre Soulas, André Singer, Omar Pérez, Yash Aggarwal y otros.

El mapa resultante sustentado por el análisis de un 'modelo sismotectónico', si se quiere aún primitivo, arrojó curvas de isoaceleraciones máximas del terreno para períodos medios de retorno de 475 años (10% de excedencia en 50 años), siguiendo las pautas establecidas en el ATC-3, 1978.

3.2. La primera Norma COVENIN 1756

Es preciso señalar aquí, que esa cuantificación novedosa de la peligrosidad sísmica explicada en el párrafo anterior, se encontraba en cierta forma presionada por los resultados de la exhaustiva revisión que sobre los criterios de análisis y diseño sismorresistente fueron adelantados en norteamérica con posterioridad al terremoto destructor de San Fernando, Los Ángeles, en febrero de 1971. Para ello los profesionales de ese país fundaron el Applied Technology Council (ATC), cuerpo técnico del más alto nivel, aún en funciones, que elaboró el documento conocido como ATC-3 y cuya versión del año 1978 fue estudiada en nuestro medio. El formato y esquema final de la Norma COVENIN 1756, muy

ceñido a esa 'mamá de Normas' como bautizáramos el ATC-3, solo se lograba, con todas las limitaciones del caso, con una cuantificación probabilista de la amenaza sísmica. La versión del mapa con fines de ingeniería, delimitó las zonas sísmicas ciñendo en lo posible, las curvas de isoaceleración a la división política del país (Figura 5).

La aplicación con fines de diseño de este mapa y algunas de sus limitaciones, se dan en el Comentario de la Norma COVENIN 1756 del año 1982, documento en el cual aparece por vez primera. Su validación aproximada con la historia sísmica conocida fue discutida en el III Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica (Caracas, 1981) y publicado como Nota Técnica por FUNVISIS años después [30].

Otros documentos y especificaciones con un sustento similar fueron aprobados por EDELCA [20], CADAFE [11], Metro de Caracas [45], La Electricidad de Caracas [20] y otros. Destaca entre estos el mapa elaborado en el IMME, UCV, para el diseño sismorresistente de puentes, en respuesta a la solicitud hecha por el Profesor William Lobo Quintero, ponente de la propuesta para una novedosa Norma sobre este tema [42] (Figura 6).

En 1991 la Industria Petrolera actualiza su Manual de Ingeniería de Diseño. Incorpora por vez primera especificaciones para el diseño y la evaluación sísmica de instalaciones de esa industria. En las especificaciones, las acciones sísmicas deben determinarse en función de las posibles consecuencias del malfuncionamiento de una determinada instalación; el riesgo aceptado viene definido por la probabilidad de excedencia de los movimientos del terreno durante la vida útil asignada a dicha instalación [55]. La variedad de riesgos, así como la extensión de áreas ya ocupadas por la industria y otras en proyecto, requirió presentar los resultados según un formato versátil, según el cual la probabilidad de excedencia en t años, $(P_{e,t})$, del movimiento máximo del terreno (a_0) quedó expresado como:

$$P_{e,t} = 1 - \exp\{-t (a_0/a^*)^{-\gamma}\} \quad (1)$$

Donde a^* y γ son dos parámetros que caracterizan la amenaza sísmica en una localidad determinada.

Elaborados los mapas de iso-valores de a^* (gal) y γ (adimensional) para el país, mapas que acompañaron la correspondiente especificación JA-221, el valor de a_0 se obtiene de la fórmula (1) como:

$$a_0 = a^* \left\{ \frac{1}{t} [-Ln(1 - Pe, t)] \right\}^{-1/\gamma} \quad (\text{gal}) \quad (1a)$$

donde los valores de a^* y γ son leídos en los mapas correspondientes.

3.3. Actualización del Mapa de Zonación

A inicios de los años 90 y por iniciativa del entonces presidente de FUNVISIS, Ing. Cesar Hernández A., se emprende la revisión de la Norma COVENIN 1756. Un conocimiento más amplio de la sismotectónica del país, así como información recabada sobre sismos que alcanzaron a generar algún tipo de daño (San Antonio del Táchira en octubre de 1981, Boca del Tocuyo en abril de 1989, Curarigua en agosto de 1991, Cariaco en julio de 1997) y una más amplia estadística de registros a nivel mundial, dieron pie a la actualización del mapa de zonificación sísmica de la citada Norma COVENIN; este se elaboró en 1998 y se incorporó sin cambios en la versión de la Norma vigente desde 2001 (Figura 7).

A diferencia de los primeros mapas de zonificación, los procedimientos empleados en la cuantificación de la amenaza sísmica a largo de los últimos 25 años, ha traído como resultado que extensas áreas del país en las cuales se exigen acciones sísmicas de diseño relativamente severas, por razones de ausencia de registro escrito, no cuentan con evidencias históricas sobre afectación por sismos. Tal es el caso por ejemplo, del área de Jose (Hose) ubicada en la costa norte del estado Anzoátegui; aún cuando no se tiene conocimiento de sismos que hayan afectado esa área costera, que aisladamente justifiquen ese pronóstico, la existencia de fallas geológicas reconocidamente activas en su entorno conduce a acciones preventivas equivalentes a las de la región de Caracas. Los criterios de diseño establecidos 15 años atrás no han sido puestos a prueba; no obstante, se considera que esas medidas preventivas aseguran una adecuada confiabilidad en el desempeño de estructuras y condiciones de operación, de costosas inversiones hechas en esa región de Venezuela.

En la Tabla 1 se comparan algunos de los valores obtenidos con sustento probabilista entre 1982 y 2001.

TABLA 1
ALGUNOS DE LOS DOCUMENTOS EN LOS CUALES SE ESTABLECE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL PAÍS CON SUSTENTO PROBABILISTA

DOCUMENTO (Año de aprobación)	RIESGO BASE DE a_0 ⁽¹⁾	FACTORES DE IMPORTANCIA α	NÚMERO DE ZONAS ⁽²⁾	COMENTARIOS
COVENIN 1756 (1982)	475	1.0; 1.25	4	Máximo valor de a_0 = 0.3g
EDELCA (1984)	~1.300	1.0	3	Máximos valor de a_0 = 0.5g
CADAFE (1985)	~1.300	1.0	3	Máximo valor de a_0 = 0.5g
PUENTES (1987)	650	1.0; 1.25	4	Máximo valor de a_0 = 0.4g
JA-221 (1991)	Variable	--	--	Función del Riesgo Adoptado
COVENIN 1756 (1998 = 2001)	475	1.0; 1.15; 1.30	7	Máximo valor de a_0 = 0.4g

(1) Periodo medio de retorno en años, para $\alpha = 1.0$; (2) Excluida la Zona 0

4. Estudios de sitio y aplicaciones para la reducción del riesgo sísmico

4.1. General

Los mapas de zonificación deben entenderse como una generalización de la amenaza sísmica. En las versiones que empleamos actualmente, las áreas de mayor peligrosidad incluyen fuentes sísmogénicas en las cuales predominan eventos con hipocentros someros, sin que esto sea indicado de manera explícita. Por tanto una cuantificación más realista debería incorporar la ubicación y actividad esperada de tales fuentes, por ejemplo en la forma establecida en la última versión del UBC [36].

