

AMENAZA SÍSMICA CON EFECTOS DE SITIO Y ANÁLISIS DE RECURRENCIA DE INTENSIDADES PARA CARACAS

Julio Javier Hernández⁽¹⁾ y Michael Schmitz⁽²⁾

RESUMEN

Se expone una comparación entre la amenaza sísmica de Caracas, considerando efectos de sitio, y la recurrencia de intensidades macrosísmicas en el centro de la ciudad. La primera fue estudiada en roca para su microzonificación sísmica con actualizaciones del modelo sismogénico, y para la norma sísmica. Se aplica al cálculo de las respuestas espectrales del centro de Caracas caracterizado por tres microzonas con efectos de sitio, con un promedio de las evaluaciones más sus incertidumbres para varios periodos de retorno. Se recopila la historia de intensidades de la ciudad y se revisan las intensidades de los mayores terremotos que la han afectado, presentando un análisis de recurrencia que estima periodos de retorno de cada intensidad. Se estudia la correlación entre las intensidades y las aceleraciones y velocidades pico del terreno, a partir de datos mundiales, derivando funciones que las vinculan, incluyendo de sus incertidumbres. Mediante ellas se asocian respuestas espectrales a las intensidades de varios periodos de retorno para comparar con las provenientes de los resultados de amenaza, encontrando un buen acuerdo entre ambos estudios. Se estiman las intensidades sísmicas probables en sitios representativos de la ciudad (cerros, centro y cuenca profunda). Es de esperar una intensidad de 7.5 u 8 en el centro entre 2024 y 2060, que afecte las construcciones de la ciudad, mostrando la necesidad de un plan de mitigación del riesgo sísmico.

Palabras Clave: amenaza sísmica; análisis de recurrencia; microzonificación sísmica; intensidad macrosísmica; Caracas

SEISMIC HAZARD WITH SITE EFFECTS AND RECURRENCE ANALYSIS OF INTENSITIES FOR CARACAS

ABSTRACT

A comparison between the seismic hazard in Caracas, considering site effects, and the recurrence of macroseismic intensities in downtown is exposed. The first was studied at rock sites for the city seismic microzonation with updates of the seismogenic model, and for the seismic code. Averages of the evaluations for several return periods, plus their uncertainties, are handled for the computation of the spectral responses of the city center, characterized by three microzones with site effects. The history of intensities is compiled, and those of the largest earthquakes that have

Artículo recibido el 24 de febrero de 2022 y aprobado para su publicación el 29 de junio de 2023. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Consultor en Ingeniería Estructural e Ingeniería Sísmica, C-6, Bloq. 16, Cdad. Tablitas, Caracas 1030, juljayher7@gmail.com

⁽²⁾ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, FUNVISIS, El Llanito, Calle Mara. Universidad Central de Venezuela. Universidad Simón Bolívar, Caracas, schmitzschutt@gmail.com

affected Caracas are revised, presenting a recurrence analysis that estimates return periods for each intensity. The correlation between the intensities and the peak ground accelerations and velocities is studied, based on world data, obtaining functions that link them, including their uncertainties. Thus, spectral responses are associated to the intensities of several code return periods to compare with those from the hazard assessment, finding a good agreement between both studies. Probable seismic intensities in representative sites of the city (hills, center and deep basin) are assessed. An intensity of 7.5 or 8 is expected in the center between 2024 and 2060, which affects the constructions of the city, showing the need for a seismic risk mitigation plan.

Keywords: seismic hazard; recurrence analysis; seismic microzoning; macroseismic intensity; Caracas

INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta una calibración de las evaluaciones de amenaza sísmica realizadas para Caracas, mediante comparación con un análisis de recurrencia de intensidades macrosísmicas para la misma ciudad. Las evaluaciones de amenaza sísmica contienen incertidumbres en sus resultados y es conveniente calibrarlas, para examinar su relativa precisión. Esto puede hacerse comparando sus resultados contra observaciones empíricas independientes, habiéndose practicado dos opciones principales: a) comparar con historias de registros acelerográficos; b) comparar con historias de intensidades macrosísmicas. Dicha comparación fue realizada en México (Ordaz y Reyes, 1999) mediante la primera opción. La segunda opción ha sido utilizada en Nueva Zelanda (Dowrick y Cousins, 2003), una variante en Francia (Marin et al., 2004), Estados Unidos (Stirling y Petersen, 2006), Italia con carácter exhaustivo nacional (e.g. Albarello et al., 2007) y España (Mezcua et al., 2013). En tal sentido, en este trabajo mediante la segunda opción se presenta un análisis de recurrencia de intensidades macrosísmicas observadas en el centro de Caracas a lo largo de más de 4 siglos, del cual se infieren intensidades probables para determinados periodos de retorno que pueden compararse con los resultados de las evaluaciones de amenaza sísmica.

Estos objetivos se relacionan con el Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas (PMSC), el cual fue una labor multidisciplinaria realizada entre 2005 y 2009 en la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS; Schmitz et al., 2009, 2011a, 2011b, 2020). Un propósito primordial fue el de establecer recomendaciones para el diseño de nuevas construcciones y la revisión de las existentes, tomando en cuenta la amenaza sísmica y las condiciones variables del terreno inferidas en investigaciones geofísicas y geotécnicas, las cuales condicionan la respuesta esperada en las distintas microzonas definidas. Como parte de dicho Proyecto se actualizó la evaluación de amenaza sísmica en roca en el Área Metropolitana de Caracas (AMC), para empleo en los análisis de sitios de la ciudad y definición de microzonas. Se llevó a cabo una sucesión de calibraciones incluyente de la renovación del modelo sismogénico (Hernández, 2009a, 2009b) que culminaron en los resultados finales (Hernández y Schmitz, 2009), los cuales se comparan con revisiones posteriores. En este trabajo, en la valoración de los resultados se consideran los efectos de sitio inferidos en el PMSC para las distintas microzonas, tras caracterizar el centro de la ciudad con el promedio de las tres microzonas que participan en él. Además, se revisó la evaluación de amenaza sísmica para todo el país, que fue soporte de una nueva versión de la norma sísmica nacional, la cual incluyó a Caracas y cuyos resultados se contemplan (Hernández et al., 2017).

En el desarrollo de este trabajo se siguieron los siguientes pasos: 1) Examen de las evaluaciones de amenaza sísmica en roca, discutiendo el modelo sismogénico de soporte, la aplicación al PMSC y juzgando incertidumbres; 2) Revisión de los efectos de sitio en la ciudad, referidos al centro de la ciudad;

3) Recopilación de las intensidades macrosísmicas observadas en Caracas, discutiendo en detalle las cinco mayores, y desarrollando un análisis de recurrencia macrosísmica como proceso de Poisson; 4) Indagación de la correlación entre las intensidades y las aceleraciones en los sitios, mediante datos mundiales, explorando sus incertidumbres; 5) Comparaciones entre las evaluaciones de amenaza sísmica y el análisis de recurrencia macrosísmica, examinando su correspondencia; 6) Estimados de sismos probables en Caracas, en base a las recurrencias obtenidas.

AMENAZA SÍSMICA EN ROCA DE CARACAS

Generalidades

Caracas está sometida a una amenaza sísmica elevada, debido a su localización cercana al límite entre las placas tectónicas Caribe y Suramérica, donde existen sistemas de fallas como, de norte a sur, La Tortuga, San Sebastián, Tacagua-El Ávila y La Victoria (Beltrán, 1993; Audemard et al., 2000) que acomodan el movimiento relativo entre ambas placas. A lo largo de su historia, Caracas ha sufrido varios terremotos destructivos y más de 700 sismos sentidos (Grases et al., 1999). El más reciente evento destructivo fue el terremoto de Caracas-Litoral Central de 1967, de magnitud M6.6 (Suárez y Nábělek, 1990), con un saldo de más de 300 fallecidos y que causó daños a numerosas edificaciones, entre ellos el colapso de cuatro edificios de mediana altura ubicados en el este del valle de Caracas (e.g. Briceño et al., 1978). Terremotos anteriores, de mayor magnitud aún, fueron los de 1641, 1812 y 1900.

Dada la alta sismicidad de la región de Caracas, para el diseño de las construcciones y la mitigación del riesgo sísmico, interesa estimar con la mayor precisión posible la intensidad y frecuencia de los sismos futuros, lo cual se puede establecer mediante evaluaciones de amenaza sísmica, probabilísticas o determinísticas, o mediante análisis de recurrencia macrosísmica. En las evaluaciones de la amenaza sísmica en roca para Caracas se siguió una variante mundialmente aceptada de estudios probabilísticos (Esteva, 1967; Cornell, 1968), cuyas bases son una caracterización sismogénica, la definición de distancias a las fuentes y relaciones de atenuación (modelos de respuesta del terreno) determinadas. Los resultados para diversas tasas de excedencia se exponen mediante valores asociados a los inversos de las tasas: periodos medios de retorno PMR = 72, 200, 475, 975 y 2475 años. Los dos primeros PMR representan escenarios de ocurrencia más frecuente que los de diseño normativo actual; el último representa un escenario extremo que se viene adoptando mundialmente. Como parámetros del estudio se exponen la aceleración pico esperada y la respuesta de pseudo-aceleración de estructuras de periodo $T = 1$ s, a semejanza de una moderna práctica en EEUU (e.g. ASCE, 2010, 2016, 2022). El primero representa las respuestas de periodos cortos y depende en gran medida de las tasas de actividad sísmica cercana, mientras que el segundo representa las respuestas de periodos largos y depende más de las fallas de gran actividad, aunque sean lejanas. Se denotan como A0 y A1, respectivamente.

Desarrollo para el PMSC

Un soporte esencial para el desarrollo de las citadas evaluaciones es un modelo sismogénico que exponga las principales fuentes generadoras de terremotos y las frecuencias de los mismos. Para el PMSC inicialmente, entre 2005 y 2006, se partió del modelo sismogénico utilizado para la norma sísmica previa (COVENIN, 2001), el cual sólo incluía la sismicidad instrumental post-1900 y dividía el país en tres grandes regiones (occidental, central y oriental), disponiendo la sismicidad total de cada una con parámetros uniformes. Como la actualización del modelo sismogénico era una tarea a mediano plazo, se trabajó en varias etapas, con modelos sismogénicos preliminares en paralelo con el desarrollo general del proyecto, a objeto de diversas valoraciones y presentaciones en coloquios y congresos (e.g.: Schmitz et al., 2005; Hernández et al., 2006). Inicialmente se mantuvo la caracterización sismológica, añadiendo datos

neotectónicos (Beltrán, 1993; Audemard et al., 2000; Audemard, 2001), digitalizando las fallas y distribuyendo la sismicidad entre ellas, según sus velocidades y magnitudes máximas asignadas, mediante la formulación de Anderson y Luco (1983). Se configuró así un nuevo modelo sismogénico y se efectuó una evaluación de amenaza sísmica con el programa EZFRISK v.4.1 (RISK ENGINEERING, 1998), aplicando relaciones de atenuación del movimiento del terreno pre-2008, usuales a la fecha del estudio: Abrahamson y Silva (1997); Sadigh et al., (1997); Campbell (1997); e Idriss (2005).

Luego se revisó un nuevo Catálogo Sismológico (Romero y Rendón, 2007) y se efectuó una caracterización sismológica de la región central (Palma et al., 2007). Se actualizó el modelo sismogénico tras revisar la actividad sísmica de la falla La Tortuga. Para la evaluación de amenaza sísmica se empleó inicialmente el programa EZFRISK y luego el EASP (Hernández, 2007), éste con inclusión de efectos de directividad de las fallas (Somerville et al., 1997; Abrahamson, 2000). Los resultados obtenidos exhibieron valores más aceptables para A1, aunque persistió en el sur del AMC una importante diferencia con la norma sísmica vigente; esta diferencia motivó la sectorización sismogénica de la etapa final.

Finalmente se añadió la historia sísmica 1641-1900 (Hernández, 2009a), resolviendo una carencia de los modelos previos. En la figura 1 se muestran las proyecciones de las rupturas en superficie de los sismos más importantes de la región central. Se revisó la sismicidad instrumental (Rendón et al., 2009), configurando un catálogo ampliado. Se efectuó una sectorización sismogénica, obteniendo parámetros en cada sector en función de los sismos ocurridos en él, superando el previo empleo regional uniforme del parámetro b (de caída de la frecuencia sísmica; Gutenberg & Richter, 1944), el cual concentraba excesivamente la sismicidad en la mayor falla regional (San Sebastián). La actividad sísmica se repartió entre las fallas con el mismo método anterior, definiendo el modelo sismogénico final (Hernández, 2009b).

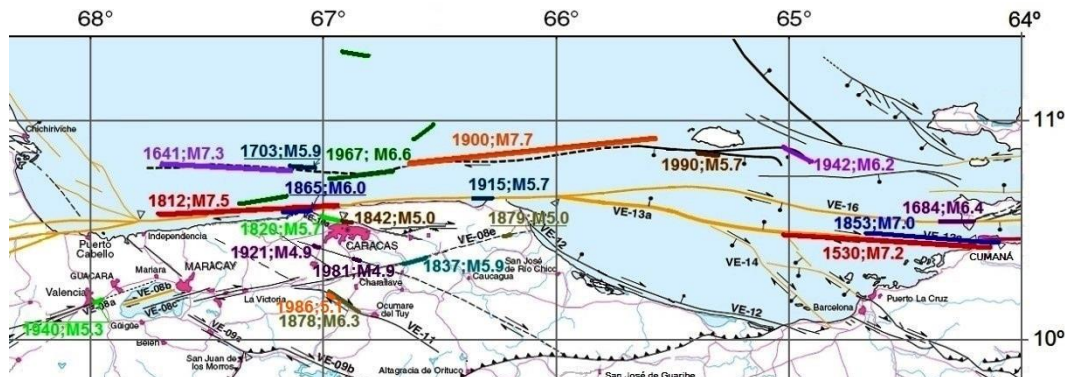


Figura 1. Sismos importantes en la actualización del modelo sismogénico final con las proyecciones de las rupturas en superficie.

Se llevó a cabo una evaluación de la amenaza sísmica mediante el programa EASP con dicho modelo sismogénico (Hernández et al., 2009). En la figura 2 se muestran: a) las curvas de amenaza de A0 y A1 en roca en el centro de Caracas, destacando los PMR = 72, 200, 475, 975 y 2475 años; b) los espectros de amenaza uniforme en roca en el centro de Caracas, para los mismos PMR.

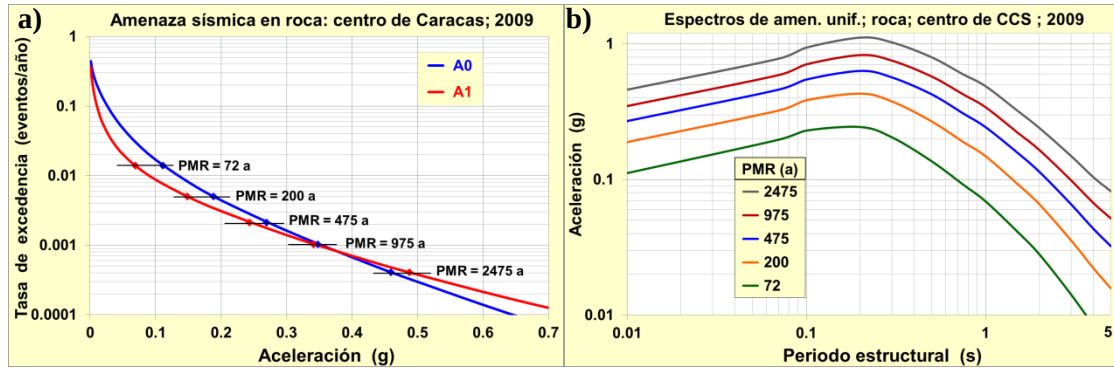


Figura 2. a) Amenaza sísmica de A0 y A1 en roca en el centro de Caracas; b) Espectros de amenaza uniforme en roca en el centro de Caracas para varios PMR. Ambos para la etapa final.

En la tabla 1 se indican los valores obtenidos en el centro de Caracas para los PMR estudiados.

Tabla 1. Respuestas (g) A0 y A1 de la etapa final del PMSC en el centro de Caracas, para varios PMR.

aceler. (g)	Periodo Medio de Retorno (años)				
	72	200	475	975	2475
A0	0.11	0.19	0.275	0.36	0.475
A1	0.070	0.15	0.245	0.35	0.50

En la figura 3 se muestran los mapas finales de amenaza sísmica en roca en el AMC para PMR = 475 años, correspondientes a A0 y A1. Nótese la distinta distribución de las curvas de isoaceleración de ambos parámetros; al sur, A0 está muy condicionada por las fallas cercanas (La Victoria, etc.) aunque estas son menos activas que las mayores del norte (San Sebastián y La Tortuga). Mientras que A1 está dominada por estas mismas fallas, con poca influencia al sur de las menores (La Victoria y otras), mostrando el efecto indicado antes. Esta diferencia es fruto del modelo sismogénico de 2009 ya que los modelos previos no generaban el tipo de distribución final de A0. Se evidencia la debilidad de la metodología de las primeras etapas, aunque es aceptada en contextos mundiales, y la importancia de haber efectuado una revisión de las implicaciones de la caracterización sismogénica.

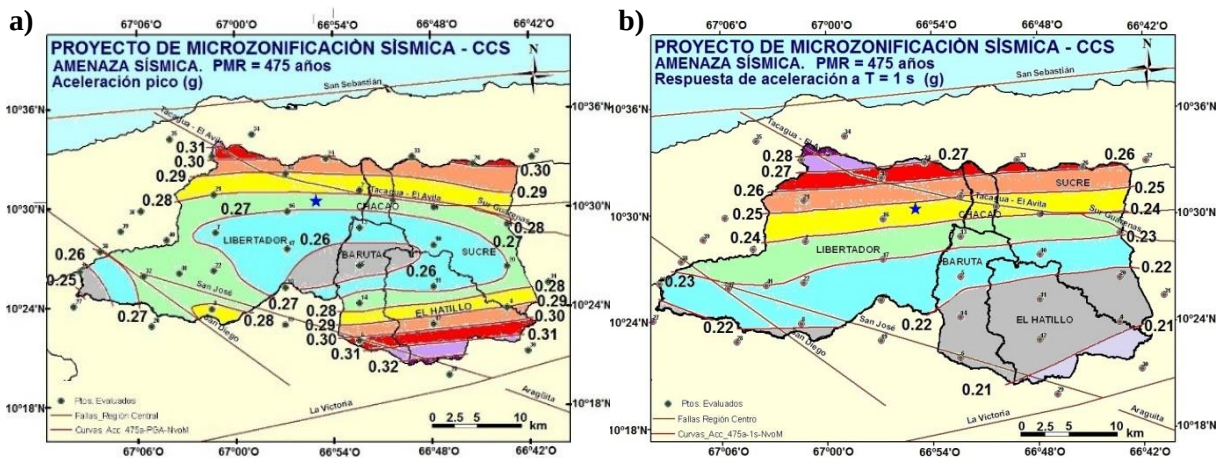


Figura 3. Mapas de amenaza sísmica en roca; fase final: a) A0; b) A1; PMR = 475 años. Los círculos numerados indican los lugares de la evaluación. La estrella azul representa el centro de Caracas.

Implementación para el PMSC

Se definieron 4 macrozonas sísmicas en el AMC (figura 4) atendiendo a la variabilidad de A_0 y A_1 entre el norte y el sur del área (figura 3): norte (N), centro-norte (CN), centro-sur (CS) y sur (S). El centro de Caracas se encuentra en la macrozona CN hacia $10^{\circ} 30.4'$ N de latitud y $66^{\circ} 55'$ O de longitud. A esta macrozona como referencia se le asigna $A_0 = 0.28$ g y $A_1 = 0.245$ g, para $PMR = 475$ años, en función del conjunto de valores a lo largo de la misma. Aunque la formulación espectral conduce a $A_{1\text{diseño},475} = 0.25$ g.