El empleo de mapas generalizados como los recién mencionados, puede no ser adecuada en casos particulares que requieran minimizar los riesgos de excedencia ó en los cuales sea necesario que los análisis se hagan en el dominio del tiempo. Se justifican allí los llamados *Estudios de Sitio* que cuantifican: (i) la contribución explícita de las fuentes sísmogénicas, cercanas o distantes, para niveles de excedencia de los movimientos máximos del terreno preestablecidos; (ii) las características de las historias de aceleración, que faciliten la generación o selección de acelerogramas representativos de los movimientos esperados; (iii) otras acciones sísmicas, temporales o permanente, a considerar en el proyecto.

4.2. La Influencia del Subsuelo

De acuerdo con las Normas vigentes, la acción sísmica a ser empleada es el resultado de multiplicar las ordenadas de espectros medios normalizados, por el valor de la aceleración máxima del terreno. Se asigna a esta última la incertidumbre asociada al pronóstico de las acciones de diseño; aquella asociada a los espectros medios normalizados, igualmente importante, no se menciona en las Normas.

Los espectros medios normalizados dependen de las condiciones locales del subsuelo. Sus efectos en áreas urbanas se han constatado en numerosos sismos, entre otros los que se mencionan como antecedentes venezolanos al comienzo (Nota 1). También la acción vibratoria debida a sismos ha

puesto de manifiesto particularidades geotécnicas que requieren evaluación como son los fenómenos de pérdida de capacidad portante debido a la licuefacción de suelos saturados [4] o amplificaciones no contempladas en normas ya obsoletas (Nota 8).

4.3.- Contribución de Fuentes Cercanas o Distantes

Tal como se indica en la Tabla 1, para factores de importancia $\alpha = 1.00$ el período medio de retorno empleado para seleccionar los valores de a_0 en las Normas COVENIN vigentes es igual a 475 años; es decir, una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años de vida útil de la estructura. En general, para los niveles de aceleración establecidos, a esa probabilidad contribuyen diversas fuentes sísmogénicas: unas más cercanas que otras, distinción que es necesaria en la evaluación de la vulnerabilidad de cierto tipo de obras.

Viene al caso citar como ejemplo, la contribución de fuentes sísmogénicas en las aceleraciones de diseño para edificaciones en áreas del Bajo Caroní: los sismos cercanos, de fuente muy somera, con magnitudes esperadas en el orden de M_s 5 a 5.5, de pocos segundos de duración, contribuyen prácticamente por igual que otras fuentes distantes, con magnitudes M_s hasta de 7.8 y duraciones esperadas de varias decenas de segundos. Son dos tipos de 'escenarios sísmicos' posibles, con probabilidades similares de ocurrencia y que, por las diferencias de sus efectos esperados, deben ser considerados en la evaluación de obras vulnerables a la duración de las vibraciones del terreno como puede ser el caso de ciertas obras de tierra (Nota 9).

4.4. Cruce de Fallas Activas

Esta es una de las acciones sísmicas de naturaleza permanente, a la cual se ha prestado atención creciente en nuestro país al establecer los criterios de diseño preventivo de obras de infraestructura como son: líneas férreas, puentes o viaductos, tuberías de aducción de agua potable o de gas, etc. En estos casos, la interacción con geólogos especializados en neotectónica resulta fundamental.

Viene al caso citar un terremoto que, aún cuando foráneo, es excepcional y de fecha reciente; a

puesto a prueba las medidas de prevención sísmica establecidas un cuarto de siglo antes de que sucediera el evento. Se trata del Trans-Alaska-Pipeline (TAP), que cruza Alaska desde la bahía de Prudhoe al norte hasta puerto Valdez al sur; es un poliducto de 1287 km de longitud y de 1.2 m de diámetro, con capacidad para transportar un millón de barriles de petróleo diarios. A lo largo de su recorrido, el TAP cruza la falla de Denali en la cual se anticipan desplazamientos permanentes del terreno hasta de 9 m para eventos de magnitud extrema. En su diseño se establecieron medidas muy estrictas para limitar accidentes que pudiesen afectar la ecología de la región.

En noviembre de 2002, la citada falla de Denali generó un sismo de magnitud 7.9, con rotura visible en superficie de 340 km de extensión y que cruzó la línea del TAP. El desplazamiento permanente en los 200 m de ancho que tiene la zona de intersección de la tubería con la falla, alcanzó 5.5 m. Revisada la línea en esa zona y las adyacentes, se constató que la mayoría de los daños menores que sufrió, tanto por vibraciones del terreno hasta de 0.36g como por el desplazamiento permanente señalado sobre patines 'ad-hoc', ocurrieron en una banda de unos 1000 m a cada lado de la falla [33]. De modo que, unas 14 horas después del sismo, concluida la revisión y pequeños ajustes necesarios, se reiniciaba la operación del sistema; o sea, que el sistema respondió a un sismo severo, según lo previsto en las medidas preventivas incorporadas en su diseño y cuyos lineamientos fueron publicados 27 años antes del evento descrito [52] (Nota 10).

El caso recién descrito contrasta con los efectos de los sismos del 5 de Marzo de 1987 que afectaron la Provincia de Napo, Ecuador, eventos que ocasionaron disrupción en la exportación de petróleo durante meses. Por las razones que se dan en la (Nota 11), este evento sísmico dio lugar a pérdidas económicas cercanas a un millardo de US\$, lo cual representó una pérdida importante para ese país.

4.5. Estudios de Sitio

Estudios de esta naturaleza se iniciaron en nuestro país hacia finales de los años 70. Entre ellos cabe citar: la evaluación sísmica de tres sitios para la instalación de un astillero; los criterios de diseño para la expansión de la planta termo-eléctrica de

Tacoa en Arrecifes (Edo Vargas); el cálculo de las tensiones esperadas en una tubería submarina de aducción de agua potable de gran diámetro, por el cruce de una falla geológica activa; la evaluación de la seguridad a sismos de instalaciones petroleras; la respuesta de equipos de S/E de extra-alta tensión (800 KV). Más recientemente y también con fines preventivos, pueden citarse otras iniciativas como son: la cuantificación de la amenaza sísmica para la verificación de la seguridad del nuevo viaducto ubicado sobre la quebrada de Tacagua, o los cambios previsibles en la amenaza sísmica como consecuencia de la sismicidad inducida por el llenado de grandes embases.

4.6. Adecuación de Edificaciones y Obras de Infraestructura

La adecuación de edificaciones, sean de vivienda ó esenciales como es el caso de hospitales y centros de salud, se ha beneficiado de las nuevas normativas, ocasionalmente complementadas con estudios de sitio.

De igual modo y tal como se indicó más arriba, la industria petrolera ha dedicado esfuerzos dirigidos hacia la adecuación de sus instalaciones con el fin de reducir a valores tolerables el riesgo de malfuncionamiento. Destaca entre estas acciones, modificaciones hechas al dique de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM), principalmente por su vulnerabilidad a grandes sismos distantes en las condiciones en las cuales se encontraba a inicios de la década de los años 90. Para una descripción más detallada del caso, véase: [18].

4.7. Evaluaciones de la Confiabilidad Estructural

Es sabido que la cuantificación de la seguridad de estructuras o instalaciones a acciones inciertas como son las sísmicas, requiere el reconocimiento de la naturaleza probabilista de acciones y capacidades. En forma sencilla la probabilidad de alcanzar el estado E, en un tiempo t, se puede expresar como:

$$P [E,t] = \sum P [E/A_i, t] \times P [A_i, t] \quad (2)$$

Donde $P [E/A_i, t]$ representa la vulnerabilidad a la acción A_i y $P [A_i, t]$ es una medida de la amenaza sísmica. Por ejemplo si A_i representa el rango de aceleraciones entre los valores a_{i-1} y a_i , la probabilidad de que A_i suceda en t años, se puede expresar a partir de la fórmula (1) como:

$$P [A_i, t] = \exp \{ -t (a_i / a^*)^{-\gamma} \} - \exp \{ -t (a_{i-1} / a^*)^{-\gamma} \} \quad (3)$$

Ejercicios en esa dirección han sido publicados, entre otros, por: Marinilli [44] y Barreiro, [6].

4.8. Confiabilidad de la Operatividad de Sistemas

Entre los estudios hechos en Venezuela sobre la operatividad de sistemas, puede citarse el estudio de una parte del sistema de aducción de agua potable a Caracas desde los Valles del Tuy. Este, denominado Tuy II y ubicado en un área históricamente afectada por sismos localmente destructores, está conformado por un conjunto de elementos en serie con muy limitada redundancia. Su evaluación fue hecha en los años 90 y los resultados publicados en: [32].

4.9. Sistemas de Disipación de Energía Sísmica

En casos particulares, resulta conveniente controlar los eventuales daños estructurales por medio de dispositivos 'ad-hoc' que actúan como fusibles; es decir, sistemas que se deforman en el rango inelástico sin mayor pérdida en la capacidad portante. De este modo se limitan las máximas fuerzas cortantes transmitidas a los apoyos.

Este es el principio empleado en los tableros de los viaductos de grandes vanos de la línea férrea Caracas – Valles del Tuy, con el fin de reducir las fuerzas cortantes en pilas de más de 60 m de altura. El sustento analítico y experimental de este novedoso sistema aplicado por el Profesor Robert Pérez, director de PSN Ingeniería, se describe en [57]. Se señala allí que en la evaluación de la respuesta dinámica del sistema, se emplearon acelerogramas representativos de los resultados que arrojaron los estudios de amenaza sísmica de la región, tanto para eventos de fuente cercana como aquellos de fuente distante, lo cual condiciona: las aceleraciones máximas del terreno, la duración del registro y su contenido frecuencial. Se señala igualmente

en el trabajo, que se diferenciaron los sismos de verificación con períodos de retorno de 50 años, de aquellos de diseño cuyos períodos medios de retorno son iguales a 900 años.

5. Comentario final

Este escrito recoge parte de la historia e iniciativas de un aspecto esencial en la Ingeniería Sismo-resistente, como es la percepción y cuantificación de la amenaza sísmica para el caso particular de Venezuela. Sin duda el Terremoto Cuatricentenario de julio de 1967 marca un antes y después. Una medida de su trascendencia entre nosotros, obviamente también influenciada por el desarrollo mundial de esa nueva disciplina, es la multiplicidad de iniciativas y autores que participan en ella, de los cuales aquí solo se ha citado una pequeña fracción. En una forma u otra, los profesionales de la ingeniería sustentan sus decisiones e investigaciones en los resultados de los estudios de amenaza, todo ello encaminado a la reducción del riesgo asociado a inevitables sismos futuros.

Los pronósticos implícitos en las cuantificaciones hechas sobre esta amenaza de la naturaleza, requieren revisión periódica, con el fin de incorporar nueva información para su validación; el trabajo de Bedito de Santiago [8], es uno de los que señala esa dirección. Su incorporación en los documentos normativos, tiende a minimizar el riesgo de situaciones catastróficas como las descritas en la (Nota 8) de esta reseña.

6. Notas

Nota 1: Según las crónicas de la época, el llamado terremoto de San Bernabé de Junio de 1641, afectó más las partes altas de Caracas. De igual forma, se señala que el terremoto del 26 de Marzo de 1812, tuvo efectos moderados al sur-oeste de esa ciudad, hacia lo que es hoy San Juan y la plaza Capuchinos. Deben citarse aquí las observaciones del Prof. A. Ernst con ocasión del sismo que arruinó Cúa en Abril de 1878. Los efectos locales que este naturalista describe, publicados en revistas de prestigio en esa época [21] y posteriormente recogidas en el Boletín del Ministerio de Obras Públicas, se considera como los primeros trabajos de campo en áreas afectadas por sismos, hechos en el país [22].

Nota 2: Entre las contribuciones publicadas en el lapso señalado cabe citar a Vizcarrondo [73], Centeno Graü [14] y [15], Kulik [39]. Uno de los trabajos bien documentados para esas fechas, fue la mencionada tesis de Juan Francisco Stolk para optar al título de Doctor en Ciencias Físicas y Matemáticas en la UCV [68]. Parte de sus recomendaciones y dibujos, aplicadas en varios países ribereños del Caribe, así como las que hiciera Vizcarrondo se comentan en [31], p 41-43.

Nota 3: Las necesidades de la época no requerían métodos para el análisis de estructuras de muchos niveles. Sobre este problema ya se había publicado en Norteamérica, la contribución pionera de Westergaard para el análisis dinámico de edificaciones de varios niveles [74].

Nota 4: Además de sus inquietudes por el conocimiento sobre algunos fenómenos naturales, como fueron los sismos y el relámpago del Catatumbo, Centeno también se interesó por los problemas del concreto armado aún cuando no vinculado al tema sísmico, lo cual hubiese sido algo excepcional en esa época [13] y [12]. También mantuvo una vida activa como servidor público durante el gobierno del general Juan Vicente Gómez, pues ocupó cargos relevantes: diputado por el estado Monagas (1914), Ministro de Hacienda (1922-1929) y de Obras Públicas (1932), Senador por Carabobo (1931), Director del Banco Obrero (1933) (Fundación Polar, 1997); acaso esto haya influido en una menor difusión de su aporte en el área de la sismología. La obra del Dr. Centeno cobra relevancia después del terremoto de 1967, cuando el Dr. Guillermo Zuloaga, miembro de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, rescata los originales de la segunda edición en la cual venía trabajando su autor y logra se publiquen como Volumen VIII de esa Academia en 1969.

Nota 5: Suyehiro fue invitado a California a dictar conferencias sobre sus experiencias; estas se publicaron en los Transactions del ASCE, con notable detalle [70]. Entre otras iniciativas, este Ingeniero japonés describe allí un equipo construido por él, que constaba de un conjunto de sensores de registro simultáneo del movimiento del terreno, cada uno de ellos con período diferente y amortiguamiento similar. Por tanto, lo que realmente había diseñado era un espectrógrafo, en el cual quedaban registradas las respuestas máximas de osciladores con diferentes períodos de vibración, para un determinado movimiento sísmico. Concluyó que en las partes bajas de Tokio, predominaban los movimientos de período largo en comparación con las partes altas de esa capital donde las sacudidas eran de período más corto [51]. En los comentarios del Profesor Charles Richter al referenciar la publicación del ASCE sobre las conferencias de Suyehiro, las califica como: 'Of much more than engineering interest, and highly informative', página 12, y 'A valuable general discusión, with many specific illustrations from Japan', página 102, ambas son citas de su obra aún vigente [59].