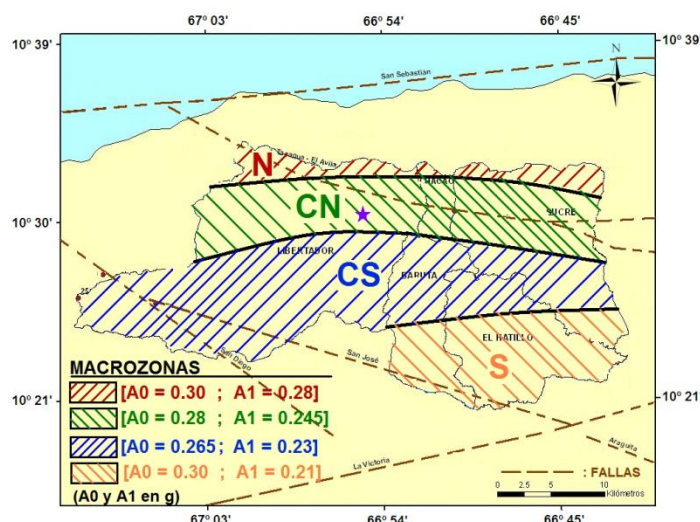


Figura 4. Macrozonas del PMSC, y sus valores característicos de A_0 y A_1 . El centro de Caracas, representado por la estrella violeta, se encuentra en la macrozona CN.

Actualizaciones

Con posterioridad al desarrollo del PMSC, culminado en 2009, se realizaron varias revisiones de los resultados de la evaluación de amenaza sísmica. El principal motivo fue investigar la influencia de las nuevas relaciones de atenuación que superaron al grupo previo de 1997 y años cercanos. En 2010, tras una actualización del modelo sismogénico, manteniendo el empleo del programa de computación EASP, se utilizaron las relaciones NGA desarrolladas en California para zonas corticales activas: Abrahamson y Silva (2008); Boore y Atkinson (2008); Campbell y Bozorgnia (2008); Chiou y Youngs (2008); Idriss (2008). Luego, en 2014 con otra actualización del modelo sismogénico, se siguieron las recomendaciones del GEM (“Global Earthquake Model”) de relaciones de atenuación para uso mundial (Stewart et al., 2013), dirigidas a balancear la procedencia de los datos de su generación. Se eligieron una de California (Chiou y Youngs, 2008), una europea (Akkar y Bommer, 2010) y otra japonesa (Zhao et al., 2006); se mantuvo el uso del programa EASP. Finalmente, se efectuó una evaluación con el modelo sismogénico desarrollado en 2016 para la vigente versión de la norma sísmica (Hernández y Schmitz, 2017), el cual tuvo como soporte una revisión de la base de datos de fallas (Paolini et al., 2012), una actualización del catálogo sismológico (Rendón et al., 2014), más la incorporación de la sismicidad histórica (Hernández, 2009b; Alvarado et al., 2015). Se utilizaron relaciones de atenuación semejantes al caso anterior: Boore y Atkinson (2008); Akkar y Bommer (2010); y Zhao et al. (2006). Se empleó el programa CRISIS 2015 (Ordaz et al., 2015). En 2017 se calculó con $PMR = 475$ años para la norma (Hernández et al., 2017) y luego en 2021 se añadieron otros PMR para el presente trabajo.

En las revisiones se encontró que todos los resultados de A0 son del mismo orden que los obtenidos en la etapa final del PMSC (tabla 1) pero en ésta los valores de A1 son algo mayores. El motivo yace en que en los últimos modelos sismogénicos se rebajó el potencial de la falla La Tortuga Central y el de los segmentos de la falla San Sebastián. De todos modos, el conservadurismo de $A1 = 0.245$ g de la etapa final del PMSC, es relativo considerando que desde 2010 para diseño el ASCE-7 (ASCE, 2010, 2016, 2022) recomienda amplificar A1 por el factor direccional de 1.3 y el valor promedio de las revisiones es 0.18 g, el cual conduce a $A1 = 0.23$ g, cercano al especificado. Además, en la norma sísmica venezolana de la fecha (COVENIN, 2001) se estipulaba $A1 \sim 0.29$ g, valor que no se quiso rebajar mucho.

Análisis de incertidumbres

Es de interés estimar la incertidumbre asociada a los modelos sismogénicos, adicional a la derivada de las relaciones de atenuación, mediante estudios de sensibilidad de los parámetros más influyentes en dichos modelos. Entre estos parámetros se encuentran la magnitud máxima esperada en las fuentes sismogénicas, M_u , que deriva de inseguridad de las longitudes y/o anchos de las fallas, y el citado parámetro b de variación de la frecuencia de los sismos en cada fuente sismogénica, y que sigue la expresión $\log N = a - bM$, donde N = número promedio de sismos con magnitud $m \geq M$ en cierto lapso y a es una referencia de la magnitud mínima evaluada (Gutenberg & Richter, 1944). No concierne estudiar la incertidumbre de las tasas de excedencia de los sismos ya que están correlacionadas con b , con el que se modelan conjuntamente. Por otro lado, la mayor incertidumbre existente corresponde a las velocidades de las fallas, la cual no ha sido reportada en su base de datos. Sin embargo, al trabajar con sectores sismogénicos la afectación es reducida porque en ellos se disponen fallas de actividad semejante y la distribución de la sismicidad en cada sector deriva en gran medida de las relaciones entre sus velocidades y no de sus valores absolutos.

Se supone que las variaciones en las fuentes se pueden representar por valores promedios del conjunto, que se toman en el orden de varias recomendaciones mundiales (e.g. McGuire, 2004; Pecker et al., 2017). En este trabajo se efectuaron 6 evaluaciones adicionales para los modelos de 2009, 2014 y 2016 considerando para cada fuente sismogénica: a) variaciones de M_u en $\Delta M_u = \pm 0.3$; b) variaciones de b en $\Delta b = \pm 0.06$; c) aumento y reducción de M_u en $\Delta M_u = \pm 0.15$ junto con reducción y aumento del parámetro b en $\Delta b = \pm 0.03$, en ese orden.

Para cada modelo sismogénico, las tres evaluaciones que conducen a aumentos de los resultados los dan en el mismo orden para cada PMR, y análogamente las tres evaluaciones que conducen a disminución de ellos. De cada modelo se calcula el valor medio y se toma el menor decremento y el mayor incremento, conduciendo al rango de valores mostrados en la tabla 2 para las respuestas A0 y A1, en el centro de Caracas. En todos los modelos las incertidumbres de A0 son menores que las de A1; en promedio las primeras oscilan alrededor de $\pm 11\%$ respecto a las medias y las segundas lo hacen en torno a $\pm 18\%$.

Tabla 2. Análisis de incertidumbres de las evaluaciones de amenaza sísmica en roca. Valores en (g).

acel.	PERIODO MEDIO DE RETORNO (PMR), años									
	72		200		475		975		2475	
	rango	media	rango	media	rango	media	rango	media	rango	media
A0	0.10–0.12	0.11	0.17–0.21	0.19	0.24–0.30	0.27	0.32–0.39	0.36	0.43–0.53	0.48
A1	0.049–0.067	0.057	0.10–0.14	0.12	0.17–0.23	0.20	0.23–0.32	0.27	0.32–0.46	0.39

EFFECTOS DE SITIO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE CARACAS

Las macrozonas del PMSC se dividen en microzonas (Morales et al., 2009b; Schmitz et al., 2011a) en función de las características someras (V_{s30}) del subsuelo (Morales et al., 2009a), más los espesores (H) de sedimentos (Amaris et al., 2009), y se le asignan espectros de respuesta (Hernández y Schmitz, 2009). Las diferencias de estos con los espectros en roca exponen los efectos de sitio en cada microzona. Los espectros de diseño (PMR = 475 años) para estas se generaron mediante un estudio paramétrico 1D, con variaciones de V_{s30} y el espesor de sedimentos (H) hasta el basamento, más consideración aproximada de efectos 2D y 3D (Hernández et al., 2011). Adicionalmente se generaron curvas de modificación de los espectros para PMR = 975 años. En la figura 5 se muestran varios espectros de la macrozona CN: en el gráfico 5.a) para $V_{s30} > 325$ m/s; y en el gráfico 5.b) para $185 < V_{s30} \leq 325$ m/s. Se incluye la comparación con los espectros de la norma previa (COVENIN, 2001) para $A_0 = 0.3$ g: en el gráfico 5.a) COVENIN-S1: roca/suelo; y en el gráfico 5.b) COVENIN-S2: suelo. Obsérvese la amplificación que ofrecen los espectros de las microzonas con respecto a los de dicha norma. Aquellos, más otros aspectos y criterios se vienen implementando recientemente en ordenanzas de los municipios del AMC (e.g.: Alcaldía de Caracas, 2018; Alcaldía de El Hatillo, 2021).

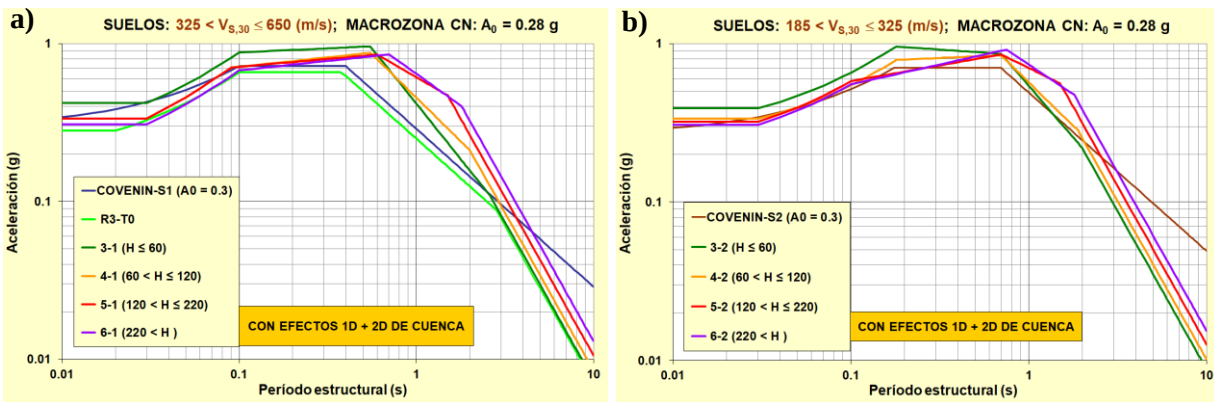


Figura 5. Espectros de diseño (PMR = 475 años) del PMSC en la macrozona CN y espectros S1 (en roca) y S2 (en suelo) de la norma previa COVENIN 1756:2001. a) $V_{s30} > 325$ m/s; b) $185 < V_{s30} \leq 325$ m/s.

Con la finalidad de estimar los efectos de sitio promedios en el centro de Caracas a lo largo de 4 siglos puede considerarse como representativo el desarrollo de la ciudad hacia 1812 (fecha intermedia entre 1567 y 2021), cuyo contorno se expone esquemáticamente como la línea azul de la figura 6, tomando en cuenta la figura 7. La ciudad creció desde la planta original, pero entre 1772 y 1874 se mantuvo aproximadamente con el contorno mostrado (Araque, 2009); el mayor desarrollo posterior ocurrió en la última mitad del siglo XX. Se observa que el contorno representativo indicado queda casi a partes iguales en las microzonas 4-1 ($H = 60$ -120 m; $V_{s30} = 325$ -650 m/s), 4-2 ($H = 60$ -120 m; $V_{s30} = 185$ -325 m/s) y 5 ($H = 120$ -220 m; $V_{s30} = 185$ -650 m/s). Es razonable estimar como efectos de sitio representativos del centro de la ciudad al promedio de ellas.

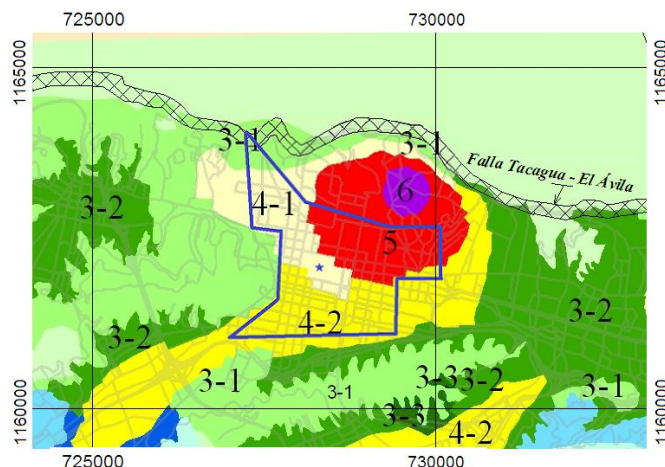


Figura 6. Fracción del mapa de microzonas de Caracas, con las microzonas 3-1, 3-2, 3-3, 4-1, 4-2, 5 y 6. Línea azul: contorno esquemático de Caracas en 1812. Estrella azul: plaza principal de la ciudad.

Para estimar los efectos de sitio para PMRs diferentes al empleado (475 años) en el PMSC, se apela a los factores F_A y F_V de amplificación respecto a roca variables con A0 y A1, indicados en la norma sísmica vigente (COVENIN, 2019), los cuales son semejantes a los expuestos en el estándar estadounidense ASCE7-16 (ASCE, 2016), modificándolos proporcionalmente a los correspondientes del PMSC que incluyen los efectos de la cuenca del valle de Caracas. En la tabla 3 se presentan rangos probables de las citadas respuestas en los sitios de las microzonas del centro de la ciudad (4-1, 4-2 y 5; figura 6), derivados de los resultados del PMSC (Hernández y Schmitz, 2009b; Hernández et al., 2011) indicando los valores mínimos, medias y máximos en cada microzona a partir de las incertidumbres de la amenaza sísmica en roca previamente expuestas (tabla 2), para derivar en el centro promedios de los mínimos, medias y máximos, respectivamente, de cada microzona. Se observa que en estas microzonas en general los valores de A1 son mayores que los de A0. Estos permanecen casi constantes, mientras que los de A1 aumentan con el incremento del espesor H de sedimentos, y con la reducción de la Vs30.

Tabla 3. Respuestas de sitio (g) estimadas en el centro de Caracas, con rangos de incertidumbres. PMR = 72, 200, 475, 975 y 2475 años.

		m i c r o z o n a									prom. CCS: centro (4-1; 4-2; 5)		
PMR (a)		4-1			4-2			5					
	H[sedim.] (m) →	60 – 120			60 – 120			120 – 220					
	Vs30 (m/s) →	325 – 650			185 – 325			185 – 650					
	Aceleración ↓	mín.	med.	máx.	mín.	med.	máx.	mín.	med.	máx.	mín.	med.	máx.
72	A0	0.12	0.13	0.15	0.15	0.16	0.18	0.13	0.14	0.16	0.13	0.15	0.16
	A1	0.09	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.14	0.16	0.19	0.12	0.14	0.16
200	A0	0.20	0.23	0.25	0.23	0.25	0.28	0.21	0.23	0.26	0.21	0.24	0.26
	A1	0.18	0.21	0.24	0.25	0.29	0.34	0.28	0.33	0.38	0.23	0.27	0.32
475	A0	0.28	0.32	0.36	0.29	0.32	0.36	0.28	0.31	0.35	0.28	0.32	0.36
	A1	0.29	0.34	0.41	0.40	0.46	0.55	0.45	0.53	0.63	0.38	0.45	0.53
975	A0	0.37	0.42	0.47	0.35	0.40	0.44	0.36	0.40	0.45	0.36	0.41	0.45
	A1	0.39	0.47	0.56	0.52	0.63	0.74	0.60	0.73	0.86	0.51	0.61	0.72
2475	A0	0.49	0.56	0.61	0.43	0.48	0.53	0.46	0.52	0.57	0.46	0.52	0.57
	A1	0.57	0.68	0.80	0.73	0.88	1.03	0.85	1.03	1.21	0.72	0.86	1.01

ANÁLISIS DE RECURRENCIA DE INTENSIDADES

En forma genérica, en sismología e ingeniería sísmica se denomina “intensidad” a una medida o estimado de los efectos de un terremoto en un determinado sitio, claramente diferenciada de la “magnitud”, la cual es una medida de aquel en su fuente. Existen diversas clases de intensidad, tales como la aceleración pico del terreno en el sitio (A0) y las respuestas espectrales (v.g. A1), las cuales pueden medirse instrumentalmente. Sin embargo, no siempre es factible realizar mediciones y obviamente no ha sido posible en siglos pasados. Desde el siglo XIX se desarrollaron medidas cualitativas de intensidad, en función de las sensaciones humanas y los efectos en las construcciones, que reciben el nombre de “intensidades macrosísmicas”. Pese a su carácter aproximado, han demostrado utilidad y hasta la posibilidad de establecer correlaciones con la magnitud sísmica. Actualmente se emplean con éxito para evaluaciones rápidas de los efectos locales y la toma de decisiones. Son un factor central para analizar la sismicidad en escalas temporales amplias, y así estimar la recurrencia sísmica y verificar las evaluaciones analíticas de amenaza sísmica, lo cual es objetivo de este trabajo para Caracas.

En Venezuela se cuenta con una excelente recopilación de intensidades macrosísmicas de todo el país entre 1530 y 1998 (Grases et al., 1999), bastante completa para Caracas, además de otras previas (Centeno, 1940; CERESIS, 1985). Con tal soporte se ha planteado un análisis de recurrencia de dichas intensidades, observadas en Caracas entre 1567 (fecha de su fundación) y 1998, extendido a 2021 para las mayores intensidades. Este análisis ofrece un estimado del peligro sísmico en el sitio, a diferencia de la evaluación de amenaza sísmica en roca virtual.

Se asignaron intensidades I_{EMS} según la escala macrosísmica europea EMS-98 (Grünthal, 2003), la cual se apoya en la calibración mundial de efectos humanos y daños de diverso tipo en construcciones, exponiendo gran rigor de asignaciones. En este trabajo para las intensidades se emplean números arábigos en vez de romanos según admite la EMS; se considera que las observaciones de intensidades deben darse en unidades enteras o en mitades de ellas, pero con fines predictivos es válido usar decimales (Musson et al., 2010). Se añade el criterio de que la máxima intensidad creíble es 11. En la escala EMS-98 esta intensidad opera como una cota superior, disponiendo la 12 sólo por tradición.

El empleo de la escala EMS-98 fue una decisión basada en la precisión que ofrece. Sus resultados generales son aplicables a escala mundial y para diversas épocas constructivas. Esta escala fue un refinamiento de la previa escala MSK-64 (Medvedev et al., 1964), mundialmente utilizada por casi 30 años, antes de que se generara la escala EMS-92. Esta versión fue sometida a pruebas, habiendo sido exitosa para evaluar las intensidades en los terremotos de Maharashtra 1993, Northridge 1994 y Kobe 1995, entre otros, antes de definir la versión EMS-98. La escala se presentó en una sesión temática en la 11ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica en Acapulco (Grünthal & Gutiérrez, 1996), como la primera diseñada para ser utilizada por ingenieros y sismólogos, en vez de solamente por sismólogos, recibiendo aprobación. La escala MSK estuvo basada en la escala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) (Sieberg, 1923) y la escala de Mercalli modificada, MM (Wood & Neumann, 1931); Richter (1956, 1958) propuso unas modificaciones. Todas estas escalas han tratado de mantener la amplitud mundial de aplicación, ofreciendo mejoras sucesivas para su empleo y evitar dudas de asignación. La versión de 1931 describe los tipos de construcción en forma algo ambigua. La versión de 1956 diferencia 4 tipos constructivos, pero mantiene los grados de daño en forma genérica. La escala MSK-64 distingue 3 tipos constructivos, 5 niveles de daños y concreta 3 cantidades de afectación. La EMS-98 lo amplió, estableciendo 6 clases de vulnerabilidad de 15 tipos de estructuras, con 10 grados de daños y 3 cantidades de afectación; incluye como materiales constructivos a piedra, adobe, diversas calidades de mampostería, etc., y así puede revisar apropiadamente construcciones de siglos anteriores. Sin embargo, en un análisis de equivalencia de estas escalas se encuentra que bien empleadas conducen a los mismos grados de intensidad para las construcciones antiguas y de menor calidad (Musson et al., 2010); lo que las diferencia

es la relativa facilidad de uso y la adición para la EMS-98 de edificaciones modernas. Por los motivos expuestos, la escala EMS-98 es la más ventajosa y preferible, por ser más precisa y segura para estimar las intensidades sísmicas ocurridas en la historia de Caracas.

Por otro lado, se ha promovido la escala de intensidades INQUA (“International Union for Quaternary Research”; Michetti et al., 2007) mediante asignaciones ambientales, geológicas entre ellas, con grados de intensidad hasta 12. Sin embargo, es manifiesto que el empleo de las intensidades 11 y 12 pretende la asignación de una única intensidad en áreas grandes perdiendo el detallado local de efectos. En este estudio no se incluyen intensidades asociadas a efectos ambientales en coincidencia con el criterio de la EMS-98 (Grünthal ed., 2003; Musson et al., 2010) de que esos efectos se correlacionan mal con los vibratorios y por tanto no deben ser factores para la asignación de las intensidades macrosísmicas usuales.