Nota 6: El trabajo de Housner del año 1947, citado como contribución

pionera de los espectros de respuesta, fue un procedimiento propuesto por H. Benioff en 1934, en el mismo Bull. of the Seism. Soc. of Amer., vol. 24, bajo el título: 'The physical evaluation of seismic destructiveness'. Una diferencia sustancial estriba en que Housner dispuso de registros como los de El Centro del año 1940 y de otros que posteriormente incluye en trabajo que suscribe conjuntamente con Alford y Martel en 1953, sustento de las Normas del SEAOC. Esa nueva cuantificación de la amenaza sísmica, en términos de espectros de respuesta elástica, no coincidía con la percepción de nuestros profesionales. Prueba de ello, es que no se atendió la propuesta que los ingenieros Julián De La Rosa y Oscar Urreiztieta publicaron en 1953, en tres números consecutivos de la Revista del CIV; en su presentación, los autores dejan constancia al inicio de ese largo documento que: "Las fuerzas por sismo que incluye el documento, están basadas en The Lateral Force Code, del Joint Com. of the Struct. Eng. Assoc. of North. Cal, SEAONC and the San Francisco, ASCE Cal. Sec." (SEAONC-ASCE, 1951). Ese documento recoge la aplicación práctica de los espectros, cuya propuesta original apareció en: Engineering News Record, 01-12-1949, pp 28-29.

Nota 7: Pocos días antes del sismo del 29 de Julio de 1967, se celebraban en Caracas dos eventos técnicos conjuntamente: las XII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y el III Simposio Panamericano de Estructuras. Sobre el tema que aquí se comenta, tienen relevancia las ponencias presentadas por el Prof. Luís Esteve de la UNAM, México, importancia y trascendencia progresivamente comprendidas. Señalaban el inicio de la cuantificación probabilista de la peligrosidad sísmica y la importancia de los espectros en el diseño, temas sobre los cuales diez años después comenzaron a aparecer trabajos en el país; entre ellos: Ugas [71]; Grases [29]; Ugas et al. [72]; Fiedler y Rivero [26]; Lobo Quintero [41].

Nota 8: Entre los casos que han originado situaciones catastróficas en Venezuela, en la literatura especializada sobre el tema se cita con frecuencia el terremoto del Caracas de julio de 1967, que ocasionó la pérdida de más de 300 vidas, lo cual dio como resultado la modificación inmediata de las Normas vigentes para ese momento; de igual modo, poco después del sismo la Industria de Seguros incorporó en sus criterios de control de cúmulos tres 'microzonas' en el área de Caracas, basadas en los efectos conocidos en nuestra capital [69]. Más recientemente y como consecuencia del terremoto de Cariaco de julio de 1997, un edificio de 7 niveles se desplomó en Cumaná, ubicado a unos 85 km del epicentro de ese sismo de magnitud MS 6.9, lo cual causó irreparables pérdidas de vidas; a las marcadas irregularidades de esa estructura, tanto en planta como en elevación, se sumó el efecto de amplificación del subsuelo que generó acciones en su base que excedieron las establecidas en la norma vigente para el momento de su diseño [38]. Este último caso, también ejemplifica la importancia de actualizar los cambios en la cuantificación de la peligrosidad que reflejan las Normas. En efecto: el diseño de la misma edificación, con base en la Norma COVENIN 1756-2001 vigente, manteniendo exigencias de refuerzo comparables a las de la fecha de su diseño original, ubicada en el mismo sitio donde se encontraba la que se desplomó, requeriría acciones sísmicas de diseño del orden de 4 veces mayores que las del documento normativo que se encontraba en vigencia para el momento del Proyecto, más un conjunto de penalizaciones por sus irregularidades tanto en planta como en elevación, solo exigidas en la Norma COVENIN 1756 vigente desde 2001.

Nota 9: En instalaciones de alto riesgo, ubicadas en zonas que pueden ser afectadas por terremotos, se han seguido procedimientos deterministas en la caracterización de las acciones sísmicas. Hecho el despiste de fallas geológicas activas, así como la presencia de suelos potencialmente inestables o licuables, la selección de los movimientos del terreno con frecuencia obedece a criterios deterministas. En esos casos, seleccionados los eventos más desfavorables,

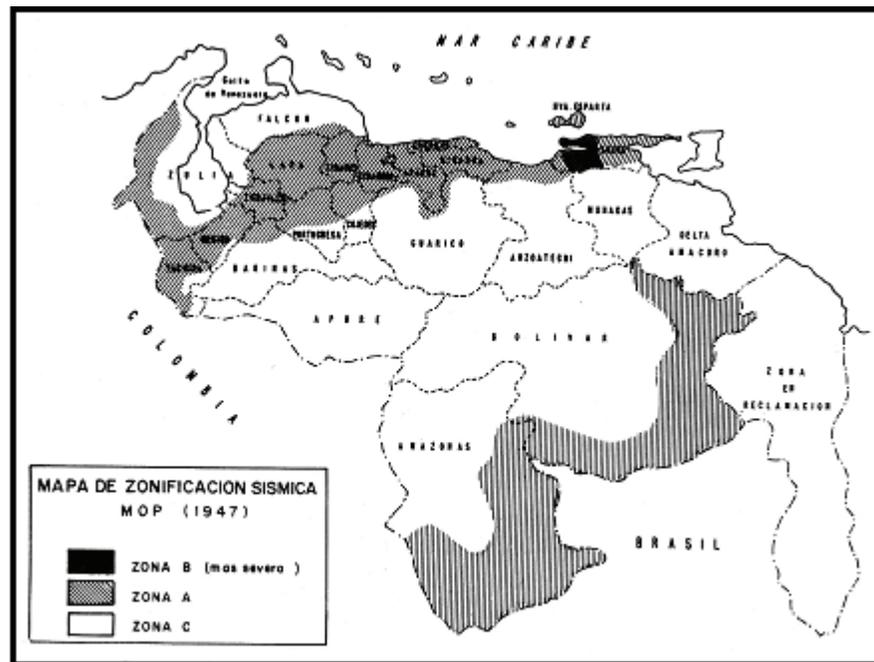


FIGURA 2a. Zonas Sísmicas de Venezuela según la Norma MOP (1947)

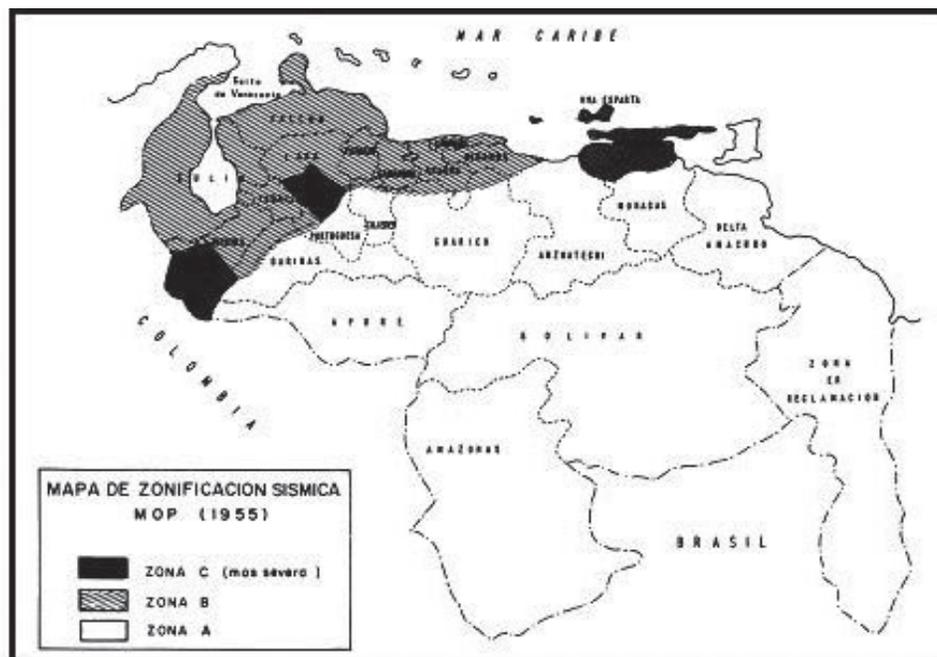


FIGURA 2b. Zonas Sísmicas de Venezuela según la Norma MOP (1955)