Asignación de intensidades

Se tomó como base estadística el catálogo de los efectos de los sismos sentidos en Venezuela, (Grases et al., 1999), recopilando los reportados en Caracas entre 1567 y fin de 1998 (~ 431 años). Se añade un sismo fuertemente sentido en 2009, con validez de la estadística de los sismos fuertes ($I_{EMS} \geq 6$) hasta 2021. Se efectuaron varias comparaciones con las asignaciones de otros autores (Centeno, 1940; Fiedler, 1961, 1968, 1972; CERESIS, 1985; etc.), quienes emplearon varias escalas desde la antigua M, la MCS, la MSK y la MM. En este trabajo se asignaron intensidades para observaciones calificadas entre débiles a desastrosas, con I_{EMS} entre 3 y 9.5 en función de los efectos reportados en el catálogo citado, considerando valores intermedios entre los principales de la escala. Se revisan las asignaciones de los cinco mayores terremotos sentidos en Caracas, ocurridos en 1641, 1766, 1812, 1900 y 1967, dada su importancia para inferir las recurrencias. Conviene destacar que las intensidades asignadas incluyen los efectos de sitio, como queda claro en la documentación de la EMS-98.

El terremoto de 1641 ($M \sim 7.3$; Hernández, 2009a) fue designado como “desastroso” por Centeno (1940), con $I_M = 9$ a 10 e $I_{MCS} = 10$ a 11. Fiedler (1961) le asignó $I_{MCS} = 9$ a 10, calificado como “destrucción” a “aniquilación”, rebajado luego a $I_{MCS} = 7.5$ a 8 (Fiedler, 1972). CERESIS (1985) asignó $I_{MM} = 9$; debido a los templos derrumbados, junto con las casas destruidas, sería adecuada esta asignación. Para aplicar la escala EMS-98, existe soporte en la carta del obispo de Caracas al rey (Grases et al., 1999); se indica que las casas sufrieron graves daños, pero no si se derrumbaron algunas o muchas, soportando $I_{EMS} = 8$ a 9; por otro lado, algunas iglesias y conventos se derrumbaron parcialmente, apuntando a $I_{EMS} = 9$. En consecuencia, para este terremoto se asigna $I_{EMS} = 8.5$, siguiendo las recomendaciones de los autores de la escala EMS.

El terremoto de 1766 ($M \sim 7.9$, profundidad ~ 85 km, ruptura a ~ 550 km de Caracas, Hernández, 2009b) fue “ruinoso” según Centeno (1940) con $I_M = 8$, $I_{MCS} = 9$. Fiedler (1961) le asignó $I_{MCS} = 8$, considerado “destructor”. En cambio, CERESIS (1985) asignó $I_{MM} = 6$ y Mocquet (2007) $I_{EMS} = 5$ a 6. Estos bajos valores parecen condicionados por el poco daño sufrido en Caracas por las casas de habitación. Sin embargo, ocurrieron daños importantes en once iglesias y dos conventos, con algún desplome parcial; esta situación apunta al grado 7 u 8. Una explicación de la diferencia de daños observados consiste en que se trata de un sismo de gran magnitud, lejano y profundo, que afectó más a las edificaciones altas que a las bajas. Se asigna $I_{EMS} = 7$ a los efectos del terremoto de 1766 en Caracas, como un estimado promedio razonable.

El terremoto de 1812 ($M \sim 7.5$, profundidad ~ 10 km, ruptura a ~ 14 km de Caracas, Hernández, 2009a) en Caracas fue designado como “espantoso” y “desastroso” por Centeno (1940) con $I_M = 10$ e $I_{MCS} = 10$ a 11. Fiedler (1961) le asignó $I_{MCS} = 10$ a 11, calificado como “aniquilación” a “catástrofe”, pero luego (1972) le asignó $I_{MCS} = 9.5$. CERESIS (1985, por Grases) asignó $I_{MM} = 9.5$; el grado 9 supone que se

admite “daño considerable” en “estructuras bien diseñadas” y/o “grande” en “estructuras sólidas. En la figura 7 se muestra el mapa de Caracas para la fecha, indicando las construcciones dañadas. Según Altez (2005): a) la mayoría (60%) de las casas colapsaron; b) muchos (46%) edificios se derrumbaron, otro tanto sufrió daños severos y sólo 8% quedaron con daños menores. Considerando que las primeras estructuras clasifican como clase A (la más vulnerable) y las segundas entre clases A y B, y por tanto “algunas” clase B se habrían derrumbado ($\sim 20\%$, más que “pocas” que sería $\leq 10\%$) se dispone de dos condiciones que apuntan a más que grado 9, aunque menos que 10. Así, se adopta $I_{EMS} = 9.5$ para el terremoto de 1812, coincidiendo con las asignaciones de Fiedler y Grases.

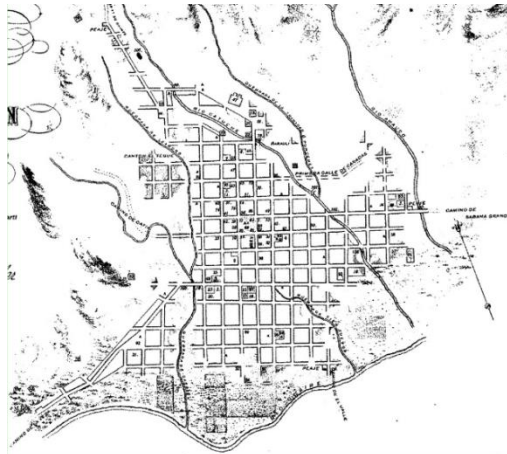


Figura 7. Mapa de Caracas en 1812 (Altez, 2005); los puntos aparentes indican las construcciones dañadas, con la numeración observable en una ampliación de la figura.

Al terremoto de 1900 $M = 7.6$ a 7.7 , (Abe y Noguchi, 1983; Fiedler, 1988; Hernández, 2009a) Centeno (1940) lo calificó de “ruinoso” con $I_M = 8$, $I_{MCS} = 9$. Fiedler (1961) le asignó $I_{MCS} = 9$, calificado como “destrucción”; luego (1972) le asignó $I_{MCS} = 8.5$. Jakubowicz y Larotta (1974) asignaron $I_{MM} = 7$, al igual que CERESIS (1985, por Grases); parece que el daño menor de algunas casas se asoció a esta caracterización; sin embargo, los grandes daños y deterioros en iglesias y caída de techos y arcos en edificios de mayor calidad, apuntan a $I_{MM} = 8$, más consistente con $I_{MCS} = 8.5$ o 9 de Fiedler. En una reevaluación reciente se estima $I_{MM} = 8$ (Leal et al., 2018). En la figura 8 se muestra la ubicación de las edificaciones dañadas, las cuales quedan en las tres microzonas expuestas en la figura 6. Según la escala EMS-98: a) no corresponde $I_{EMS} = 7$ pues ocurrieron derrumbes; b) $I_{EMS} = 8$ es consistente con el derrumbe de algunas construcciones de baja calidad, y el daño sustancial a severo de algunas construcciones de calidad mediana; c) $I_{EMS} = 9$ sería excesivo porque supondría el derrumbe masivo de construcciones precarias o el colapso de algunas de calidad superior, lo cual no sucedió. En conclusión, se asigna $I_{EMS} = 8$, en coincidencia con la última evaluación citada.



Figura 8. Ubicación de las edificaciones dañadas en Caracas en el terremoto de 1900 (Rodríguez et al., 2009).

El terremoto de 1967 ($M_{6.6}$ entre cuatro sub-eventos; Suárez y Nábělek, 1990) produjo una intensidad de grado 8 en la zona de mayores espesores de sedimentos con 4 edificios modernos para la fecha derrumbados, mientras que fue menor en roca al oeste del centro de Caracas, con $I_{MSK} = 6.5$ a 7 (Fiedler, 1968). En las microzonas sedimentarias del centro de Caracas, dado que se derrumbaron unas pocas viviendas de baja calidad, y por tanto $I_{EMS} > 7$, pero no fueron muchas aquellas con daño estructural severo, entonces $I_{EMS} < 8$, y además pocos edificios sufrieron daños estructurales moderados o severos ($I_{EMS} = 7$ a 8), puede decirse que $I_{EMS} = 7.5$.

Además, deben recordarse tres sismos recientes, dos en 2009 y uno en 2018. El primero de $M_{5.4}$ al sur, en la falla La Victoria, condujo a $I_{EMS} \sim 4$. El segundo de $M_{6.4}$ ocurrió en el noroccidente del país cerca de Tucacas a ~ 110 km de Caracas, afectando un centenar de edificios (Guía de Venezuela, 2009); por imprecisión de los datos de I_{EMS} estaría entre 6.5 y 7, para procesamiento se adopta $I_{EMS} = 7$. El tercero se trata del mayor registrado tras el de 1900, un $M_{7.3}$ ocurrido en el oriente del país a unos 450 km de Caracas, con profundidad ~ 120 km; es un terremoto semejante al de 1766, pero de sólo $I_{EMS} \sim 4.5$ en la ciudad (Coronel, 2018). Sólo el segundo sismo se añade a la lista de recopilación.

En resumen, se encontraron 733 sismos sentidos a los que se puede asignar $I_{EMS} \geq 3$. De ellos, a 492 sismos se asignó $I_{EMS} = 3$; a 179 sismos se asignó $I_{EMS} = 4$; a 41 sismos se asignó $I_{EMS} = 5$; a 12 sismos se asignó $I_{EMS} = 6$; a 5 sismos se asignó $I_{EMS} = 7$ (de 1766, dos réplicas del mayor de 1812: una en 1812 y otra en 1820, de 1865 y de 2009); más las cuatro asignaciones mayores comentadas de 8.5, 9.5, 8 y 7.5 (terremotos de 1641, 1812, 1900 y 1967). Por cierto, es comprobable que el número anual de reportes de intensidades I_{EMS} con valor entre 3 y 5 aumentó en los 20 años siguientes a cada sismo importante para luego disminuir. Es bueno destacar que las diferencias de asignación de I_{EMS} entre los cinco mayores terremotos están en acuerdo cualitativo con la valoración histórica general, independientemente de sus valores concretos. Se considera que en el centro de Caracas el más grave fue el de 1812, seguido por los de 1641 y 1900, siendo menos dañinos los de 1967 y 1766. En la figura 9 se reportan los sismos revisados según su fecha, con las intensidades asignadas, separando los sismos con $I_{EMS} \geq 6$ entre 1567 y 2021 de los sismos con $I_{EMS} \leq 5$ entre 1736 y 1998.

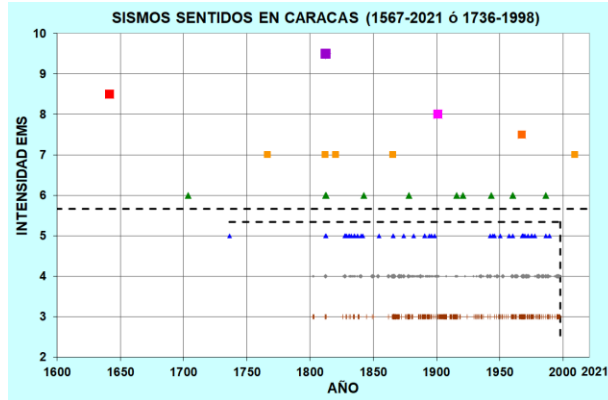


Figura 9. Sismos reportados en Caracas con I_{EMS} asignadas, entre 1567 y 2021 para $I_{EMS} \geq 6$, y entre 1736 y 1998 para $I_{EMS} \leq 5$. Las líneas punteadas separan los dos intervalos de validez de las intensidades.

Procesamiento de los datos de intensidades

Se efectuó un examen de la representatividad de los datos procesados, con apoyo en la figura 10. En ella se muestran las tasas de ocurrencia de intensidades mayores o iguales a una dada (o tasas de excedencia de la intensidad de referencia), desde la fecha de ocurrencia de un evento hasta la fecha final reportada. Las curvas muestran un segmento inicial sin suficientes sismos reportados, el cual no es representativo de las tasas típicas de ocurrencia. A partir de cierta fecha, las tasas tienden a estabilizarse, y puede suponerse que los datos son completos, aunque presente altibajos propios de las variaciones de la sismicidad por épocas. Se indica la fecha del terremoto de 1967, apreciándose el cambio en la tasa de excedencia.

Puede considerarse que los datos son completos para los 4 mayores eventos: $I_{EMS} \geq 7.5$. El grupo $I_{EMS} \geq 7$ puede considerarse completo desde ~1700 ya que se registró un caso con $I_{EMS} = 6$ en 1703 y poco después otro con $I_{EMS} = 5$; es razonable suponer que, si hubiera ocurrido uno más grave con $I_{EMS} = 7$, habría sido reportado. La completitud de los sismos registrados con $I_{EMS} \geq 6$ es algo dudosa en ese lapso, vista su posterior tasa de ocurrencia en los siglos XIX y XX; se toman como completos a partir de 1812. Dada la estabilidad de las tasas calculadas, los eventos con $I_{EMS} \geq 5$ también parecen completos desde 1812. Por el contrario, los eventos con $I_{EMS} \geq 4$ sólo serían completos a partir de 1827, fecha refrendada por inspección de la densidad de ocurrencias de $I_{EMS} = 4$ mostrada en la figura 9, pese a un intervalo posterior de poca ocurrencia. Los sismos con $I_{EMS} \geq 3$ muestran completitud a partir de 1865, tanto por el cambio en la curva de la figura 10, como por la densidad de casos con $I_{EMS} = 3$ en las figuras 9 y 10.

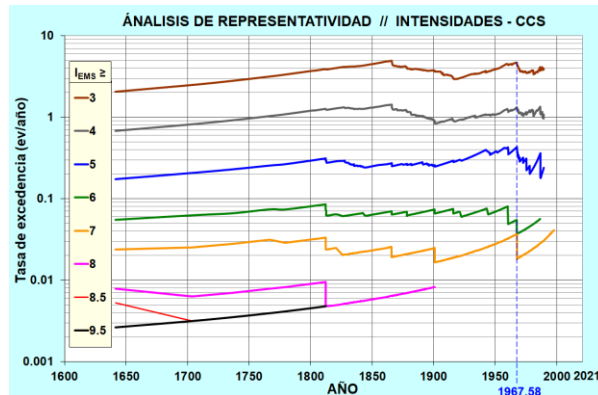


Figura 10. Evolución de tasas de excedencia de intensidades evaluadas.

Inicialmente, dentro de los lapsos de completitud indicados, a partir de los datos totales se estimaron valores provisionales de las tasas promedios de excedencia (λ'), los periodos medios de retorno (PMR'), la desviación estándar $\sigma_{PMR'}$ de los lapsos inter-eventos y el coeficiente de variación $V_{PMR'} = \sigma_{PMR'} / PMR'$, obteniéndose los valores mostrados en la tabla 4.A.

Para estudiar la recurrencia se apela a un proceso de Poisson, un modelo sin memoria que es una aproximación aceptada como básica (v.g.: Reiter, 1990; Petersen et al., 2008; Bossard, 2018), antes de investigar refinamientos de procesos no poissonianos con memoria (v.g.: Kulkarni et al., 2013), no tratados aquí. La evolución de la ciudad no afecta el modelado, ya que ella opera como un instrumento de detección de las intensidades, cuya recurrencia es la única modelada. Como es conocido, en un proceso ideal de Poisson la desviación estándar (σ_{PMR}) de los lapsos inter-eventos es igual a su valor medio (PMR), es decir, el coeficiente de variación $V_{PMR} = 1$. En el caso de procesos con memoria que suelen denominarse cuasi-periódicos, $V_{PMR} < 1$, típicamente con $V_{PMR} = 0.3$ a 0.7 (Wu et al., 1995); el caso extremo, $V_{PMR} = 0$, es el de un proceso absolutamente periódico (PMR fijo sin variación). Para los grupos $I_{EMS} = 6$ a 8 el proceso muestra memoria ($V_{PMR'} < 1$) y las intensidades pueden considerarse confiables. Por otro lado, para los grupos $I_{EMS} \geq 3$ a 5 : $V_{PMR'} > 1$, indicando que devienen de procesos en que los eventos no son independientes, sino que se asocian con casos de lapsos inter-eventos muy cortos; esto es una muestra del alto contenido de réplicas y agrupamientos ('clusterings').

Tabla 4. Parámetros de recurrencia de intensidades.

I_{EMS}	A. sin eliminación de réplicas					B. con eliminación de réplicas				
	eventos' exc.#	λ' (eventos /año)	PMR' (años)	$\sigma_{PMR'}$ (años)	$V_{PMR'}$	eventos'' exc.#	λ'' (eventos /año)	PMR'' (años)	$\sigma_{PMR''}$ (años)	$V_{PMR''}$
3	647	4.83	0.21	0.41	1.96	261	1.95	0.51	0.53	1.04
4	224	1.30	0.77	1.3	1.65	119	0.692	1.45	1.47	1.02
5	57	0.305	3.3	4.3	1.30	41	0.219	4.56	4.49	0.98
6	18	0.0857	12	9.4	0.81	12	0.0571	17.5	6.49	0.37
7	8	0.0248	40	23	0.57	6	0.0186	54	12	0.23
7.5	4	0.00880	114	55	0.48	4	0.00880	114	55	0.48
8	3	0.00660	151	58	0.38	3	0.00660	151	58	0.38
8.5	2	0.00440	227	--	--	2	0.00440	227	--	--
9.5	1	0.00220*	454*	--	--	1	0.00220*	454*	--	--

Número de eventos excedentes para la intensidad referida; * Valor de referencia con un solo dato.

Como siguiente etapa del trabajo se eliminaron los agrupamientos de intensidades con lapsos inter-eventos muy cortos para los grupos $I_{EMS} \geq 3$ a 5 , debidos a réplicas o reportes paralelos, hasta que el coeficiente de variación $V_{PMR'}$ fuera cercano a 1. Para $I_{EMS} = 6$ y 7 también se excluyeron algunas réplicas evidentes. Para $I_{EMS} > 7$ se mantuvieron los datos previos; las intensidades $I_{EMS} 8.5$ y 9.5 carecen de σ_{PMR} por escasez de datos. Tras la desagrupación quedaron 184 sismos de $I_{EMS} = 3$ (se eliminó el 63%), 84 de $I_{EMS} = 4$ (se eliminó el 53%), 29 de $I_{EMS} = 5$ (se eliminó el 29%), 9 de $I_{EMS} = 6$ (se eliminó el 25%; por cierto el terremoto de 1878, al sur, que destruyó Cúa se sintió en Caracas con $I_{EMS} = 6$), 3 de $I_{EMS} = 7$ (se eliminó el 40%) y se mantuvieron los previos de $I_{EMS} \geq 7.5$.

Se obtuvieron los valores finales de los periodos medios de retorno PMR'' y parámetros asociados, indicados en la tabla 4.B. Ahora para $I_{EMS} \leq 5$ los coeficientes de variación son ~ 1 , mientras que se mantienen < 1 para $I_{EMS} \geq 6$ por la posible memoria. Los valores de las intensidades intermedias ($I_{EMS} \geq 5$ a 7) pueden considerarse bastante confiables. Las correspondientes a las intensidades mayores ($I_{EMS} \geq 7.5$) son menos representativas, dado que no ha transcurrido suficiente tiempo para observar claramente sus periodos medios de recurrencia; los valores asignados son simplemente el mejor estimado posible. En

especial, para $I_{EMS} \geq 9.5$ no existe recurrencia aún; el valor indicado es simplemente el que se suele recomendar al practicar este método a fin de no ignorar el dato.