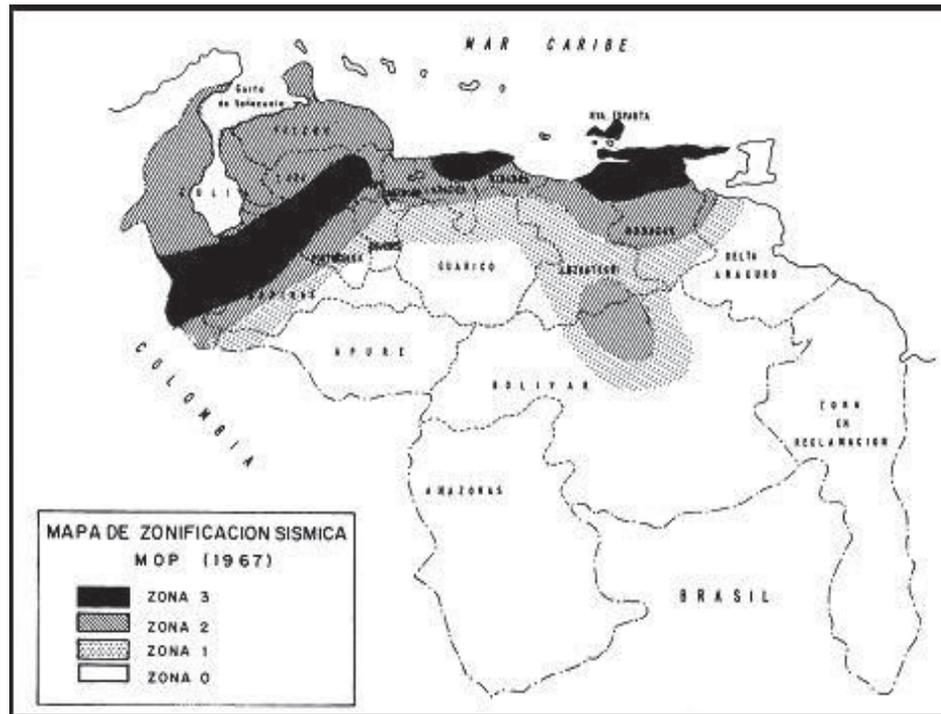


FIGURA 3. Zonas Sísmicas según la Norma Provisional MOP (1967)

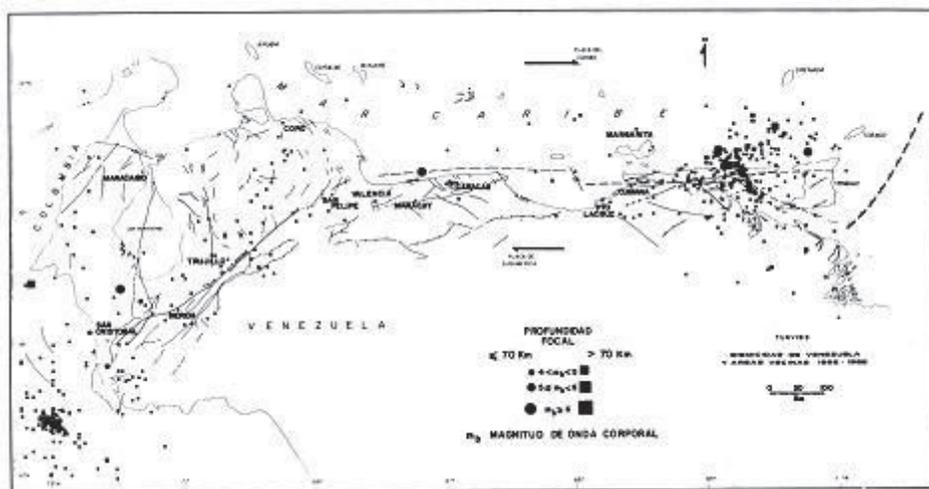


FIGURA 4a SISMICIDAD DE VENEZUELA Y ÁREAS VECINAS (1955-1982); MGNITUDES $m_b \cdot 4.0$ (Ref.: PÉREZ et al., 1984)

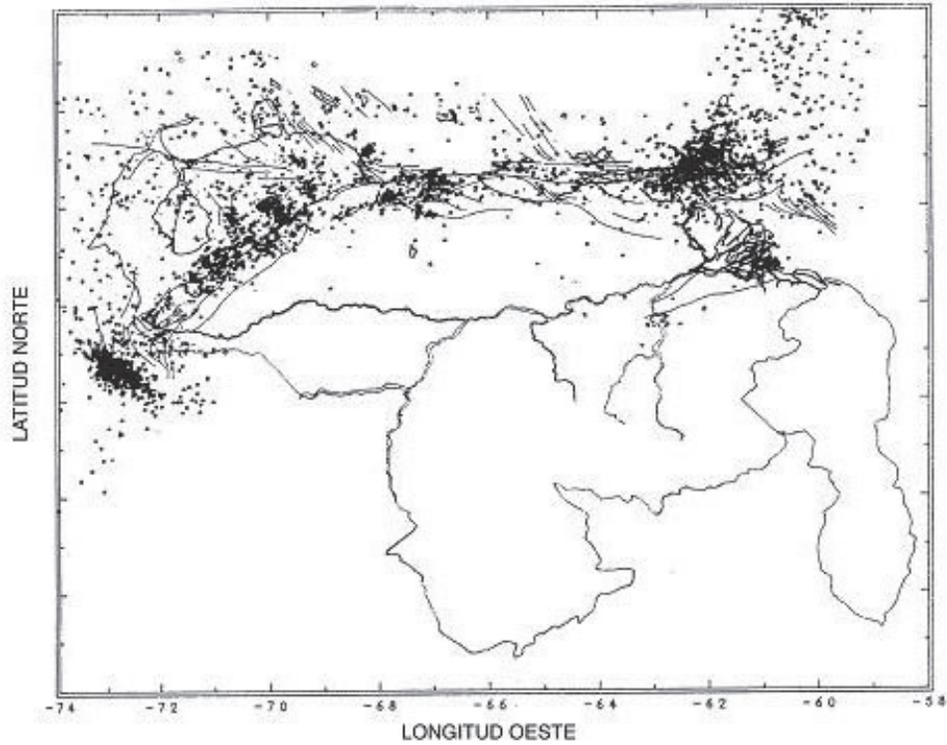


FIGURA 4b MAPA DE EPICENTROS DE SISMOS REGISTRADOS ENTRE 1982 Y 1996 CON LA RED DE FUNVISIS (Ref.: RENDÓN et al., 1997)

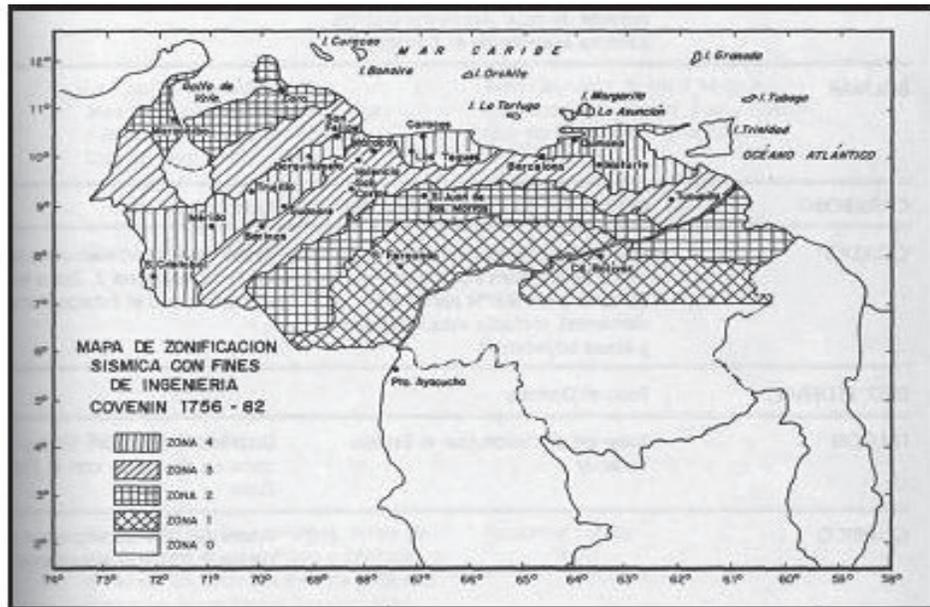


FIGURA 5. Zonas Sísmicas de Venezuela según la Norma Covenin 1756 (1982)

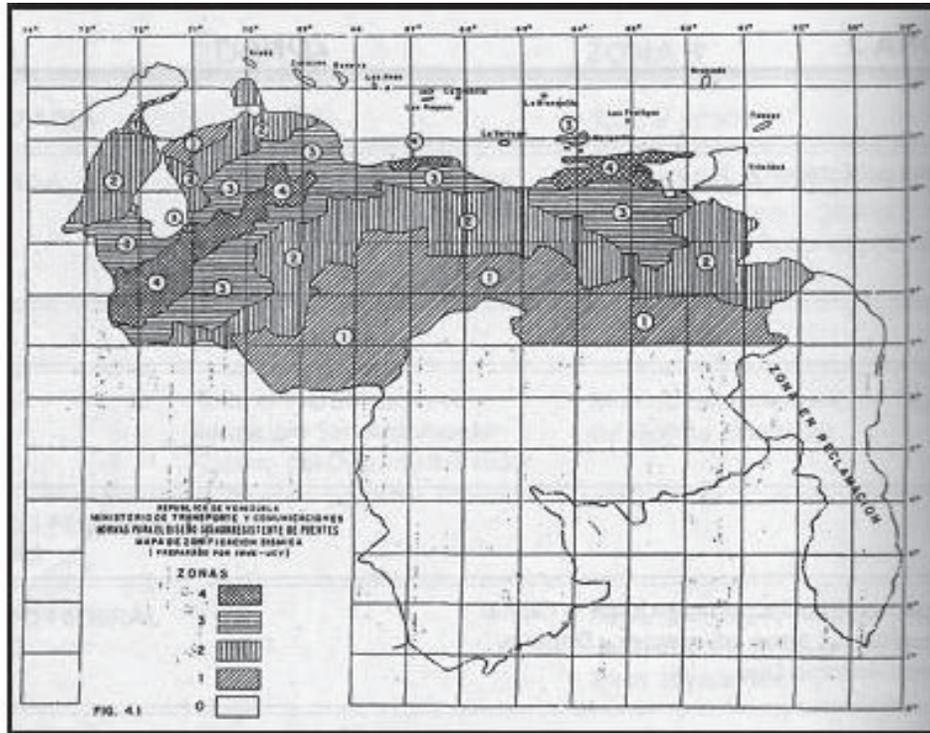


FIGURA 6. Zonas Sísmicas de Venezuela. Propuesta de Norma para Diseño Sismorresistente de Puentes (Fuente: Lobo Quintero, 1986)

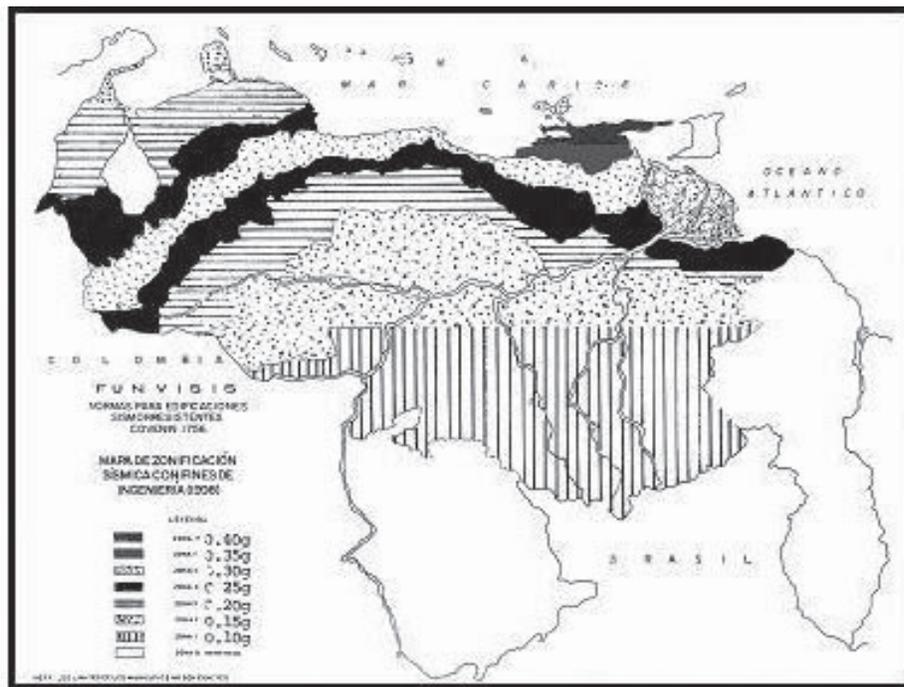


FIGURA 7. Mapa de Zonificación con fines de Ingeniería de la Norma COVENIN 1756 (2001)