Se efectuó un modelado de la excedencia de intensidades, llamado también de recurrencia, basado en la observación mundial de que las intensidades sísmicas moderadas siguen aproximadamente una ley exponencial de las tasas de excedencia anual λ : $\log(\lambda) = a + b I_{EMS}$ (e.g. Reiter, 1990), que viene a ser un proceso de Poisson. Puede suponerse que, si los datos procesados siguen este tipo de relación, son relativamente confiables. Se determinó la pendiente exponencial λ mediante un ajuste por mínimos cuadrados de los valores λ de la tabla 4.B, obteniéndose la expresión (1), la cual se considera válida hasta $I_{EMS} = 6$, a partir de la cual se aumenta la pendiente con la truncación a $I_{EMS} = 11$, conduciendo a la expresión (2). En la figura 11 se grafica el modelo construido.

$$\lambda = 48.11 \exp(-1.098 I_{EMS}) \quad \text{para } I_{EMS} \leq 6 \quad (1)$$

$$\lambda = 0.06658 (\exp(-1.098 (I_{EMS} - 6)) - 0.004131) \quad \text{para } I_{EMS} > 6 \quad (2)$$

Para tratar la incertidumbre se añadieron dos modelos, suponiendo que λ es dudosa en 30%, en uno reasignando para cada intensidad el 20% a la superior y el 10% a la inferior (modelo de tasa máx.), y a la inversa en el otro modelo (modelo de tasa mín.). Además, se replantearon las intensidades de los dos terremotos mayores, aumentándolas en 0.5 para el modelo de tasa máxima (a $I_{EMS} = 10$ y 9, respectivamente) y reduciéndolas en 0.5 para el modelo de tasa mínima (a $I_{EMS} = 9$ y 8, respectivamente).

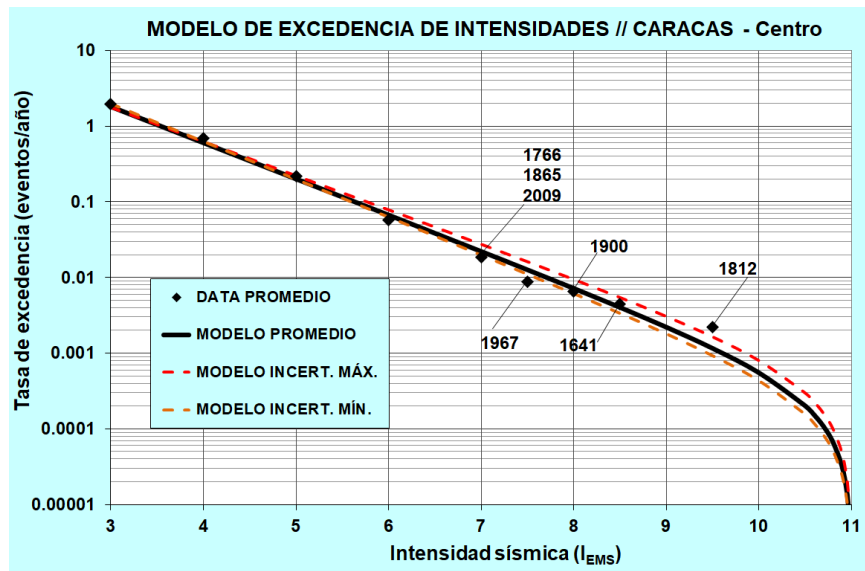


Figura 11. Modelo promedio de excedencia de intensidades sísmicas en Caracas-centro, y modelos con incertidumbres de los datos, indicando los principales sismos observados.

En la tabla 5.A, en función de las intensidades macrosísmicas, se indican los valores de PMR obtenidos, los cuales se pueden comparar con los valores PMR de la tabla 4.B. Los valores del modelo promedio son cercanos a los datos son completos, excepto para las intensidades 7.5 y 9.5, para las que difieren algo. Nótese el amplio rango de incertidumbres de PMR para las grandes intensidades, como es razonable esperar. Se pueden estimar también las intensidades esperadas en el centro de Caracas para un determinado periodo de retorno, expuestas en la tabla 5.B con la calificación dada por la escala de intensidades EMS-98.

Tabla 5. Modelos de excedencia de intensidades en el centro de Caracas.

A. PMR según I _{EMS}					B. I _{EMS} para PMR dado				CALIFICACIÓN
I _{EMS}	λ _{prom.} (eventos/ año)	PMR (años)			PMR (años)	I _{EMS}			
		mín.	prom.	máx.		mín.	prom.	máx.	
3	1.79	0.56	0.56	0.51	15	5.9	6.0	6.2	Levemente dañino
4	0.596	1.6	1.7	1.6	30	6.5	6.6	6.8	Levemente dañino a dañino
5	0.199	4.5	5.0	5.1	50	7.0	7.1	7.3	Dañino
6	0.0663	13	15	16	72	7.3	7.4	7.6	Dañino a gravemente dañino
7	0.0219	36	46	51	140	7.9	8.0	8.3	Gravemente dañino
7.5	0.0126	61	80	91	200	8.2	8.3	8.6	Gravemente dañino a destructor
8	0.00713	110	140	160	475	8.9	9.0	9.3	Destructor
8.5	0.00400	180	250	300	700	9.2	9.3	9.6	Destructor a muy destructor
9	0.00220	320	460	560	975	9.4	9.6	9.8	Destructor a muy destructor
9.5	0.00115	600	870	1100	1500	9.7	9.9	10.1	Muy destructor
10	0.000549	1200	1800	2300	2000	9.9	10.1	10.3	Muy destructor
10.5	0.000201	3300	5000	6400	2475	10.0	10.2	10.4	Muy destructor
--	--	--	--	--	5000	10.4	10.5	10.6	Muy destructor a devastador
--	--	--	--	--	10000	10.6	10.7	10.8	Muy destructor a devastador

Comparación con otros trabajos

En la tabla 6 se comparan las relaciones derivadas en este estudio para Caracas entre las intensidades macrosísmicas y sus periodos medios de retorno, con: a) las expuestas por Aggarwal et al. (1981); b) las reportadas por CRESTA ("Catastrophe Risk Evaluating and Standardizing Target Accumulations", consorcio de las compañías reaseguradoras internacionales) en 1984 (referido en Grases, 1989); c) las inferidas por Grases (2002).

Tabla 6. Comparación de periodos medios de retorno estimados en Caracas, para varias intensidades macrosísmicas, según diversos trabajos.

$I_{MM} \sim I_{EMS}$	PERIODO MEDIO DE RETORNO, PMR (años)			
	Aggarwal et al. (1981)	CRESTA-1984	Grases (2002)	Este estudio ($\pm$ variaciones máximas)
4	--	--	4.3	1.7 ± 0.1
5	--	--	14	5.0 ± 0.5
6	--	--	30	15 ± 2
7	--	75	56	46 ± 10
8	50	290	112	140 ± 30
9	200	1250	337	460 ± 140
10	500	--	--	1800 ± 600

Los valores de Aggarwal et al. provienen de una evaluación sismotectónica. Pero es dudoso que entre las intensidades $I_{MM} = 8$ y 9 el valor de PMR se cuadruple mientras entre 9 y 10 poco más que se duplique, pues acepta que se mantienen relaciones casi uniformes al aumentar la intensidad en una cantidad fija (Reiter, 1990). Los dos valores menores resultan cuestionables: no se han repetido en Caracas eventos de $I_{MM} \geq 8$ con intervalo promedio de 50 años, ni de $I_{MM} \geq 9$ con promedio de 200 años. No se ha podido disponer del método empleado por CRESTA para inferir sus valores, pero, en comparación con las estadísticas son valores insostenibles: las intensidades $I_{MM} \geq 7$ y 8 han ocurrido más frecuentemente. Los valores de Grases corresponden a una estadística de sismos entre 1641 y 1978, un lapso de 337 años, pero los datos recopilados no sobrellevaron un ajuste de los periodos de validez, el cual los habría modificado

algo. Es obvio de su lectura que el mayor valor para $I_{MM} \geq 9$ deviene de asignar esa intensidad al terremoto de 1812 para una única ocurrencia en 337 años; el valor $PMR = 112$ años para $I_{MM} \geq 8$ proviene de 3 sismos (1641, 1812 y 1900) en ese lapso ($112 = 337/3$), y así sucesivamente.

Respecto a este estudio: a) se ha considerado un mayor lapso, 1567-2021 (454 años) para los grandes sismos, comenzando en 1567 (fundación de Caracas) ya que de haber ocurrido uno severo antes de 1641 se habría reportado (ya en 1610 se reportó un terremoto severo en Los Andes); b) se han revisado los periodos de completitud de cada intensidad a semejanza de la práctica de los catálogos sismológicos, los cuales reducen los valores de PMR para las intensidades menores; c) se han procesado los datos y los valores de PMR provienen del modelado, conduciendo a que los valores inferidos sean más precisos; d) al aumentar la intensidad en una unidad el PMR aumenta uniformemente en ~ 3 (mientras que, por ejemplo, en ‘Grases’ no es uniforme); e) se indican incertidumbres de los valores (por cierto, los valores de Grases para $I_{MM} = 7, 8$ y 9 están hacia los extremos de los de este estudio: $[56 = 46 + 10]$; $[112 = 140 - 28]$ y $[337 = 460 - 123]$).

INTENSIDADES MACROSÍSMICAS VS. MOVIMIENTO DEL TERRENO

Para llevar a cabo la comparación entre la evaluación de amenaza sísmica y el análisis de recurrencia se necesita como elemento auxiliar apelar a correlaciones entre las intensidades macrosísmicas y el movimiento del terreno. Las principales variables manejadas han sido la aceleración pico A_0 y la velocidad pico V_0 , la cual se asocia mejor con las intensidades; además, la velocidad pico se relaciona bien con la respuesta espectral a periodo estructural $T = 1$ s (Newmark y Hall, 1982; Pankow y Pechmann, 2004). Las formulaciones tradicionales corresponden a las llamadas IGMCEs (“intensity to ground motion conversion equations”), o sea “fórmulas de conversión de intensidad al movimiento del terreno”. Modernamente se han desarrollado relaciones inversas llamadas GMICEs (“ground motion to intensity conversion equations”), es decir “fórmulas de conversión del movimiento del terreno a intensidad”, para diversas evaluaciones de riesgo sísmico.

Formulaciones

Existe una gran variedad de fórmulas de conversión que ofrecen resultados en función de los datos empleados para su elaboración y de su origen regional. Dada la carencia de datos recopilados en el país, se revisa un grupo de ellas e infieren fórmulas de carácter promedio. Se seleccionaron cuatro formulaciones posteriores al año 2000, con cierta variedad regional: a) [A&K]: de Atkinson y Kaka (2007) desarrollada para la zona continental central de EEUU más California; b) [T&D]: de Tselentis y Danciu (2008) desarrollada para Grecia; c) [Cea]: de Caprio et al. (2015) con resultados regionales para California, Grecia e Italia, más promedio suprarregional; d) [Gea]: de Gomez Capera et al. (2019) elaborada para Italia.

Los cuatro autores presentan formulaciones para A_0 y V_0 en función de la intensidad. Además, [A&K] y [Gea] incluyen formulaciones para A_1 , entre otras. Los datos empleados provienen de estadísticas de intensidades observadas en las respectivas regiones: a) [A&K] reportan 165 asignaciones de 29 sismos; b) [T&D] emplean 310 asignaciones de 89 sismos de Grecia; b) [Cea] procesan 4907 asignaciones de una amplia colección de sismos de las 3 regiones indicadas; c) [Gea] utilizan 240 asignaciones de 67 sismos de Italia. La intensidad de las tres primeras formulaciones fue en general la de Mercalli Modificada (MM); las formulaciones [Gea] y la [Cea] (esta con los datos de Italia) manejan la escala MCS. Según Musson et al. (2010) $I_{MM} \sim I_{EMS}$, excepto para los grados 11 y 12, e $I_{MCS} \sim I_{EMS}$, menos para grado 12; como los dos grados mayores están excluidos de los datos, se pueden igualar las observaciones de las 3 escalas.

Correlaciones entre intensidades y aceleración pico del terreno

En la figura 12.a se indican los datos medios de A0 usados por los autores citados arriba; presentan correlaciones entre la intensidad (I_{MM} o I_{MCS}) y la aceleración pico del terreno, las cuales se exponen gráficamente en la figura 12.b. Las formulaciones tradicionales relacionan la intensidad contra $\log(A0)$ o viceversa, con expresión lineal o bilineal. En [Gea] se expone una expresión bi-logarítmica que es equivalente a una fórmula potencial. Para este trabajo, a partir de los mismos grupos de datos se derivan nuevas formulaciones IGMCEs de tipo potencial, con los datos medios de cada uno de los autores; tiene por objeto obtener correlaciones de carácter semejante, cuyo promedio se aplica a estimar las respuestas de aceleración asociadas a las intensidades obtenidas en el análisis de recurrencia (el cual es un problema de tipo IGMCE). La expresión (3) es un ajuste del promedio de ellas, con A0 en cm/s^2 ; es de notar que las expresiones obtenidas son válidas para todos los datos $2 \leq I_{EMS} \leq 10.5$. En la figura 12.c se exhiben estas correlaciones derivadas, junto con su promedio; nótese que éste es cercano a la correlación derivada para [Cea] que es justamente un promedio suprarregional, tal como el correspondiente a este estudio.

$$[\text{Promedio}]\text{-A0-derivado: } A0 = 0.06591 (I_{EMS})^{3.917}; \quad 2 \leq I_{EMS} \leq 10.5 \quad (3)$$

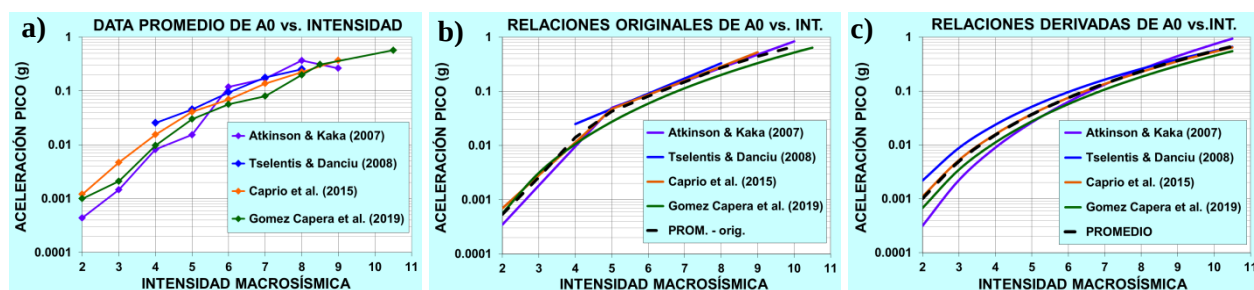


Figura 12. a) Medias de A0 (g) recopiladas para cada intensidad; b) Correlaciones originales de A0 vs. intensidad sísmica; c) Correlaciones de A0 derivadas en este estudio.

Correlaciones entre intensidades y velocidad pico del terreno

En la figura 13.a se indican los datos promedios de V0 usados por los autores citados arriba; presentan correlaciones entre la intensidad (I_{MM} o I_{MCS}) y la velocidad pico del terreno, las cuales se exponen gráficamente en la figura 13.b. Para este trabajo, a partir de los mismos grupos de datos se derivan nuevas formulaciones IGMCEs de tipo potencial, con los datos promedios de cada uno de los autores. La expresión (4) es un ajuste del promedio de ellas, con V0 en cm/s ; las expresiones obtenidas son válidas para todos los datos $2 \leq I_{EMS} \leq 10.5$. En la figura 13.c se exhiben estas correlaciones derivadas, junto con su promedio.

$$[\text{Promedio}]\text{-V0-derivado: } V0 = 0.001455 (I_{EMS})^{4.668}; \quad 2 \leq I_{EMS} \leq 10.5 \quad (4)$$

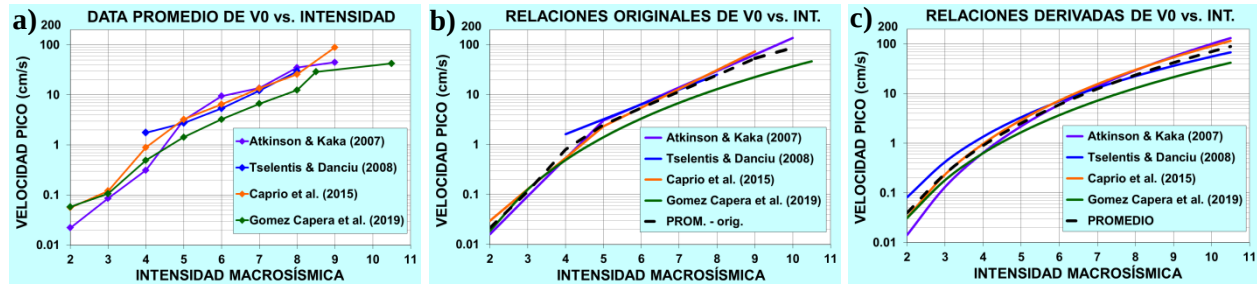


Figura 13. a) Medias de V_0 (cm/s) recopiladas para cada intensidad; b) Correlaciones originales de V_0 vs. intensidad sísmica; c) Correlaciones de V_0 derivadas en este estudio.

Incertidumbres de las correlaciones

Interesa estimar las incertidumbres de las correlaciones manejadas, las cuales se asocian a las dispersiones de sus correlaciones. Se examinan las correspondientes a las formulaciones de [Gea], de las cuales se dispone la totalidad de los datos (240 puntos). En primer lugar se revisa el caso de la aceleración pico y luego el de la velocidad pico.

En la figura 14.a se muestran como rombos negros las aceleraciones pico (A_0) versus la intensidad macrosísmica (I_{MCS}), y los valores medios para cada intensidad como cuadrados violetas. Se expone la correlación potencial media de A_0 vs. I_{MCS} , para el conjunto de los datos y dicha media $\pm$ la desviación típica σ (o dispersión). Se obtuvo para ésta: $\sigma(\log A_0) = 0.35$. Se encuentra que la correlación calculada a partir de los valores medios (en lugar de con todos los datos) es casi igual a la anterior con ligeras diferencias. Esta similitud apunta a que las correlaciones obtenidas con los datos medios de los otros tres autores también son representativas del conjunto de sus datos. Las dispersiones son semejantes para todos los autores: [Cea] reportan $\sigma(\log A_0) = 0.4$. [A&K] y [T&D] reportan $\sigma(I_{MM}) \sim 1$ y 0.7 , respectivamente, que se asocian a los valores antedichos de $\sigma(\log A_0)$. A partir de estadísticas de China Occidental Du et al. (2020) proponen como valor representativo $\sigma(\log A_0) = 0.21$. El promedio de los tres valores indicados (0.35, 0.40 y 0.21) es 0.32, valor cercano al primero. Estas dispersiones son relativamente grandes; las aceleraciones pico oscilan típicamente entre alrededor del doble y la mitad de su valor medio ($10^{0.35} \sim 2.2$). Entre las curvas de dispersión mostradas se encuentra alrededor de $\frac{2}{3}$ de los datos, y $\frac{1}{3}$ de ellos aproximadamente entre las curvas de la media $\pm 0.4\sigma$, éstas con oscilaciones en torno a 30% y 40% del valor medio.

En la figura 14.b se muestran como rombos grises las velocidades pico (V_0) versus la intensidad macrosísmica (I_{MCS}), y los valores medios para cada intensidad como cuadrados celestes. Se expone la correlación potencial media de V_0 vs. I_{MCS} , para el conjunto de los datos y dicha media $\pm$ la desviación típica σ . Se obtuvo para ésta: $\sigma(\log V_0) = 0.36$. Igualmente, se encuentra que la correlación calculada a partir de los valores medios es casi igual a la inferida con todos los datos. Varias dispersiones son algo mayores para los demás autores: [Cea] reportan $\sigma(\log V_0) = 0.5$; [A&K] y [T&D] reportan $\sigma(I_{MM}) \sim 0.8$ y 1.6 , respectivamente. Pero Du et al. (2020) indican un valor menor, $\sigma(\log V_0) = 0.20$. Tal como para A_0 , entre las curvas de dispersión mostradas se encuentra alrededor de $\frac{2}{3}$ de sus datos y $\frac{1}{3}$ de ellos entre las curvas de la media $\pm 0.4\sigma$.

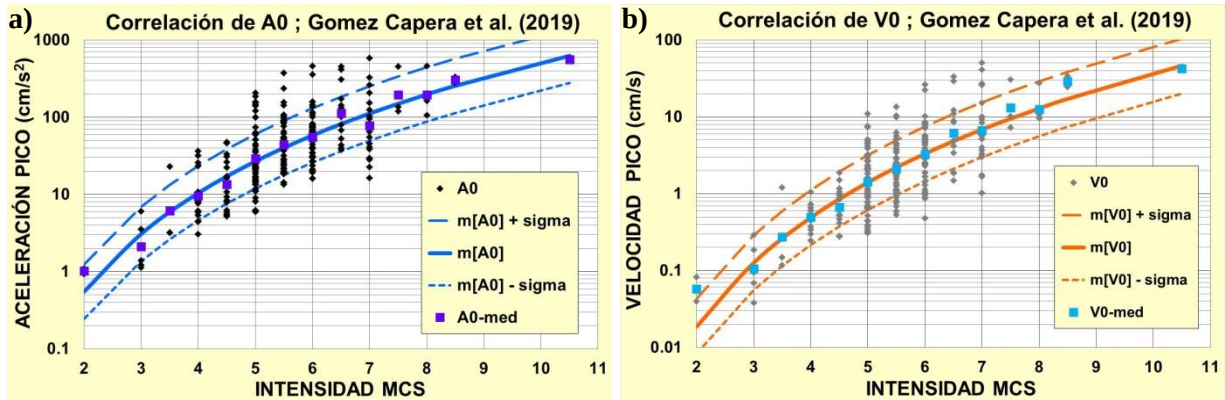


Figura 14. a) Puntos negros + violetas: [datos de A0 + valores medios], curvas azules: media de A0 $\pm$ σ ; b) Puntos grises + celestes: [datos de V0 + valores medios], curvas naranjas: media de V0 $\pm$ σ .

En la figura 15.a se expone el promedio de la correlación derivada para A0 en este estudio, expresión (3), junto con su dispersión típica, supuesta del mismo orden que la encontrada en [Gea]. En la figura 15.b se aprecia el promedio de la correlación derivada para V0 en este estudio, expresión (4), junto con su dispersión típica, igualmente supuesta del mismo orden que la encontrada en [Gea].

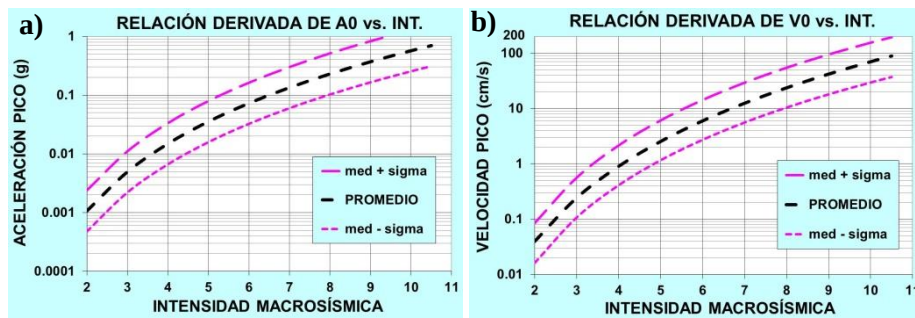


Figura 15. a) Promedio de la correlación derivada para A0 $\pm$ su desviación típica; b) Promedio de la correlación derivada para V0 $\pm$ su desviación típica.

Relación entre la velocidad pico del terreno y A1

La velocidad pico del terreno se puede asociar a la respuesta espectral de pseudo-aceleración para periodo de 1 segundo, $PSA(1) = A1$. Esta asociación yace en la buena correlación existente entre V0 y la pseudo-velocidad espectral a periodo de 1 segundo, $PSV(1)$, la cual es igual a la respectiva pseudo-aceleración dividida por la frecuencia circular: $PSV(T) = PSA(T) \cdot T/2\pi$. Un estimado de la velocidad pico es $V0 \cong PSV(1)/1.65$ para 5% del amortiguamiento estructural crítico, según Newmark y Hall (1982) y corroborado en estadísticas de registros (Pankow y Pechmann, 2004). A partir de las fórmulas antedichas se obtiene la expresión (5):

$$A1 \approx V0 \cdot 1.65 \cdot 2\pi / (1 \text{ s}) \quad (5)$$

Aplicando la expresión (5) a las correlaciones derivadas para V0 se obtienen correlaciones proporcionales que estiman la media de A1, las cuales se grafican en la figura 16. El promedio de estas correlaciones es la expresión (6) en cm/s^2 , igualmente mostrada en la figura 16 junto con sus desviaciones típicas. Se observa que estas envuelven a las medias de las cuatro formulaciones derivadas.

[Promedio]-A1-derivado: $A1 = 0.01508 (I_{EMS})^{4.668}$; $2 \leq I_{EMS} \leq 10.5$; (6)

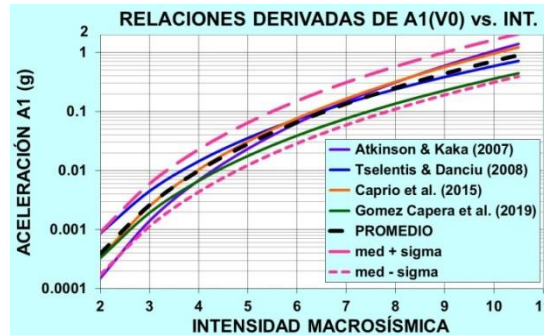


Figura 16. Correlaciones derivadas de A1 a partir de V0 vs. intensidad sísmica, junto con su promedio y las desviaciones típicas.

Correlaciones entre intensidades y A1

En la figura 17.a se muestran los datos medios de A1, recopilados por [A&K] y [Gea]. Estos autores presentan correlaciones entre la intensidad (I_{MM} o I_{MCS}) y A1, las cuales se exponen gráficamente en la figura 17.b. A partir de los mismos grupos de datos se derivaron nuevas correlaciones IGMCEs de tipo potencial. La expresión (7) es un ajuste del promedio de ellas con A1 en cm/s^2 .

[Promedio]-A1-derivado: $A1 = 0.003913 (I_{EMS})^{5.265}$; $2 \leq I_{EMS} \leq 10.5$; (7)

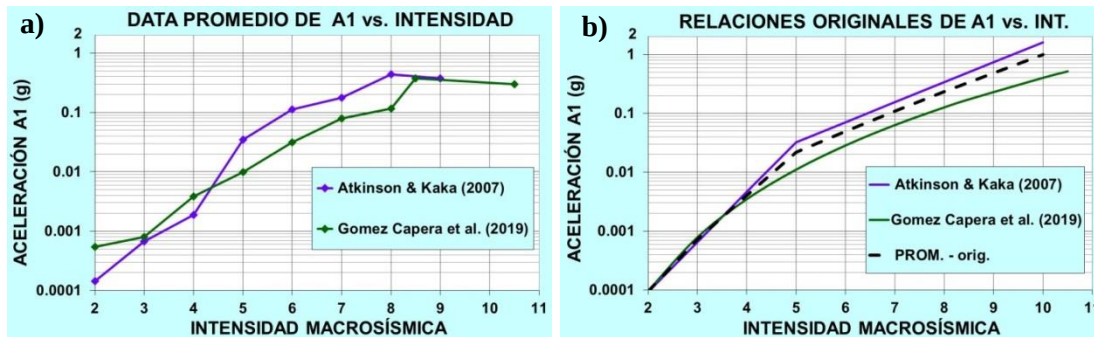


Figura 17. a) Medias de A1 (g) recopiladas para cada intensidad en su escala particular; b) Correlaciones originales de A1 vs. intensidad sísmica.

En la figura 18.a se aprecian las dos correlaciones derivadas para A1, junto con su promedio y su desviación típica; se ha supuesto que ésta es del mismo orden que la encontrada en [Gea]. En la figura 18.b se comparan las curvas de [A&K] y [Gea], obtenidas para A1 a partir de los datos de V0, con las obtenidas de los datos directos de A1. Se observa que son esencialmente iguales. En consecuencia, no es procedente tratarlas como fórmulas independientes y no corresponde promediar seis curvas de A1 sino las cuatro derivadas mediante V0, cuyo promedio es la expresión (6). De paso, la cercanía en la figura 18.b de los pares de curvas provenientes de cada autor, las cuales emanan de datos paralelos de registros, sustenta la bondad de la expresión (5) de relación entre V0 y A1.

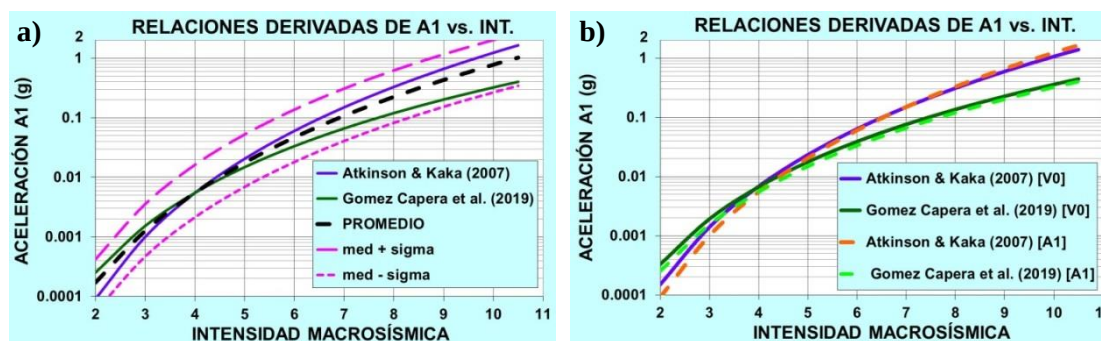


Figura 18. a) Correlaciones de A1 vs. intensidad sísmica, más su promedio y desviaciones típicas; b) Comparación de las curvas inferidas de los datos de V0 con aquellas desde de los datos de A1.

Aplicación al terremoto de Caracas de 1967

Se aplican las relaciones manejadas de intensidad sísmica contra aceleración pico y velocidad pico al terremoto de Caracas de 1967. Se cuenta con el trabajo efectuado por Papageorgiou y Kim (1991), el cual se apoyó en la descripción del terremoto de Suárez y Nábělek (1990). Ambos estudios son bastante confiables, pues los primeros autores pudieron validarlos adecuadamente con los efectos observados. Igualmente se dispone de los reportes de ese terremoto por Fiedler (1968).

En la zona de Los Palos Grandes, el perfil del terreno abarca todos los espesores de sedimentos desde el espesor máximo en el valle hasta espesor nulo en la roca. En conjunto ofrece una perspectiva aproximada de la respuesta en todas las microzonas y pueden compararse las velocidades pico en cada sitio con las intensidades sísmicas observadas. La roca representa el basamento rocoso, ya que los autores le asignaron $V_s = 2300$ m/s. En él infirieron $A_0 \sim 0.11$ g y $V_0 \sim 8.2$ cm/s. De acuerdo con la relación obtenida en el PMSC entre movimientos sísmicos del basamento y afloramiento rocosos de $V_s \sim 800$ m/s, en éste A_0 habría alcanzado ~ 0.13 g.

Para este grado de movimiento, los espectros en roca del PMSC estiman $V_0 \sim 9.7$ cm/s, para la cual a partir de la expresión (4) $I_{EMS} \sim 6.6$, la cual casi coincide con la asignada por Fiedler (1968): $I_{MCS} = 6.5$, $I_{MSK} \leq 7$, en los cerros de Caracas. En el sitio de mayor espesor de sedimentos, para la antedicha aceleración pico en afloramiento rocoso, los espectros del proyecto estiman $V_0 = 24.3$ cm/s mientras que Papageorgiou y Kim obtuvieron ~ 25.3 cm/s, en excelente acuerdo. Para esas V_0 la expresión (4) conduce a $I_{EMS} \sim 8.0$ y 8.1 , respectivamente, en coincidencia con la asignación general en esa zona: $I_{MCS} = 8$ (Fiedler, 1968). Además, en un sitio de sedimentos medios tal como el del centro de Caracas, el espectro del proyecto estima $V_0 = 16.1$ cm/s, mientras que Papageorgiou y Kim indican hasta ~ 15.5 cm/s para espesores semejantes, también con escasa diferencia. Para estas velocidades pico la expresión (4) conduce a $I_{EMS} \sim 7.35$ y 7.3 , respectivamente, valores cercanos a la asignación general de $I_{MCS} \sim 7.5$ a tales sitios (Fiedler, 1968).

De la comparación de resultados se desprende que: a) los valores de velocidad pico obtenidos por Papageorgiou y Kim (1991) para cada tipo de sitio corresponden, mediante la correlación obtenida, a intensidades bastante cercanas a las observadas, mostrando su validez y confiabilidad; b) dichas velocidades pico correlacionan bien con las derivadas desde los espectros inferidos en el PMSC en sitios del mismo espesor, indicando que el método de cálculo de velocidades pico es confiable y aplicable.

La correlación manejada entre intensidades y aceleraciones pico guarda una consistencia algo menor con los cálculos y observaciones del terremoto. El caso de afloramiento rocoso difiere un poco,

pues mediante la expresión (3) para $A0_{roca} = 0.13$ g se tiene $I_{EMS} \sim 6.9$ en lugar de 6.5. En la zona de espesores grandes, Papageorgiou y Kim obtuvieron $A0_{sitio} \sim 0.18$ g, para $I_{EMS} \sim 7.5$ según (3), algo menor que la intensidad principal observada ($I_{EMS} \sim 8$). Aunque es de notar que en Los Palos Grandes esta intensidad depende de $V0$ y $A1$ más que de $A0$, debido a los efectos de cuenca. Los edificios bajos sufrieron menos daños que los medianos y altos, apuntando hacia $I_{EMS} \sim 7.5$, sustentando una especie de duplicidad de la intensidad.

Además, las diferencias entre las intensidades medias calculadas y las observadas son como máximo $\Delta I_{EMS} = 0.5$, cerca de la mitad de su desviación típica que se cifra entre 0.8 y 1.0. Si se añade una incertidumbre de 10% en los valores de $A0$, las diferencias de intensidad llegan a ~ 0.6 y ~ 0.7 . Y con variación de 20% en los de $V0$, las diferencias están entre ~ 0.4 y ~ 0.5 . Por consiguiente, aun considerando incertidumbres probables, los valores calculados no contradicen las observaciones.

COMPARACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA CON EL ANÁLISIS DE RECURRENCIA

Mediante las correlaciones obtenidas entre las intensidades macrosísmicas y el movimiento del terreno puede efectuarse una comparación del análisis de recurrencia (A.R.) de intensidades en el centro de Caracas contra los resultados de las evaluaciones de amenaza sísmica (E.A.S.) añadidos los efectos de sitios dados por el PMSC. Nótese que se trata de tres investigaciones independientes, pues emplean insumos básicos diferentes, uno con datos mundiales y dos con datos nacionales. En la tabla 7, se comparan los valores de $A0$ estimados en el centro de Caracas como promedio de las evaluaciones de amenaza sísmica, añadiéndoles efectos de sitio con incertidumbres (tabla 3), contra los valores de $A0$, obtenidos mediante la expresión (3) más las desviaciones definidas por $\pm 0.4\sigma$, con $\sigma(\log A0) = 0.35$, del análisis previo de incertidumbres con [Gea], para las intensidades del análisis de recurrencia promedio ante distintos PMR (tabla 5.B). En la figura 19 se observan gráficamente los resultados de la tabla 7; nótese que las curvas medias de ambos estudios son casi paralelas, con mayores valores del análisis de recurrencia, aunque los valores medios de la E.A.S. quedan dentro de la franja inferior de la desviación considerada del A.R. La diferencia de los valores de $A0$ entre ambos estudios es de $\sim 15\%$ en promedio.

Tabla 7. Comparación de $A0$ (g) en el centro de Caracas entre la Evaluación de Amenaza Sísmica más efectos de sitio y el Análisis de Recurrencia Promedio.

PMR (años)	Eval. Am. Sísm. + efectos de sitio			Análisis de Recurrencia Promedio			Diferencia
	mínima	media	máxima	med-0.4 σ	media	med+0.4 σ	
72	0.13	0.15	0.16	0.12	0.17	0.24	17%
200	0.21	0.24	0.26	0.19	0.27	0.37	13%
475	0.28	0.32	0.36	0.27	0.37	0.51	17%
975	0.36	0.41	0.45	0.34	0.47	0.65	15%
2475	0.46	0.52	0.57	0.43	0.59	0.82	14%



Figura 19. Comparación de resultados de A0 en el centro de Caracas entre la Evaluación de Amenaza Sísmica y el Análisis de Recurrencia Promedio.

En la tabla 8, se comparan los valores de A1 estimados en el centro de Caracas, incluyentes de efectos de sitio con incertidumbres estimadas (tabla 3), contra los valores de A1 asociados a las intensidades provenientes del análisis de recurrencia promedio, para los distintos PMRs (figura 11 y tabla 5.B) mediante la expresión (6) más las desviaciones asociadas a $\pm 0.4\sigma$, con $\sigma(\log A1) = 0.36$, tomado del análisis previo de incertidumbres con [Gea]. En la figura 20 se observan gráficamente los resultados de la tabla 8; se observa una casi coincidencia entre las curvas medias de ambos estudios para PMRs entre 300 y 1000 años, con mayores valores de la E.A.S. para valores superiores de PMR y a la inversa para valores menores, pero manteniéndose sobre la franja de desviación inferior del A.R.

Tabla 8. Comparación de A1 (g) en el centro de Caracas entre la Evaluación de Amenaza Sísmica más efectos de sitio y el Análisis de Recurrencia Promedio.

PMR (años)	Eval. Am. Sísm. + efectos de sitio			Análisis de Recurrencia Promedio			Diferencia
	mínima	media	máxima	med-0.4σ	media	med+0.4σ	
72	0.12	0.14	0.16	0.13	0.18	0.25	29%
200	0.23	0.27	0.32	0.22	0.30	0.42	10%
475	0.38	0.45	0.53	0.32	0.45	0.62	0.1%
975	0.51	0.61	0.72	0.42	0.59	0.82	-3%
2475	0.72	0.86	1.01	0.56	0.78	1.08	-10%

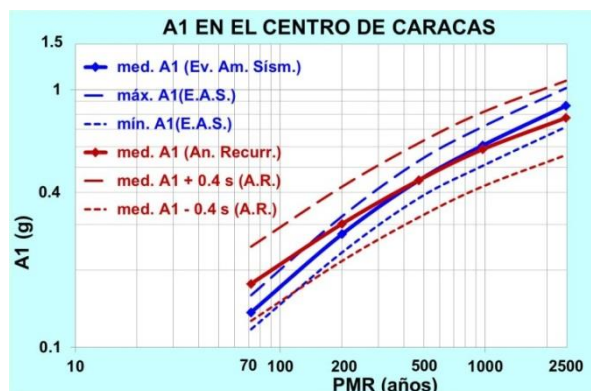


Figura 20. Comparación de resultados de A1 en el centro de Caracas entre la Evaluación de Amenaza Sísmica y el Análisis de Recurrencia Promedio.

En la figura 21 se muestran las curvas correspondientes a los modelos de recurrencia: casos promedio, mínimo y máximo (figura 11 y tabla 5.B). Se observa que las incertidumbres asociadas a estos modelos son menores a las dispersiones asociadas a $\pm 0.4\sigma$ entre intensidades y aceleraciones (figuras 19 y 20). En síntesis, las diferencias entre los valores medios que exponen ambos estudios son aceptables dentro de los factores existentes en el problema. Los valores de A0 son mayores en el análisis de recurrencia, pero más cercanos entre ambos estudios para A1. Se puede considerar que los resultados ofrecen un suficiente soporte mutuo entre ambos estudios.

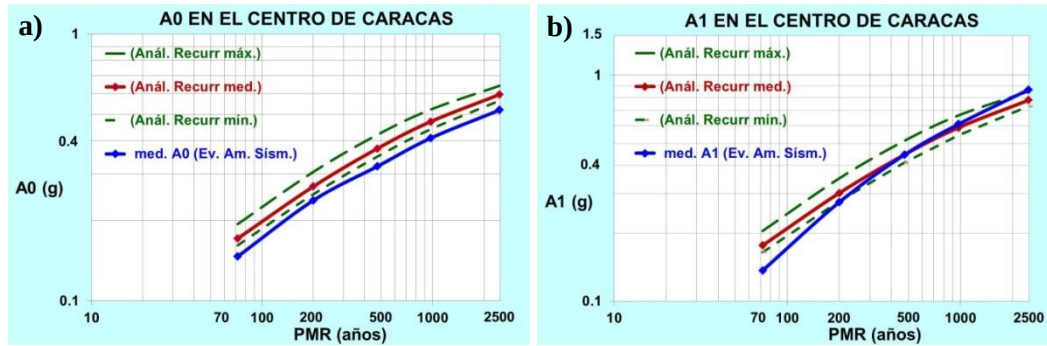


Figura 21. Comparación de resultados de A0 y A1 en el centro de Caracas entre las medias de la Evaluación de Amenaza Sísmica y las variantes de los Análisis de Recurrencia: a) A0; b) A1.