8. Referencias

- [1] ACADEMIA DE CIENCIAS FÍSICAS, MATEMÁTICAS Y NATURALES (1997). *Diseño Sismorresistente. Especificaciones y Criterios empleados en Venezuela*. Biblioteca de la Academia, Vol XXXIII; una contribución al Decenio para la Reducción de las Catástrofes Naturales. Ed. J. Grases, Binev, Caracas, 662 p.
- [2] AGUERREVERE P.I. (1925). Un estudio sobre los terremotos. Sus referencias a Caracas. *Rev. del Col. de Ing. de Venez.*, III:30:93-98, Junio, Caracas.
- [3] AGUERREVERE S.E. (1932). Sobre el pronóstico de los temblores de tierra. *Rev. del Col. de Ing. de Venez.*, N° 93:911-913, Caracas.
- [4] AMUNDARAY J. I. (2006). Suelos potencialmente licuables y medidas de remediación. Cap VIII de: *Ingeniería Forense y Estudios de Sitio*. Ed. J. Grases, Consulibris, ISBN 980-12-2289-1, Caracas, 389 p.
- [5] APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC-3) (1978). *Final review draft of recommended comprehensive seismic design provisions for buildings* Redwood City, California.
- [6] BARREIRO M. (2006). Cambios en las normas sísmicas y confiabilidad estructural. Cap VII de: *Ingeniería Forense y Estudios de Sitio*. Ed. J. Grases, Consulibris, ISBN 980-12-2289-1, Caracas, 389 p.
- [7] BELLIZIA A., PIMENTEL N., y BAJO R. (1976). *Mapa geológico- estructural de Venezuela*. Escala 1:500.000, Dirección de Geología, Ministerio de Minas e Hidrocarburos, ed. FONINVES, Caracas.
- [8] BENDITO DE SANTIAGO A. (2000). Análisis de sismicidad y curvas de isoaceleración para estados de desempeño estructural en el occidente venezolano. Tesis de Maestría, ULA, Mérida.
- [9] BERGERET DE COCK J. (1969). Estudio probabilista de la frecuencia de ocurrencia sísmica en Caracas. Trabajo para reválida de Título, Facultad de Ingeniería UCV, Caracas, 46 p.
- [10] BIOT M.A. (1943). Analytical and experimental methods in Engineering Seismology. *Transactions, ASCE*, vol 108:365-408.
- [11] CADAFFE (1984). *Norma NS-P-420 para la calificación de equipos de subestaciones eléctricas*. Caracas.
- [12] CARRILLO J. M. (2003). *Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. Datos Históricos y Biográficos*. Vol I, Col. de Biog., Fundación Polar-ACFIMAN, ISBN: 980-379-063-3, Caracas.
- [13] CENTENO GRAÜ M. (1920). *Vigas de concreto armado*. Tipografía Americana, Caracas, 16 p./ Leído en la sesión del 26 de Septiembre de 1923 del Colegio de Ingenieros.
- [14] CENTENO GRAÜ, M. (1940a). *Estudios Sismológicos*. Litografía del Comercio, Caracas. /Segunda edición en 1969, aumentada y corregida: Vol. VIII Acad. de Cienc. Físic., Matem. y Nat., Talleres Cartografía Nacional, Caracas/.
- [15] CENTENO GRAÜ, M. (1940b). Construcciones y sus fundaciones en pisos apropiados. Cap IX de su libro: *Estudios Sismológicos*; /Contiene recomendaciones para construcciones sismorresistentes; sin modificaciones en la edición de 1969/.
- [16] CERESIS (1984). *El terremoto de la zona Centro-Nororiente del Ecuador del 5 de Marzo de 1987*. Informe Técnico, elaborado por: C. Lomnitz et al., CERESIS/UNESCO, Lima, 163 p.
- [17] COMISION VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES, COVENIN (1982). *Edificaciones antisísmicas*. Norma Venezolana, MINDUR-COVENIN 1756-82. Caracas, 67 p + comentarios.
- [18] CONTRERAS M. (2006). Diques de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo. Cap IX en: *Ingeniería Forense y Estudios de Sitio*. Ed. J. Grases, Consulibris, ISBN 980-12-2289-1, Caracas, 389 p.
- [19] DE LA ROSA J. y URREIZTIETA O. (1953). Normas para el uso del Concreto Armado. *Revista del CIV* N° 206:9-17; N° 207:4-17; N° 208:4-13, Caracas. /Por su presentación, la autoría de ese trabajo corresponde a la Dirección de Obras Públicas del Distrito Federal, División de Control de Construcciones/.

- [20] EDELCA (1983). *Especificaciones generales de Ingeniería para la línea de 800 mil voltios. Mapa de zonificación sísmica*. Caracas.
- [21] ERNST A. (1878). Earthquake in Venezuela (Cúa). *Nature*, XXVIII, p 130, London.
- [22] ERNST A. (1891). Observaciones sobre los temblores en Venezuela. *Boletín del Ministerio de Obras Públicas*, # 101, 103, 105, 107-108, Caracas. /Texto reproducido en: *Obras Completas de Adolfo Ernst*, ed. Blas Bruni C., vol VII: 552-593, Caracas, /.
- [23] FIEDLER G. (1961). Áreas afectadas por terremotos en Venezuela. *Memorias III Cong. Geol. Venez.*, Tomo IV p1791-1810, Caracas.
- [24] FIEDLER G. (1968). Estudio sismológico de la región de Caracas con relación al terremoto del 29 de Julio de 1967. *Boletín IMME*, VI: 23-24, 127-221.
- [25] FIEDLER G. (1970). Die seismische Aktivität in Venezuela in Zusammenhang mit den wichtigsten tektonischen Bruchzonen. *Geolog. Rundschau*, 59:3, pp 1203-1215.
- [26] FIEDLER G. y RIVERO L. (1977). Mapa sísmico. Principales sismos ocurridos en Venezuela (1530-1975). Caracas. /Reproducido en: *Atlas de Venezuela*, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR), Dirección de Cartografía Nacional. Caracas, 1979/.
- [27] FUNDACIÓN POLAR (1997). *Diccionario de Historia de Venezuela*. 4 tomos. Caracas.
- [28] FUNVISIS (1993). *Mapa Neotectónico de Venezuela* (escala 1:2.000.000). Compilación de C. Beltrán, Caracas.
- [29] GRASES J. (1975). Acerca de la estimación de las aceleraciones máximas del terreno en la región de Caracas. *Memorias de las XVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y V Simposio Panamericano de Estructuras*. Caracas, 7 p.
- [30] GRASES J. (1985). *Fundamentos para la elaboración del nuevo mapa de zonificación sísmica de Venezuela con fines de Ingeniería*. FUNVISIS Serie Técnica 05-84, Caracas, 32 p.
- [31] GRASES J. (1987). *Concreto armado en zonas sísmicas. Requisitos de diseño*. DIVISIDER, SIVENSA, ISBN: 980-265-916-9, Caracas, 252 p.
- [32] GRASES J., GRASES G. y CONTRERAS I. (1997). Vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y alcantarillado frente a deslizamientos, sismos y otras amenazas naturales. Publicado por OPS-OMS bajo el título: *Estudio de caso: vulnerabilidad de los sistemas de agua potable frente a deslizamientos*. Cent. Panam. de Ing. San. y Cien. del Amb. (CEPIS), Lima, 99p.
- [33] HAEUSSLER P.J. and NAEIM, F. (2004). The 2002 Denali Fault, Alaska, Earthquake. *Earthquake Spectra*, vol 20, N° 3, 1045 p, EERI, ISSN-8755-2930, Oakland, Ca.
- [34] HOUSNER G. (1947). Characteristics of strong-motion earthquakes. *Bull. of the Seism. Soc. of Amer.*, vol 37:19-31, January.
- [35] HOUSNER G. W., ALFORD J. L. and MARTEL R. R. (1953). Spectrum analysis of strong motion earthquakes. *Bull. of the Seism. Soc. of Amer.*, vol 43:97-119, April.
- [36] ICBO (1997). *Uniform Building Code*, Chapter 16, Division IV, Earthquake Design, Whittier, California.
- [37] ISACKS B., OLIVER J. and SYKES L.R. (1968). Seismology and the New Global Tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 73:18, 5855-5899, Richmond, Virginia.
- [38] IMME (1998). *Informe Sismorresistente de las Edificaciones Derrumbadas durante el Sismo de Cariaco del 09-07-1997*. Informe N° 209209, Agosto, Caracas, 249 p.
- [39] KULIK J. (1947). Temblores de tierra y construcciones antisísmicas. *Rev. del Col. de Ing. de Ven.*, año XXV, N° 166:214-220, Julio-Agosto, Caracas.
- [40] LA ELECTRICIDAD DE CARACAS C. A. (ELECTRICAR) (1994). Diseño sismorresistente para el sistema eléctrico. Norma DNI ND-C-B-01-94. Caracas.
- [41] LOBO QUINTERO W. (1979). Código antisísmico de Mérida: una proposición. *Boletín Técnico IMME*, XVII (64):57-83, Caracas.
- [42] LOBO QUINTERO W. (1986). *Norma venezolana para el diseño sismorresistente de puentes*. Propuesta para la Dirección de Estudios y Proyectos del Ministerio de Transporte y