Intensidades esperadas en varios sitios de Caracas

Se estiman las intensidades macrosísmicas probables para los PMRs empleados en la norma sísmica vigente, en tres sitios representativos de la ciudad: los cerros en roca (con pendiente $\leq 30^\circ$; Hernández y Schmitz, 2009), el centro (con sedimentos medios) y la zona de la cuenca (con sedimentos profundos). Desde las evaluaciones de amenaza sísmica (2009, 2014 y 2021), más los análisis de sitios del PMSC, se obtienen resultados medios de A0 y A1 para PMRs entre 36 y 9975 años, según la norma sísmica vigente para los sismos frecuentes, de diseño y extremos de los grupos de uso: C = rural; B2 = común; B1 = alta ocupación; A2 = esencial; y A1 = crítico. En la tabla 9 se reportan dos valores de intensidades sísmicas para dichos PMRs, derivadas aplicando las expresiones (3) y (6) para A0 y A1, respectivamente. Se considera que la intensidad sísmica representativa es la mayor de ambas.

Tabla 9. Valores de intensidades derivadas desde el promedio de la Evaluación de Amenaza Sísmica más los análisis de sitios del PMSC y correlaciones ad-hoc.

Excedencia	Sismo normativo	Grupo de uso	PMR (años)	I _{EMS} [A0]			I _{EMS} [A1]		
				Cerros	Centro	Cuenca	Cerros	Centro	Cuenca
50% en 25 años	Sismo frecuente	A2	36	6.0	6.4	6.2	5.2	6.2	6.5
50% en 50 años		A1	72	6.7	7.1	6.9	5.9	7.0	7.3
30% en 50 años	—	—	140	7.4	7.7	7.6	6.5	7.8	8.1
22% en 50 años			200	7.7	8.0	7.9	6.9	8.1	8.5
20% en 50 años	Sismo de diseño	C	225	7.9	8.1	8.0	7.0	8.3	8.7
10% en 50 años		B2	475	8.5	8.7	8.5	7.6	9.0	9.5
7% en 50 años		B1	689	8.8	9.0	8.8	7.9	9.3	9.8
5% en 50 años		A2	975	9.1	9.2	9.0	8.2	9.6	10.1
2.5% en 50 años		A1	1975	9.7	9.7	9.5	8.7	10.2	10.7
2% en 50 años	Sismo extremo	B2	2475	9.9	9.8	9.6	8.9	10.4	10.9
1.5% en 50 años		B1	3309	10.1	10.0	9.8	9.0	10.6	11.
1% en 50 años		A2	4975	10.4	10.2	10.1	9.3	10.9	11.
0.5% en 50 años		A1	9975	10.8	10.6	10.5	9.7	11.	11.

En la figura 22 se observan sus envolventes. Se juzga que las curvas deben truncarse mediante límites determinísticos (Pecker et al., 2017). Las diferencias de intensidad en los cerros y la cuenca, con respecto al centro, oscilan entre ± 0.4 y ± 0.5 para $140 \leq \text{PMR} \leq 3309$ años. La curva del centro coincide con la del Análisis de Recurrencia Promedio para PMR entre 300 y 1000 años,

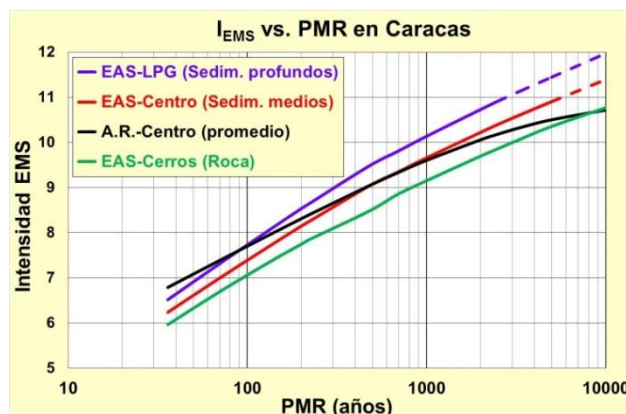


Figura 22. Intensidades sísmicas estimadas en función del PMR, en los cerros de Caracas, el centro de la ciudad (comparadas con el Análisis de Recurrencia Promedio) y en la cuenca profunda.

ESCENARIOS PROBABLES DE OCURRENCIAS SÍSMICAS

Se exploran los terremotos graves que pueden afectar a Caracas en los próximos años, valorando su recurrencia, incluyente de incertidumbres. Se trata de previsiones, pero no de predicciones, al igual que se distingue en meteorología. Son estimados de los escenarios más probables, aunque un determinado sismo puede ocurrir en cualquier momento, sin que por ahora se conozcan patrones predictivos. Esta cuestión es importante como ayuda a la previsión del riesgo sísmico en la ciudad y la toma de medidas ad-hoc. Se recuerdan primero los terremotos de mayor intensidad que han afectado a Caracas, revisando la excedencia de las intensidades macrosísmicas en el centro de la ciudad, según la tabla 5.A.

Principales terremotos que han afectado a Caracas

El terremoto de 1641 se estima con $I_{EMS} \sim 8.5$ en el centro de Caracas. Según la tabla 5.A se supone una excedencia (recurrencia de $I_{EMS} \geq 8.5$) entre 180 y 300 años con promedio 250 años. El terremoto de 1812 ocurrió tras 171 años de 1641, casi en el límite inferior por lo que prácticamente se habría cumplido una primera recurrencia de $I_{EMS} \geq 8.5$. Al respecto de una próxima ocurrencia de tal intensidad, tras 1812 el modelo estima un sismo con $I_{EMS} \geq 8.5$ en el centro de Caracas entre 1992 y 2112, con expectación (valor promedio) hacia 2062.

Para el terremoto de 1766, con $I_{EMS} \sim 7$ en el centro de Caracas, se estima una excedencia entre 36 y 51 años, con expectación 46 años. Casualmente tras 46 años se manifestó $I_{EMS} \geq 7$ en 1812, y (omitiendo dos probables réplicas) de nuevo en 1865 tras 53 años, en 1900 tras 35 años, en 1967 tras 67 años y en 2009 tras 42 años, con promedio de recurrencia de 48 años. Vienen ocurriendo tales sismos de $I_{EMS} \geq 7$, de fuentes sismogénicas diversas, con intervalo promedio cercano al de la tabla 5.A

El terremoto de 1812, de $M \sim 7.5$ en la falla San Sebastián-Oeste (SSO) a ~ 11.4 km de la ciudad (figura 1, en la costa entre 68° y 67°), es de carácter extraordinario. Con $I_{EMS} \sim 9.5$ en Caracas, su PMR de excederlo estaría entre 600 y 1100 años con expectación 870 años. No parece probable una pronta

repetición de tal sismo en la misma falla, pero no puede descartarse la ocurrencia de un sismo menor en una fecha cercana.

El terremoto de 1900 puede estimarse con $I_{EMS} \sim 8$ en el centro de Caracas, con ruptura en la falla La Tortuga-Este (LTE) y $M \sim 7.6$ a 7.7 (figura 1, al norte, cruzando 66°) a ~ 45 km de la ciudad. Por su gran magnitud no parece probable su repetición en fecha cercana. Sin embargo, suponiendo que las intensidades tienden a repetirse según el patrón de recurrencias inferido, siendo el PMR entre 110 y 160 años, con expectación 140 años para $I_{EMS} \geq 8$, tal intensidad puede excederse de nuevo entre 2024 (fecha post-2023) y 2060 con fecha esperada (promedio) hacia 2040, independientemente de la fuente.

El terremoto de 1967 produjo $I_{EMS} \sim 7.5$ en el centro de Caracas, con ruptura entre las fallas San Sebastián y La Tortuga con varios sub-eventos de suma $M \sim 6.6$ (figura 1), siendo el mayor $M6.4$ a ~ 20 km de la ciudad (Suárez y Nábělek, 1990). El PMR de la intensidad observada está entre 61 y 91 años, con expectación 80 años, cuya eventual excedencia apuntaría a un evento de $I_{EMS} \geq 7.5$ en el centro de la ciudad, entre 2028 y 2058, con fecha esperada hacia 2047.

Sismos próximos que pueden afectar a Caracas

Una perspectiva de este asunto es la de manejar los promedios de los 5 terremotos principales. Los lapsos entre ocurrencias fueron 126, 46, 88 y 67 años, con promedio de 82 ± 19 años, representando la expectación y su dispersión entre grandes terremotos. O sea, un terremoto importante se avizora entre 63 y 101 años, luego del último de 1967. El promedio de las 5 intensidades observadas (8.5, 7, 9.5, 8 y 7.5) en el centro de Caracas es de 8.0, apuntando hacia un terremoto de $I_{EMS} \sim 8$ en dicho lugar, con fecha entre 2030 y 2068 y promedio hacia 2049.

Dado que: a) $I_{EMS} \geq 8$ se estima entre 2024 y 2060, apuntando a 2040; b) $I_{EMS} \geq 7.5$ se estima entre 2028 y 2058, apuntando a 2047; c) el promedio de grandes sismos apunta a $I_{EMS} \sim 8$ en 2049; d) el caso $I_{EMS} \geq 8.5$ es menos probable, apuntando a 2062, se infiere que un pronóstico planteable desde el conocimiento actual es la mayor posibilidad de un sismo entre 2024 y 2060, con expectación hacia 2045 (promedio de 2040, 2047 y 2049), que produzca $I_{EMS} \sim 7.5$ a 8 en el centro de Caracas, con valor algo más probable $I_{EMS} \sim 8$. A lo que se puede añadir el estimado de $I_{EMS} \geq 7$ en el centro, tras 2009 y recurrencia de 36 a 51 años, para 2045 a 2060 con expectación hacia 2055, lo cual también es compatible con el pronóstico anterior.

Conviene hacer énfasis que no se está haciendo una predicción. Una posibilidad es que la falla San Sebastián-Este (SSE) genere un fuerte sismo, ya que no se conoce una gran ruptura histórica con soporte sismológico, sino sólo un sismo $\sim M5.7$ en 1915 (figura 1, en la costa cerca de 66°). Esta falla podría haber roto en fecha prehispánica, y con magnitud máxima creíble $M7.4$, ser capaz de producir un futuro terremoto con $I_{EMS} \geq 9$ en el centro de la ciudad, pero no se dispone de datos para estimar su recurrencia.

Se exploran los posibles sismos que pueden conducir a los sucesos indicados o excederlos. Para ello se emplean las expresiones dadas en (8) para estimar intensidades sísmicas (Hernández, 2009b), inferidas desde varios casos relativamente conocidos en el país.

$$I_0 \approx a M - b \log(H) \quad ; \quad I \approx I_0 - c \log(R/H) - d(R-H) + \Delta I_{SITIO} + \Delta I_{DIRECT} \quad (8)$$

donde: I_0 = intensidad epicentral; I = intensidad en el sitio; R = distancia a la ruptura (km); H = profundidad de la ruptura (≥ 5 km); ΔI_{SITIO} = efecto de sitio (0 a 0.5); ΔI_{DIRECT} = variación por

directividad de la ruptura (progresiva: 0 a 0.4; regresiva: -0.2 a 0); $a = 1.359$; $b = 0.7826$; $c = 2.188$; $d = 0.002904$.

Son factibles los siguientes sismos, entre otros, conducentes a $I_{EMS} \geq 7.5$ en el centro de Caracas:

- a) En la falla La Tortuga-Oeste (LTO): M6.9 a 27 km del centro de Caracas, algo más hacia el este que el terremoto de 1641 (figura 1), conducente a $I_{EMS} \sim 8$. En la misma falla: M6.6 para $I_{EMS} \sim 7.5$. Estos sismos tendrían un $\sim 40\%$ y $\sim 20\%$ del área de ruptura del de 1641, respectivamente.
- b) En la falla La Tortuga-Este (LTE): M7.2 a 45 km del centro de Caracas, para $I_{EMS} \sim 7.5$. Sin embargo, parece poco probable dada la reciente ruptura de 1900.
- c) En la falla San Sebastián Oeste (SSO): M6.4 a 11 km del centro de Caracas, para $I_{EMS} \sim 8$. En la misma falla: M6.1 para $I_{EMS} \sim 7.5$, M6.8 para $I_{EMS} \sim 8.5$. Estos sismos tendrían sólo un $\sim 8\%$, $\sim 4\%$ y $\sim 20\%$ del área de ruptura del de 1812, respectivamente.
- d) En la falla San Sebastián Este (SSE): M6.7 a 13 km del centro de Caracas, para $I_{EMS} \sim 8$. En la misma falla: M6.4 para $I_{EMS} \sim 7.5$, M7.1 para $I_{EMS} \sim 8.5$ y M7.4 para $I_{EMS} \sim 9$.
- e) En el sistema Tacagua-El Ávila (figura 1, al norte de Caracas, donde ocurrieron los sismos M5.7 de 1820 y M5 de 1842): M6 a 6 km del centro de la ciudad, para $I_{EMS} \sim 7.5$.
- f) En la falla San José (figura 1, al sur de Caracas, donde ocurrieron los sismos M4.9 de 1921 y 1981): M6.2 a 13 km del centro de la ciudad, para $I_{EMS} \sim 7.5$. Aunque parece poco probable, dada la pequeña velocidad de la falla.
- g) En el segmento Pichao de la falla La Victoria (figura 1, al sur de Caracas, donde ocurrió el sismo M5.9 de 1837): M6.8 a 22 km del centro de la ciudad, para $I_{EMS} \sim 8$. En la misma falla: M6.4 para $I_{EMS} \sim 7.5$. Es de notar que se considera M6.9 como potencial del segmento (Paolini et al., 2012), con recurrencia propia > 1800 años, y no se conoce una ruptura mayor a la de 1837.

Se exponen así siete sismos candidatos a producir a $I_{EMS} \sim 7.5$, cuatro candidatos a $I_{EMS} \sim 8$, dos candidatos a $I_{EMS} \sim 8.5$ y uno a $I_{EMS} \sim 9$, con intensidades referidas al centro de la ciudad, en seis fallas cercanas, omitiendo los considerados menos probables.

Consecuencias posibles de un próximo gran sismo en Caracas

Se describe a continuación el conjunto de daños que se pueden esperar en las construcciones existentes de Caracas para los escenarios conducentes a $I_{EMS} \sim 8$ en el centro de la ciudad, con mayor probabilidad de ocurrencia entre los años 2024 y 2060 y expectación (valor promedio) hacia el año 2045 (subsección previa). De los análisis de sitio del PMSC se estima que en tal caso se tendría $I_{EMS} \sim 7.7 \sim 7.5$ en los cerros de Caracas e $I_{EMS} \sim 8.5$ en la zona de la cuenca profunda (tabla 9).

El parque de edificaciones de la ciudad fue analizado para apoyo del PMSC (Hernández y Domínguez, 2009). Aquel se clasificó según las normas sísmicas (de 1939, 1947, 1955, 1967, 1982, 1998 y 2001), las normas de materiales empleadas (de 1939, 1947, 1955, 1967, 1971, 1980, 1985 y post-1995), su altura (edificios bajos, medianos y altos) y su ubicación (sobre roca o depósitos someros y sobre depósitos profundos). Se diferenciaron así 84 grados de vulnerabilidad para los que se dispusieron curvas de fragilidad calibradas con datos mundiales y los daños del terremoto de 1967. A partir de ellas se calcularon índices de confiabilidad estructural, pérdidas esperadas ante diversos sismos y probabilidades anuales de ruina. Se agruparon en 5 a 6 grados de riesgo, conducentes a distintas recomendaciones de intervención (desde muy prioritaria a innecesaria). Estos grados de riesgo se pueden asociar a las 6 clases de vulnerabilidad de la EMS-98: A, B, C, D, E y F. De acuerdo con el estudio citado, estas clases se asignan aquí a los grupos de edificaciones según las normativas empleadas y la regularidad o irregularidad estructural. Se añaden las construcciones de mampostería, diferenciadas según su calidad constructiva.

En la aplicación de la escala EMS-98 a la estimación de daños estructurales, estos se diferencian aquí entre los casos nulo, leve, moderado, severo y destructivo. Este incluye algún derrumbe, parcial o total. El severo supone la dificultad o imposibilidad de reparación, mientras que el moderado la permite. El nivel de intensidad sísmica conduce en promedio a ciertas cantidades de los tipos de daño, representando aquí a fines de interpolaciones: “algunos” a menos de 1%, “muy pocos” entre 1% y 5%, “pocos” entre 5% y 10%, “numerosos” entre 10% y 20%, “muchos” entre 20% y 50% y “mayoría” a más de 50%.

Aplicando la escala EMS, en la tabla 10 se exponen los daños estructurales esperados en tres zonas representativas de Caracas (cerros, centro y cuenca profunda) ante un sismo probable de $I_{EMS} \sim 8$ en el centro de la ciudad, el cual conduce aproximadamente a las otras dos intensidades señaladas. Se observa que las construcciones de clase A quedarían en situación muy grave en la cuenca, dada $I_{EMS} \sim 8.5$, para pocas derrumbadas y una mayoría de difícil reparación; debe recordarse que en 1900 (ante un sismo similar) esa área estaba sin desarrollo y por tanto no se manifestaron esos daños. Fuera de la cuenca también se presentarían daños importantes y derrumbes para las construcciones de clase A. Las de clase B sufrirían menos daños severos y derrumbes. Las estructuras de clase C sobrellevarían muy pocos daños severos en la cuenca y solamente daños leves y moderados fuera de ella. Las edificaciones de clase D desarrollarían muy pocos daños moderados en la cuenca y menos daños fuera de ella. Las de clases E y F no sobrepasarían los daños leves.

En comparación, los daños fueron menores en el terremoto de 1967. Con $I_{EMS} \sim 8$ en la cuenca (depósitos mayores de 160 m), en ella hubo muy pocos (2%) edificios mayores de 4 pisos derrumbados, pero muchos (22%) con daño estructural (moderado a severo), en coincidencia con lo señalado en la tabla 10 para construcciones de la clase A en una zona con $I_{EMS} \sim 8$. Hay que añadir que se trató de daño global dependiente de la altura construida, siendo casi nulo para las casas, pequeño para los edificios bajos, intermedio para los medianos y grande para los altos (Seed et al., 1970; Briceño et al., 1978). Mientras que hacia el centro de la ciudad (depósitos entre 45 y 160 m), con $I_{EMS} \sim 7.5$, en los edificios mayores de 4 pisos hubo pocos daños estructurales (8%), sin gran diferenciación por altura; sin embargo, las casas viejas de adobe sufrieron daños severos en numerosos casos (16%) más algunos colapsos (0.7%) (Ferrer y Cluff, 1969). En el resto del área (depósitos menores de 45 m) de los edificios mayores de 4 pisos se dañaron muy pocos (3%). No se reportaron daños notables en las viviendas informales de los cerros, donde fue $I_{EMS} \sim 7$.

En el conjunto de la ciudad, en el sismo de 1967 hubo pocos (9%) daños estructurales (moderados a severos) en los ~ 1300 edificios mayores de 4 pisos. Las casas (1 y 2 pisos) y los edificios bajos (3 y 4 pisos) sumaban unas 6700 construcciones formales, para un total de ~ 8000 en la ciudad. Con aproximadamente 350 casos de daño estructural (moderado más severo) en toda ella, se tuvo un índice de $\sim 4\%$ de daño, calificado como muy poca cantidad. En un trabajo liderado por JICA (Yamazaki et al., 2006) se modeló una repetición de ese sismo para el parque de 314000 construcciones (incluyendo viviendas informales) a la fecha de 2003, estimando 10000 casos de daño severo: un 3% (“muy poco”), pero algo peor a lo sucedido en 1967, considerando que se trata de daño severo.

Tabla 10. Daños esperados en construcciones de Caracas ante un gran terremoto considerado probable entre 2024 y 2060.

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	Clase de edif.	U B I C A C I Ó N		
		Cerros: $I_{EMS} \sim 7.5$	Centro: $I_{EMS} \sim 8$	Cuenca: $I_{EMS} \sim 8.5$
Mampostería no confinada o irregular.	A	Numerosos daños severos.	Muchos daños severos.	Mayoría con daños severos.
Norma 1939, irregular Normas 1947 o 1955.		Algunos derrumbes.	Muy pocos derrumbes.	Pocos derrumbes.
Mampostería confinada, regular.	B	Numerosos daños moderados.	Muchos daños moderados.	Numerosos daños severos.
Norma 1939, regular. Norma 1967, irregular.		Muy pocos daños severos.	Pocos daños severos.	Algunos derrumbes.
Norma 1967, regular. Norma 1982, irregular.	C	Numerosos daños leves.	Muchos daños leves.	Numerosos daños moderados.
		Muy pocos daños moderados.	Pocos daños moderados.	Muy pocos daños severos.
Norma 1982, regular. Norma 2001, irregular.	D	Muy pocos daños leves.	Pocos daños leves	Numerosos daños leves.
			Algunos daños moderados.	Muy pocos daños moderados.
Norma 2001, regular. Norma 1998, irregular.	E	Sin daño estructural.	Algunos daños leves.	Muy pocos daños leves.
Norma 1998, regular. Norma 2019, PMSC	F	Sin daño estructural.	Sin daño estructural.	Algunos daños leves.

Conviene razonar la diferencia de respuestas posibles pues existe la impresión de que los cerros de Caracas representan la situación más riesgosa, asociada a la informalidad constructiva presente en ellos. Sin embargo, se encuentra que en la cuenca y aún fuera de ella, los edificios antiguos (pre-1967) corren mayor riesgo como consecuencia de los efectos de sitio debidos a los sedimentos. A fin de dilucidar técnicamente esta cuestión, en el marco del “Estudio Básico sobre Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas” conducido por la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) se llevó a cabo un experimento de evaluación de la respuesta de viviendas informales típicas de un piso en una ladera de pendiente = 20° (con columnas delanteras para salvar la pendiente), con cuatro casos de paredes de confinamiento (Inoue et al., 2006). Se construyeron con materiales, método y personal popular, y se sometieron a pruebas de carga/deformación; además se efectuaron extrapolaciones teóricas de la respuesta probable de viviendas de hasta 5 pisos. En resumen, se encontró que en promedio las viviendas podrían soportar $A0 \sim 0.36$, 0.19 y 0.12 g, para 1, 2 y 3-5 pisos, respectivamente, considerando su flexibilidad; la ductilidad experimental fue de ~ 1.55 . Aplicando la inversa de la expresión (3) se estima que estas viviendas podrían soportar sin daños $I_{EMS} \sim 9$, 7.6 y 6.8 , para respectivamente 1, 2 y 3-5 pisos. Admitiendo daño moderado (desarrollo de 50% de la ductilidad) podrían resistir $I_{EMS} \sim 9.5$, 8.1 y 7.2 , para respectivamente los mismos pisos. Para daño severo (desarrollo de 75% de la ductilidad) podrían llegar a $I_{EMS} \sim 9.8$, 8.3 y 7.4 , para igualmente los mismos pisos. Mientras que podrían colapsar cuando $I_{EMS} \sim 10$,

8.5 y 7.6, para respectivamente los mismos pisos. Debe acotarse de que se trata de estimados con variabilidad desconocida pues derivan de un ensayo parcial; sin embargo, ofrecen un indicio del probable desempeño. Las previsiones de la tabla 10 pueden interpretarse como que ante $I_{EMS} \sim 7.5$ ocurrirían daños severos en las viviendas informales de 3 a 5 pisos y quizá podrían derrumbarse, ya que esa intensidad está en el entorno de 7.4 y 7.6.

Una manifestación de la diferencia de respuestas entre los cerros y las zonas sedimentarias se observó en el terremoto M6.4 de Tucacas en 2009, antes referido. Se puede calificar con $I_{EMS} \sim 7$ porque hubo casi un centenar de daños en edificios antiguos entre el centro de la ciudad y la cuenca, mientras que no se reportó ningún daño en los cerros. Esto confirma el estimado del párrafo anterior pues según la tabla 9 para aquella intensidad en el centro, en los cerros se habría tenido $I_{EMS} \sim 6.6$, valor menor al límite ($I_{EMS} \sim 6.8$) a partir del cual se esperarían daños en las viviendas informales de casi cualquier número de pisos. Se confirma así, mediante cuatro perspectivas (la escala EMS, el terremoto de 1967, el de 2009 y la evaluación de JICA) que las viviendas informales de los cerros están expuestas a un menor riesgo que los edificios antiguos en las zonas sedimentarias.

No puede descartarse la posibilidad de que ocurra un sismo que produzca $I_{EMS} \geq 8.5$ en el centro de la ciudad, ante el cual los daños serían más cuantiosos. Por ejemplo, ante un terremoto con $I_{EMS} \sim 9$ en el centro, en la cuenca (con $I_{EMS} \sim 9.5$) cerca de la mayoría de los edificios de clase A se derrumbarían y también muchos en el centro; en los cerros (con $I_{EMS} \sim 8.5$) podría colapsar una parte de las viviendas informales de 2 y más pisos. En la cuenca numerosos edificios de clase B colapsarían y la mayoría sufriría daño severo, más numerosos de clase C, estos con muy pocos derrumbes. Muy pocos de clase D experimentarían daño severo. Pero en el conjunto de la ciudad los edificios de clases E y F serían reparables.

Ante un sismo con $I_{EMS} \sim 7.5$ en el centro se tendría una situación semejante a la 1967 para las construcciones antiguas pero mejor desempeño para las posteriores. Sin embargo, en las laderas existiría peligro de deslizamientos para cualquier tipo de construcción (Hernández et al., 2008). Ya en el terremoto de 1967, con $I_{EMS} \sim 7$, hubo algún deslizamiento; mayor será el peligro con intensidad $I_{EMS} \geq 7.5$.

En función del escenario probable advertido ($I_{EMS} \sim 8$ en el centro), existe la necesidad muy prioritaria de adecuar las edificaciones construidas en la zona de la cuenca entre 1947 y 1967, obviando las reforzadas tras el sismo de 1967, junto con la revisión de las construidas antes, más las irregulares construidas entre 1967 y 1983. Fuera de la cuenca también es importante revisar las edificaciones que usaron las normas de 1947 y 1955, además de las viviendas informales; otras construcciones ameritan menos prioridad de revisión, pero en un plan de mitigación debe incluirse el peligro de deslizamientos para todas. Un aspecto de interés sería el de estimar el número de fallecidos que podrían acaecer, pero es un asunto complejo que requeriría un buen modelado urbano. Además, en un plan a largo plazo, deberían atenderse situaciones más graves, del orden de las dispuestas en las normas sísmicas, previendo que fuera $I_{EMS} \geq 8.5$ en el centro de la ciudad.

CONCLUSIONES

Se presentó la evolución del estudio de amenaza sísmica en roca para Caracas, el cual sobrellevó varias actualizaciones del modelo sismogénico. Se evidenció que la discusión crítica de los modelos preliminares y sus resultados fue pertinente y necesaria para obtener un producto más confiable. Dicho estudio fue ejecutado para el Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas (PMSC), con tres revisiones posteriores que adoptaron nuevas relaciones de atenuación del movimiento del terreno. Las 4 evaluaciones condujeron a resultados similares, incluyendo los estimados de incertidumbres de la

aceleración pico (A0) y de la respuesta estructural a periodo de 1 segundo (A1) en el centro de la ciudad, las cuales se encontraron en torno a $\pm 11\%$ y $\pm 18\%$, respectivamente. Se expusieron las macrozonas del PMSC incluyendo espectros de la macrozona central CN. Además, se indicaron las 3 microzonas presentes en el centro de Caracas y los estimados de incertidumbres de A0 y A1 con efectos de sitio en ellas, para PMRs entre 72 y 2475 años, más su promedio, el cual caracteriza la respuesta global en el centro.

Se efectuó un análisis de recurrencia de la intensidad macrosísmica en el centro de Caracas a partir de la historia de las intensidades reportadas. A tal efecto, se recopiló éstas, se reevaluaron las correspondientes a los 5 mayores terremotos que han afectado la ciudad, se revisó su completitud y se procesaron los datos, ajustando las tasas de excedencia, tras eliminar las réplicas y otros agrupamientos de datos. Se determinó una fórmula de recurrencia que permite estimar los periodos medios de retorno (PMR) de cada intensidad, los cuales se comparan con reportes previos. Se añadieron dos modelos con incertidumbre de los datos para estimar la variabilidad posible del modelo promedio.

Se revisaron varias recientes formulaciones regionales de la aceleración pico y la velocidad pico del terreno contra la intensidad macrosísmica, derivando novedosas funciones de validez suprarregional. Se incluyó un examen de su variabilidad e incertidumbre. Se estableció una función particular de A1 a partir de la obtenida para la velocidad pico del terreno. Se aplicaron estas funciones a la información disponible del terremoto de Caracas de 1967, encontrándose una buena correlación.

Aplicando las funciones obtenidas a las intensidades dadas por el análisis de recurrencia, para PMR entre 72 y 2475 años, se compararon los A0 y A1 inferidos con los provenientes de la evaluación de amenaza sísmica, añadidos los efectos de sitio en el centro de Caracas. Se encontró que el A0 derivado del análisis de recurrencia promedio excede 15% en promedio al de dicha evaluación, valor que queda dentro del margen de incertidumbre aceptable. Mientras que la relación media entre ambos A1 es variable, coincidiendo prácticamente para PMR entre 300 y 1000 años. Se concluye que la evaluación de amenaza sísmica y el análisis de recurrencia muestran un buen acuerdo y se sustentan entre sí.

Se derivaron intensidades sísmicas a partir de la evaluación de amenaza sísmica más efectos de sitio, en tres sitios representativos de la ciudad (cerros, centro y cuenca profunda), para los PMRs empleados en la norma sísmica vigente. Se examinaron las recurrencias de los grandes terremotos que han afectado a Caracas; se colige que un sismo probable puede ocurrir entre 2024 y 2060, con intensidad $I_{EMS} = 7.5$ u 8 en el centro de Caracas, intensidad menor en los cerros y mayor en la cuenca. Se señalaron once sismos candidatos que cumplirían con esa expectativa. Se estimaron los daños que causaría el caso de $I_{EMS} \sim 8$, puntualizando las construcciones vulnerables que deben ser reforzadas prioritariamente, habiendo analizado la condición de las viviendas informales. Se alerta sobre la necesidad de un plan urgente de mitigación de riesgo, incluyente de la atención al peligro de deslizamientos en laderas. Debe resaltarse que en la distinción de las revisiones y refuerzos necesarios en las distintas partes de la ciudad juega un papel muy importante el Estudio de Microzonificación Sísmica de su Área Metropolitana.

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo se basa parcialmente en el estudio de amenaza sísmica, realizado en el marco del PMSC, financiado con fondos del FONACIT–BID II (2004000738). La transcripción digital de los sismos observados en Caracas presentes en el catálogo sísmico utilizado fue efectuada por los ingenieros D. Molina y J. González como parte del PMSC. Dos revisores anónimos hicieron valiosas observaciones que mejoraron este trabajo.

REFERENCIAS

- Abe, K y S Noguchi (1983), “Revision of magnitudes of large shallow earthquakes, 1897-1912”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 33, pp. 1–11, DOI: [10.1016/0031-9201\(83\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(83)90002-X)
- Abrahamson, N (2000), “Effects of rupture directivity on probabilistic seismic hazard analysis”, *6th Intern. Conf. on Seismic Zonation*, Nov. 12-15, 2000, Palm Springs, California. Proceedings in CD, <https://www.researchgate.net/profile/Paul-Somerville/publication/274244940>
- Abrahamson, N A y W J Silva (1997), “Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes”, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, N° 1, pp. 94-127. DOI: [10.1785/gssrl.68.1.94](https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.94)
- Abrahamson, N A y W J Silva (2008), “Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations”, *Earthquake Spectra*, Volume 24, No. 1, pp. 67–97. DOI: [10.1193/1.2924360](https://doi.org/10.1193/1.2924360)
- Aggarwal, Y, A V Drumea y V Shumila (1981), “Estimate of seismic hazard for Venezuela in frameworks of models of diffused and structural seismicity”, FUNVISIS, Caracas, 35 p. + fig. + tab.
- Akkar, S y J J Bommer (2010), “Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle East”, *Seismological Research Letters*, 81(2), pp. 195–206. DOI: [10.1785/gssrl.81.2.195](https://doi.org/10.1785/gssrl.81.2.195)
- Albarello, D, R Azzaro, M Barbano, S D’Amico, V D’Amico, R Rotondi, T Tuvè y G Zonno (2007), “Valutazioni di pericolosità sismica in termini di intensità macrosismica utilizzando metodi di sito”, *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)*, Dipartimento della Protezione Civile (DPC), Progetto S1, Task 2, Deliverable D9, 16 p., <http://esse1.mi.ingv.it/d9.html>
- Alcaldía de Caracas (2018), “Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio Bolivariano Libertador del Distrito Capital”, Gaceta Municipal Mun. Boliv. Libertador N° 4331-2, Caracas, <https://www.caracas.gob.ve/alcaldiaDeCCS/images/Descargas/Ordenanzas/ORD-M-137.pdf>
- Alcaldía de El Hatillo (2021), “Ordenanza para Edificaciones Sismorresistentes en el Municipio El Hatillo del Estado Bolivariano Miranda”, Gaceta Municipal, Municipio El Hatillo N° 119/2021, El Hatillo.
- Altez, R (2005), “El terremoto de 1812 en la ciudad de Caracas: un intento de microzonificación histórica”, *Rev. Geogr. Ven.*, N° especial 2005, pp. 171-198, <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/24658>
- Alvarado, L, L Rodríguez y M Paolini (2015), “Integración de catálogos sísmicos pre-instrumentales período 1530-1900”, FUN-012,2015, FUNVISIS, Centro de Documentación e Información, Caracas, <http://www.funvisis.gob.ve/old/cedi.php>
- Amaris, E, J Sánchez, V Rocabado, J Moncada, M Schmitz y M González (2009), “Espesores y características de los sedimentos profundos”, Subcapítulo 3.4, *Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas*, FUNVISIS, 31 p., http://www.funvisis.gob.ve/old/microz_caracas.php
- Anderson, J y J Luco (1983), “Consequences of slip rate constraints on earthquake occurrence relations”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 73, pp. 471-496, DOI: [10.1785/BSSA0730020471](https://doi.org/10.1785/BSSA0730020471)
- Araque, J (2009), “Crecimiento histórico de Caracas”, Subcapítulo 1.5, *Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas*, FUNVISIS, 18 p., http://www.funvisis.gob.ve/old/microz_caracas.php
- ASCE (2010), “Minimum design loads for buildings and other structures”, ASCE Standard, ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers (ASCE), Structural Engineering Institute (SEI), Reston, Virginia, DOI: [10.1061/9780784412916](https://doi.org/10.1061/9780784412916)

- ASCE (2016), “Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures”, ASCE Standard, ASCE/SEI 7-16, American Society of Civil Engineers (ASCE), Structural Engineering Institute (SEI), Reston, Virginia, DOI: [10.1061/9780784414248](https://doi.org/10.1061/9780784414248)
- ASCE (2022), “Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures”, ASCE Standard ASCE/SEI 7-22, American Society of Civil Engineers (ASCE), Structural Engineering Institute (SEI), Reston, Virginia. <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415788>
- Atkinson, G M y S I Kaka (2007), “Relationships between felt intensity and instrumental ground motion in the Central United States and California”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 97, pp. 497–510, DOI: [10.1785/0120060154](https://doi.org/10.1785/0120060154)
- Audemard, F A (2001), “Revisión y actualización de los parámetros sismogénicos de las fallas activas o potencialmente activas en Venezuela (Inf. Parcial Proy. INTEVEP 99-162)”, *FUNVISIS, Centro de Documentación e Información*, Caracas, <http://www.funvisis.gob.ve/old/cedi.php>.
- Audemard, F A, M Machette, J Cox, R Darty y K Haller (2000), “Map and database of quaternary faults in Venezuela and its offshore regions”, Open-File Report 00-0018, U.S. Geol. Survey, DOI: [10.3133/ofr0018](https://doi.org/10.3133/ofr0018)
- Beltrán, C (1993), “Trazas activas y síntesis neotectónica de Venezuela a escala 1:2.000.000”, *VII Congr. Ven. Geof.*, Caracas, pp. 541-547, <http://www.funvisis.gob.ve/old/archivos/mapas/neotectonico.gif>
- Boore, D M y G M Atkinson (2008), “Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s”, *Earthquake Spectra*, Vol. 24, pp. 99–138. DOI: [10.1193/1.2830434](https://doi.org/10.1193/1.2830434)
- Bossard, A (2018), “On the Poisson distribution applicability to the Japanese seismic activity”, *Int. J. Data Science*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–18. DOI: [10.1504/IJDS.2018.090627](https://doi.org/10.1504/IJDS.2018.090627)
- Briceño, F, J Sanabria, P Azpúrua y la Comisión Presidencial para el estudio del sismo (1978), “Segunda fase del estudio del sismo ocurrido en Caracas el 29 de julio de 1967”, Ministerio de Obras Públicas, 2 volúmenes, 1281 pp., FUNVISIS, editor, Caracas, https://books.google.co.ve/books/about/Segunda_fase_del_estudio_del_sismo_ocurr.html?id=iUOywQEACAAJ&redir_esc=y
- Campbell, K W (1997), “Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra”, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, N° 1, 154-179. DOI: [10.1785/gssrl.68.1.154](https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.154)
- Campbell, K W y Y Bozorgnia (2008), “NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s”, *Earthquake Spectra*, Vol. 24, pp. 139–171. DOI: [10.1193/1.2857546](https://doi.org/10.1193/1.2857546)
- Caprio, M, B Tarigan, C B Worden, S Wiemer y D J Wald (2015), “Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 105, pp. 1476-1490, DOI: [10.1785/0120140286](https://doi.org/10.1785/0120140286)
- Centeno, M (1940), “Estudios sismológicos”, 2ª edición (1969): aumentada y corregida, Biblioteca de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Volumen VIII, Caracas, https://books.google.co.ve/books/about/Estudios_sismológicos.html
- CERESIS (1985), “Catálogo de terremotos para América del Sur. Datos de hipocentros e intensidades. Vol. 8: Venezuela”, Centro Regional de Sismología para América del Sur, Lima, <http://www.ceresis.org/publicaciones/serie-sisra.html>

- Chiou, B y R R Youngs (2008), “An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra”, *Earthquake Spectra*, Vol. 24, pp. 173–215. DOI: [10.1193/1.2894832](https://doi.org/10.1193/1.2894832)
- Cornell, C (1968), “Engineering seismic risk analysis”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 58, pp. 1583-1606, DOI: [10.1785/BSSA0580051583](https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583)
- Coronel, G (2018), “El terremoto del noreste de Venezuela de 2018, el más grande de los últimos tiempos, sentido en Colombia, Trinidad y otras islas del Caribe”, <http://gustavocoroneld.blogspot.com/>
- COVENIN (2001), “Norma venezolana COVENIN 1756-1:2001”, Edificaciones sismorresistentes. Parte 1: Articulado (1ra. Revisión), Comisión Venezolana de Normas Industriales, FONDONORMA, FUNVISIS, Caracas, <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/1756-01.pdf>
- COVENIN (2019), “Norma venezolana COVENIN 1756-1:2019”, Construcciones sismorresistentes. Parte 1: Requisitos (2da. Revisión), Comisión Venezolana de Normas Industriales, FODENORCA, Caracas, <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/1756-1-2019.pdf>
- Dowrick, D J y W J Cousins (2003), “Historical incidence of Modified Mercalli intensity in New Zealand and comparisons with hazard models”, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 36, N° 1, pp. 1–24, DOI: [10.5459/bnzsee.36.1.1-24](https://doi.org/10.5459/bnzsee.36.1.1-24)
- Du, K, B Ding, W Bai, J Sun y J Bai (2020), “Quantifying uncertainties in ground motion-macro seismic intensity conversion equations. A probabilistic relationship for Western China”, *Journal of Earthquake Engineering*, published online, 25 p., DOI: [10.1080/13632469.2020.1750509](https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1750509)
- Esteva, L (1967), “Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico”, *Boletín Técnico del IMME*, Fac. de Ing., Universidad Central de Venezuela, N° 19, pp. 49-73. XII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y III Simposio Panamericano de Estructuras, Caracas.
- Ferrer, D y L Cluff (1969), “Caracas, Venezuela earthquake of July 29, 1967”, *Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago de Chile, https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/fourth_conf_chile/
- Fiedler, G (1961), “Áreas afectadas por terremotos en Venezuela”, *Mem. III Congreso Geológico Venezolano (Caracas, 1959)*, Tomo IV, 1791-1814, Bol. de Geol., Publ. Esp. N° 3, MMH, Vzla., <https://www.abebooks.com/book-search/title/memoria-tercer-congreso-geologico-venezolano/>
- Fiedler, G (1968), “Estudio sismológico de la región de Caracas con relación al terremoto del 29 de julio de 1967”, *Boletín Técnico IMME*, Vol. 6, N° 23-24, pp. 127-222.
- Fiedler, G (1972), “La liberación de energía sísmica en Venezuela, volúmenes sísmicos y mapa de isosistas”, *Mem. IV Cong. Geol. Venez.*, Tomo IV, 2441-2462, Bol. de Geol., Publ. Esp. N°5, MMH, <https://www.abebooks.com/Memoria-Cuarto-Congreso-Geologico-Venezolano-tomo/831205300/bd>
- Fiedler, G (1988), “Preliminary evaluation of the large Caracas earthquake of October 29, 1900, by means of historical seismograms”, en: *Lee, WHK, Meyers, H., Shimazaki, K., 1988, 'Historical seismograms and earthquakes of the world' pp. 201-207*, Academic Press, Inc., California, <http://ds.iris.edu/seismo-archives/info/publications/Lee1988.pdf>
- Gomez Capera, A, M Santulin, M Massa, M Locati y R Puglia (2019), “Conversione tra parametri del moto del suolo e intensità macrosismica”, *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*, Sezione di Milano, Italia, <https://www.earth-prints.org/handle/2122/13163>
- Grases, J (1989), “Terremotos: un problema no determinístico. Mediciones y efectos”, *Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, Vol. XLIX, Nros. 157-158, pp. 201-392, Caracas, <https://acfiman.org/>