- Comunicaciones, articulado y comentarios. Mérida, Julio. /Los diez primeros capítulos de esta propuesta se reprodujeron como Anexo E en: Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales (1997)/.
- [43] LUSTGARTEN P. (1974). Predicción probabilística de sismos para un período de 50 años para la ciudad de Caracas. *Primer Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*, Memorias. Caracas.
- [44] MARINILLI A. (1999). Confiabilidad estructural y funcional de instalaciones hospitalarias. *Boletín Técnico IMME*, Vol 37-3, 1-8, Caracas.
- [45] METRO DE CARACAS, C.A. (1990). *Normas de proyecto. Acciones debidas al sismo*. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Caracas.
- [46] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) (1939). *Normas para el cálculo de edificios*. Ministerio de Obras Públicas, Caracas. /En 1945 se cita un documento con el mismo título, publicado en 1947. Este documento es diferente al *Manual para el Cálculo de Edificios*, del MOP, en el cual se recogen fórmulas, tablas y ábacos de cálculo, publicado en 1942/.
- [47] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) (1947). *Normas para el cálculo de edificios*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios e Instalaciones, Imprenta Nacional, Caracas.
- [48] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) (1959). *Normas para el cálculo de edificios, 1955*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios e Instalaciones. Caracas, Tipografía Italiana, pp 164-171.
- [49] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP) (1967). *Norma Provisional para Construcciones Antisísmicas*. Caracas, 18 p + mapa.
- [50] 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.
- [51] NAITO T. (1960). Fifty years of earthquake engineering practice. *Proc. of the II World Conf. on Earthq. Eng.*, pp 127-131, Tokyo-Kyoto.
- [52] NEWMARK N.M. and HALL W.J. (1975). Pipeline design to resist large fault displacements. *Proc. of the U.S. Nat. Conf. on Earthq. Eng.*, Univ. of Michigan, Ann Arbor, pp 416-425.
- [53] OLIVARES A. E. (1997). Datos históricos sobre las observaciones sismológicas y normas sísmicas en Venezuela hasta 1967. En: *Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales* (1997), Tema 1, pp17-24.
- [54] OLIVARES A. E. (2004). Presentación del texto: *Normas y Especificaciones para el Análisis, Diseño y Ejecución de Obras Civiles*. Tomo I, Estructuras. Ed.: J. Grases y A. Gutiérrez, p 7-8, Acad. de Cien., Fís., Mat. y Nat., y Acad. Nac. de la Ing. y el Háb., Vol XL, Caracas, 718 p.
- [55] PDVSA (1991). Diseño antisísmico de instalaciones industriales, PDVSA JA-221. *Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA*, Especialidad 18 "Estructuras", Caracas.
- [56] PÉREZ O., NOGUERA C., RENDON H., GAVI-DEZ N., GARCÍA A., RODRIGUEZ F., BARROETA I., LÓPEZ F. y PÉREZ J. (1984). Boletín Sismológico de Venezuela, FUNVISIS, Enero-Marzo, pp 1-27, Caracas.
- [57] PÉREZ R., NIETO J.J. y SOLÓRZANO E. (2001), Criterios de diseño del sistema de disipación sísmica en los viaductos del ferrocarril Caracas-Tuy Medio. *TEKHNE, Revista de Ingeniería*, N°5: 7-14, UCAB, Fac. de Ingeniería, Caracas.
- [58] RENDÓN H., APARICIO J., AVENDAÑO J., LA-FAILLE J., LÓPEZ F., RAMOS C., ROMERO G. y SALAS H. (1997). Red sísmica de Venezuela. En: *Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales* (1997), Tema 4, pp 51-57.
- [59] RICHTER C. (1958). *Elementary Seismology*. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 768 p.
- [60] ROD E. (1956). Strike-slip faults of northern Venezuela. *Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, 40:457-476.
- [61] SARDI V. (1968). *Contribución al estudio de la frecuencia de los sismos en Caracas*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. Caracas, 22 p.
- [62] SEAONC-ASCE (1951). STRUCTURAL ENGINEERS ASSOCIATION OF NORTHERN CALIFORNIA and AMERICAN SOCIETY

- OF CIVIL ENGINEERING. Lateral forces of earthquake and wind. Presented by the Joint Com. in: *Proceedings - Separate* N° 66, April.
- [63] SCHUBERT C. (1980). Contribution to the paleolimnology of Lake Valencia, Venezuela: seismic stratigraphy. *Catena*, 7: 275-292.
- [64] SCHUBERT C. (1981). Are the Venezuelan fault systems part of the southern Caribbean plate boundary? *Geologische Rundschau*, 70, 542-551.
- [65] SCHUBERT, C. (1988). Neotectonics of La Victoria fault zone, north-central Venezuela. *Annales Tectonicae*, Vol. II, N° 1:58-66.
- [66] SCHUBERT C. y KRAUSE F. (1981). Fallamiento a los largo de la costa norte central de Venezuela: zona de falla de Morón. *Memorias III Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*, Caracas.
- [67] SCHUBERT C. and LAREDO M. (1979). Late Pleistocene and Holocene faulting in lake Valencia basin, north - central Venezuela. *Geology*, 7: 289 - 292.
- [68] STOLK J. F. (1932). Datos útiles para las construcciones contra temblores. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Físicas y Matemáticas, UCV, Caracas.
- [69] SUPERINTENDENCIA DE SEGUROS (1989). *Mapa de Zonificación Sísmica (1:2.000.000). Tarifa de Seguros de Terremotos*. Consejo Nacional de Seguros, República de Venezuela. Caracas.
- [70] SUYEHIRO K. (1932). Engineering seismology. *Proc. of the Am. Soc. of Civ. Eng.*, 58:4, Part 1 and 2, 110 pp.
- [71] UGAS C. (1974). Espectros para diseño antisísmico en función de las condiciones locales del subsuelo. *Boletín Técnico IMME*, vol XI, N° 48: 25-57, Caracas, Oct-Dic.
- [72] UGAS C., GRASES J. y MOLINA Y. (1976). Estudio del riesgo sísmico y potencial de licuefacción en tres localidades de la costa venezolana. *Informe Técnico IMME 195064*, 130p, Facultad de Ingeniería UCV, Caracas.
- [73] VIZCARRONDO J. A. (1934). Consideraciones generales acerca de las construcciones antisísmicas. *Revista del Colegio de Ingenieros de Venezuela*, N° 102, pp 1121-1124, Caracas.
- [74] WESTERGAARD H. M. (1933). Earthquake-shock trasmission in tall buildings. *Eng. News Record*, 111, 418-472.