- Grases, J (2002), “Aspectos sísmicos a considerar en el estado Vargas y consideraciones sobre estrategias de prevención. Primer Informe Año 2002”, *Plan Nacional para la reducción de riesgos ante amenazas de origen natural y tecnológico*, Instit. Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, Caracas, https://web.archive.org/web/20180910095625/http://www.igvsb.gob.ve/areas_tecnicas.html
- Grases, J, R Altez y M Lugo (1999), “Catálogo de sismos sentidos o destructores. Venezuela 1530-1998”, Academia de Ciencias Físicas Matemáticas y Naturales, Facultad de Ingeniería, U.C.V., <http://sisbiv.bnv.gob.ve/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=253019>
- Grünthal, G, editor (2003), “Escala macrosísmica europea 1998. EMS-98, versión en español”, Comisión Sismológica Europea, Subcom. de Ing. Sísm., Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg, http://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec26/resources/documents/PDF/EMS-98_Spanish.pdf
- Grünthal, G y C Gutiérrez (1996), “European macroseismic scale (EMS-92); innovations especially with respect to engineered buildings and experiences in its worldwide applications”, Special Theme Session. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Mexico, https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_2092.PDF
- Gutenberg, B y C F Richter (1944), “Frequency of earthquakes in California”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 34, pp. 185-188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>
- Guía de Venezuela (2009), “76 edificaciones han sido afectadas en Caracas”, *Noticia de prensa*, <http://www.guia.com.ve/noticias/dia/20090915>
- Hernández, J J, M Schmitz, F Audemard y G Malavé (2006), “Marco conceptual del Proyecto de Microzonificación de Caracas y Barquisimeto”, *VIII Congreso Venez. de Sismología e Ingeniería Sísmica*, Valencia, Venezuela, 8 p., <https://www.researchgate.net/publication/236147708>
- Hernández, J J (2007), “EASP v.1a-1r. Evaluación de la amenaza sísmica probable”, Programa para cálculo de respuestas espectrales de aceleración, efectos de directividad, velocidades pico e intensidades de Arias, en Plataforma SCILAB (c) INRIA-ENPC, <https://www.scilab.org/>
- Hernández, J J (2009a), “Revisión de la sismicidad y modelo sismogénico para actualización de las evaluaciones de amenaza sísmica en la región norcentral de Venezuela”, *IX Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*, Caracas, Memorias en CD, 15 p.
- Hernández, J J (2009b), “Incorporación de la información macrosísmica en modelo sismogénico de Venezuela con fines de evaluaciones de amenaza sísmica”, *V Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica*, Mérida, pp. 71-77, http://190.169.30.98/ojs/index.php/rev_geos/article/view/4016/3841
- Hernández, J J y J G Domínguez (2009), “Evaluación aproximada de edificaciones típicas”, Subcap.5.3, *Proy. de Microz. Sísm. de Caracas*, FUNVISIS, http://www.funvisis.gob.ve/old/microz_caracas.php
- Hernández, J J y M Schmitz (2009), “Espectros de diseño para microzonas”, Subcap. 6.4, *Proy. de Micr. Sísm. Car. y Barq.*, FUNVISIS, 49 p. http://www.funvisis.gob.ve/old/proy_mic_sismicacsbqto.php
- Hernández, J J y M Schmitz (2017), “Modelo sismogénico de Venezuela para evaluaciones de la amenaza sísmica”, *XI Congreso Venez. de Sismología e Ing. Sísmica*, Caracas, Trabajo N° CONV-083, 12 p., http://www.funvisis.gob.ve/old/convesis/archivos/convesis/Memorias_XI_CONVESIS_2017.pdf
- Hernández, J J, M Valleé, P Feliziani, M Schmitz, J Oropeza, M Tagliaferro, A Castillo y V Cano (2008), “Peligro sísmico de deslizamientos en laderas de Caracas”, *50 Aniversario de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG)*, 6 al 9 de noviembre 2008, Caracas, Memorias, 14 p.

- Hernández, J J, M Schmitz, D Molina y J Azuaje (2009), “Amenaza sísmica local”, Subcapítulo 2.4, *Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas*, FUNVISIS, 101 p. http://www.funvisis.gob.ve/old/proy_mic_sismicacsbqto.php
- Hernández, J J, M Schmitz, É Delavaud, H Cadet y J Domínguez (2011), “Espectros de respuesta sísmica en microzonas de Caracas considerando efectos de sitio 1D, 2D y 3D”, *Rev. Fac. Ing. UCV*, Vol. 26, N° 2, 49-66, http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_fiucv/article/download/4958/4766
- Hernández, J J, M Schmitz, M Paolini y Y Delgado (2017), “Caracterización de la amenaza sísmica de Venezuela para la actualización de la Norma COVENIN 1756”, *XI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*, Caracas, Trabajo N° CONV-082, 12 p., http://www.funvisis.gob.ve/old/convesis/archivos/convesis/Memorias_XI_CONVESIS_2017.pdf
- Idriss, I M (2005), “Attenuation relationships; 1.4 Attenuation relationships derived by Idriss (2002)”, *Refresher Course on "Seismic analysis and retrofitting of lifeline buildings in Delhi, India*, held at the Auditorium of the Delhi Secretariat Building, Delhi, India, 20 pp.
- Idriss, I M (2008), “An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes”, *Earthquake Spectra*, Vol. 24, pp. 217–242. DOI: 10.1193/1.2924362
- Inoue, A, H Kagawa, Y Yamazaki, M Miura, J Hernández, S Safina y R Bonilla (2006), “Seismic vulnerability of non-engineered houses in Caracas –field experiment and seismic evaluation–”, *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, Paper No. 52, ISBN: 9781615670444, <https://www.proceedings.com/05301.html>
- Jakubowicz, E y J Larotta (1974), “Terremoto del 29 de octubre de 1900”, *Boletín Técnico IMME*, Vol. 47, pp. 23–77.
- Kulkarni, R, I Wong, J Zachariasen, C Goldfinger y M Lawrence (2013), “Statistical analyses of great earthquake recurrence along the Cascadia Subduction Zone”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 103, No. 6, pp. 3205–3221. DOI: 10.1785/0120120105
- Leal A, R Vásquez, J A Rodríguez y F Audemard (2018), “Reevaluación del terremoto del 29 de octubre de 1900 en Venezuela. Primera parte: estimación de intensidades”, *Geominas*, Vol. 46, N° 77, pp. 139-154, <https://www.researchgate.net/publication/329895150>
- Marin, S, J-P Avouac, M Nicolas y A Schlupp (2004), “A probabilistic approach to seismic hazard in Metropolitan France”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 94, pp. 2137–2163, DOI: 10.1785/0120030232
- McGuire, R K (2004), “*Seismic hazard and risk analysis*”, Monograph MNO-10, Earthquake Engineering Research Institute, California, <https://es.scribd.com/document/440648298/>
- Medvedev, S, W Sponheuer y V Karník (1964), “Neue seismische Skala“, 7. Tagung der Europäischen Seismologischen Kommission vom 24.9. bis 30.9.1962, Veröff, *Institut für Bodendynamik und Erdbebenforschung in Jena*, vol. 77, Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, pp. 69–76.
- Mezcua, J, J Rueda y R M García Blanco (2013), “Observed and calculated intensities as a test of a probabilistic seismic-hazard analysis of Spain”, *Seismol. Res. Lett.*, Vol. 84, N° 5, pp. 772-780, DOI: 10.1785/0220130020
- Michetti, A, F Audemard, T Azuma, J Clague, V Commerci, E Esposito, L Guerrieri, A Gürpinar, J McCalpin, B Mohammadioun, N A Mörner, Y Ota, S Porfido, E Roghazin, L Serva, R Tatevossian y E Vittori (2007), “INQUA environmental seismic intensity scale 2007”, *Int. Union for Quat. Research, Servizio Geológico d'Italia*, APAT, Roma, Italia, http://www.apat.gov.it/site/en-B/Projects/INQUA_Scale/Environmental_Seismic_Intensity_Scale_-_ESI_2007/

- Mocquet, A (2007), “Analysis and interpretation of the October 21, 1766 earthquake in the Southeastern Caribbean”, *J. Seismol.*, Vol. 11, No. 4, pp. 381–403, DOI: [10.1007/s10950-007-9059-x](https://doi.org/10.1007/s10950-007-9059-x)
- Morales, C, K García, M González, M Tagliaferro, Y Flores, M Villar, A Justiniano, J Moncada, M Schmitz, J J Hernández y V Cano (2009a), “Características geofísicas y geotécnicas someras (Vs30)”, Subcapítulo 3.3, *Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas*, FUNVISIS, 15 p., http://www.funvisis.gob.ve/old/microz_caracas.php
- Morales, C, M Schmitz, J J Hernández, V Rocabado, M Vallée, M Tagliaferro, J Oropeza y V Cano (2009b), “Selección de microzonas en sedimentos y laderas”, Subcap. 6.3, *Proy. de Microz. Sísm. de Caracas*, FUNVISIS, 21 p., http://www.funvisis.gob.ve/old/proy_mic_sismicaccsbqto.php
- Musson, R, G Grünthal y M Stucchi (2010), “The comparison of macroseismic intensity scales”, *Journal of Seismology*, 14: 413–428, DOI: [10.1007/s10950-009-9172-0](https://doi.org/10.1007/s10950-009-9172-0)
- Newmark, N M y W J Hall (1982), “*Earthquake spectra and design*”, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 103 p., <https://fddocuments.in/document/1982-newmark-hall-eeri-earthquake-spectra-and-design.html>
- Ordaz, M y C Reyes (1999), “Earthquake hazard in Mexico City: observations versus computations”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 89, pp. 1379–1383, DOI: [10.1785/BSSA0890051379](https://doi.org/10.1785/BSSA0890051379)
- Ordaz, M, F Martinelli, A Aguilar, J Arboleda, C Meletti y V D'Amico (2015), “*CRISIS 2015. Program for computing seismic hazard*”, Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad de México, México, <https://sites.google.com/site/codecrisis2015/home>
- Palma, M, R Vásquez, G Romero y R López (2007), “Sismicidad instrumental, red sismológica local”, Subcapítulo 1.2, *Avance del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas*, FUNVISIS, 15 p.
- Pankow, K L y J C Pechmann (2004), “The SEA99 ground-motion predictive relations for extensional tectonic regimes: Revisions and a new peak ground velocity relation”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 94, pp. 341–348, DOI: [10.1785/0120030010](https://doi.org/10.1785/0120030010)
- Paolini, M, L M Rodríguez y F Olbrich (2012), “Actualización de las fallas activas de Venezuela como aporte a la evaluación de la amenaza sísmica”, FUN-077; 2012, FUNVISIS, Centro de Documentación e Información, Caracas, 46 pp., <http://www.funvisis.gob.ve/old/cedi.php>
- Papageorgiou, A S y J Kim (1991), “Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas valley with reference to the 29 July 1967 earthquake: SH waves”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 81, pp. 2214–2233, DOI: [10.1785/BSSA0810062214](https://doi.org/10.1785/BSSA0810062214)
- Pecker, A, E Faccioli, A Gurrupinar, C Martin y P Renault (2017), “*An overview of the SIGMA Research Project. A European approach to seismic hazard analysis*”, Springer International Publishing AG, Switzerland, 177 pp., DOI: [0.1007/978-3-319-58154-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58154-5)
- Petersen, M, A Frankel, S Harmsen, C Müller, K Haller, R Wheeler, R Wesson, Y Zeng, O Boyd, D Perkins, N Luco, E Field, C Wills y K Rukstales (2008), “Documentation for the 2008 update of the United States National Seismic Hazard Maps”, Open-File Report 2008–1128, U.S. Geol. Survey, Reston, Virginia, DOI: [10.3133/ofr20081128](https://doi.org/10.3133/ofr20081128)
- Reiter, L (1990), “*Earthquake hazard analysis: issues and insights*”, Columbia University Press, New York, 254 pp., <http://cup.columbia.edu/book/earthquake-hazard-analysis/9780231065344>
- Rendón, H, M Palma, R Vásquez, G Romero y R López (2009), “Sismicidad instrumental”, Subcapítulo 1.3, *Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas*, FUNVISIS, 11 p., http://www.funvisis.gob.ve/old/microz_caracas.php

- Rendón, H, L Alvarado, R Vásquez y G Romero (2014), “Depuración y actualización del catálogo sísmico instrumental de Venezuela, BASEVEN, como producto previo al catálogo necesario en los estudios de la amenaza sísmica”, *FUN-056,2014, FUNVISIS, Centro de Documentación e Información*, Caracas, 38 pp., <http://www.funvisis.gob.ve/old/cedi.php>
- Richter, C F (1958), “*Elementary Seismology*”, W.H. Freeman and Company, pp. 137-138. DOI: [10.1002/gj.3350020212](https://doi.org/10.1002/gj.3350020212)
- RISK ENGINEERING (1998), “EZ-FRISK™ Version 4.1”, Boulder, Colorado, US, <https://ez-frisk.org/>
- Rodríguez, J A, J J Hernández, D Molina y J González (2009), “Sismicidad histórica”, Subcapítulo 1.4, *Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas*, FUNVISIS, 39 p., http://www.funvisis.gob.ve/old/microz_caracas.php
- Romero, G y H Rendón (2007), “BASEVEN. Catálogo sísmico instrumental venezolano, 1910-2007”, FUNVISIS, Sismología, Caracas, <http://www.funvisis.gob.ve/old/sismologia.php>
- Sadigh, K, C Y Chang, J A Egan, F Makdisi y R R Youngs (1997), “Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data”, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, Nº 1, pp. 180-189. DOI: [10.1785/gssrl.68.1.180](https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.180)
- Schmitz M, J Hernández, F Audemard, G Malavé y L Andrade (2005), “Proyecto de Microzonificación Sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto”, *IV Coloq. sobre Microzonif. Sísm.*, Barquisimeto, Venezuela, 4 p., http://www.ucla.edu.ve/dCivil/Funvisis/Contenido_Funvisis/PrincipalFunvisis.htm
- Schmitz, M, J J Hernández, C Morales y el grupo de trabajo del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas (2009), “*Informe Técnico Final, Volumen 1 Caracas*”, Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738), FUNVISIS FUN-035a, 2007, Inédito, 978 pp., http://www.funvisis.gob.ve/old/proy_mic_sismicaccsbqto.php
- Schmitz, M, J J Hernández, C Morales, J Domínguez, V Rocabado, M Valleé, M Tagliaferro, É Delavaud, A Singer, E Amarís, D Molina, M González, V Leal y el grupo de trabajo del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas (2011a), “Principales resultados y recomendaciones del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas”, *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, Vol. 26, Nº 2, pp. 113-127, http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_fiucv/article/download/4967/4775
- Schmitz, M, J J Hernández y el Caracas Seismic Microzoning Project working group (2011b), “Principal results and basic methodology of the Caracas, Venezuela, Seismic Microzoning Project”, *5th Int. Conf. on Earthq. Geot. Engineering*, Santiago de Chile, Paper N. PRASC, 13 pp.; descarga: http://www.5icege.cl/images/stories/congress_sessions/papers/session_5/5.10.PRASC.pdf
- Schmitz, M, J J Hernández, V Rocabado, J Domínguez, C Morales, M Valleé, K García, J Sánchez, A Singer, J Oropeza, G Coronel, A Flores y el Caracas Seismic Microzoning Project working group (2020), “The Caracas, Venezuela, Seismic Microzoning Project: methodology, results and implementation for seismic risk reduction”, *Progress in Disaster Science* 5, DOI: [10.1016/j.pdisas.2019.100060](https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100060)
- Seed, H B, I M Idriss y H Dezfulian (1970), “*Relationships between soil conditions and building damage in the Caracas earthquake of July 29, 1967*”, UCB/EERC-70/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, <https://nisee.berkeley.edu/elibrary/Text/3127>
- Sieberg, A (1923), “*Geologische, Physikalische und Angewandte Erdbebenkunde*”, G. Fischer, Jena.
- Somerville, P, N Smith, R Graves y N Abrahamson (1997), “Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity”, *Seismol. Res. Lett.*, Vol. 68, Nº 1, pp. 199-222, DOI: [10.1785/gssrl.68.1.199](https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.199)

- Stewart, J, J Douglas, M Javanbarg, C Di Alessandro, Y Bozorgnia, N Abrahamson, D Boore, K Campbell, E Delavaud, M Erdik y P Stafford (2013), “*GEM-PEER Task 3 Project: Selection of a global Set of ground motion prediction equations*”, PEER Report 2013/22, Pacific Earthq. Eng. Research Center, Univ. of California, Berkeley, 251 p., <https://peer.berkeley.edu/peer-reports>
- Stirling, M y M Petersen (2006), “Comparison of historical record of earthquake hazard with hazard models for New Zealand and the continental United States”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 96, pp. 1978–1994, [DOI: 10.1785/0120050176](https://doi.org/10.1785/0120050176)
- Suárez, G y J Nábělek (1990), “The 1967 Caracas earthquake: fault geometry, direction of rupture propagation and seismotectonic implications”, *J. Geoph. Research*, Vol. 95, No. B11, pp. 17459–17474, [DOI: 10.1029/JB095iB11p17459](https://doi.org/10.1029/JB095iB11p17459)
- Tselentis, G-Akis y L Danciu (2008), “Empirical relationships between Modified Mercalli Intensity and engineering ground-motion parameters in Greece”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 98, pp. 1863–1875, [DOI: 10.1785/0120070172](https://doi.org/10.1785/0120070172)
- Wood, H O y F Neumann (1931), “Modified Mercalli Intensity Scale of 1931”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 21, 277–283. [DOI: 10.1785/BSSA0210040277](https://doi.org/10.1785/BSSA0210040277)
- Wu, S-C, C A Cornell y S R Winterstein (1995), “A hybrid recurrence model and its implication on seismic hazard results”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 85, No. 1, pp. 1–16, [DOI: 10.1785/BSSA0850010001](https://doi.org/10.1785/BSSA0850010001)
- Yamazaki, Y, I Tanaka, H Kagawa, F Audemard, J Hernández, N Orihuela, S Safina, M Schmitz y R Altez (2006), “Evaluation of historical earthquakes in Caracas for disaster prevention”, *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, Paper No. 1080, ISBN: 9781615670444, <https://www.proceedings.com/05301.html>
- Zhao, J X, J Zhang, A Asano, Y Ohno, T Oouchi, T Takahashi, H Ogawa, K Irikura, H K Thio, P G Somerville, Ya Fukushima y Yo Fukushima (2006), “Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 96, No. 3, pp. 898–913. [DOI: 10.1785/0120050122](https://doi.org/10.1785/0120050122)