

EVALUACIÓN DE NIVELES DE RIESGO SÍSMICO EN ESCUELAS DE VENEZUELA MEDIANTE CURVAS DE FRAGILIDAD

Gustavo Coronel D.¹, Oscar A. López¹ y Nelson Betancourt¹

1 Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela (UCV).
Caracas, Venezuela.
gustavocoroneld@gmail.com, oalsf@yahoo.com y njbetancourt@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología que permite estimar daños, pérdidas y niveles de riesgo sísmico en las edificaciones escolares de Venezuela a partir de la información recopilada en un inventario de las características estructurales básicas que condicionan su desempeño sísmico. Bajo la hipótesis de que los edificios fueron diseñados siguiendo la normativa correspondiente a la época de construcción, se estiman los desplazamientos cedente y último de cada edificio. Se caracteriza el daño mediante cuatro estados de daño y se construyen curvas de fragilidad sísmica basadas en una distribución lognormal. Se desarrolla una herramienta computacional integrada a un Sistema de Información Geográfica mediante la cual se estiman daños y niveles de riesgo sísmico en edificios escolares. Se aplica a la evaluación de niveles de riesgo sísmico de 547 edificios escolares del estado Sucre y 83 de la ciudad de Cumaná. Esta herramienta permite apoyar el proceso de planificación y toma de decisiones con fines de prevención y mitigación del riesgo sísmico en Venezuela.

SUMMARY

This paper presents a methodology for estimating damages, losses and seismic risk levels in school buildings in Venezuela based in an inventory of the basic structural characteristics that determine their seismic performance. Under the assumption that the buildings were designed in fulfillment of the code at the time of construction, the yield and ultimate displacement are estimated for each building. Four damage states are characterized and seismic fragility curves are defined using lognormal distribution. A computational tool integrated into a Geographic Information System is developed to estimate damages and seismic risk levels in school buildings. It is applied to the evaluation of seismic risk levels of 547 school buildings in Sucre state and 83 in the city of Cumaná. This tool is used to support the process of planning and decision making for prevention and mitigation of seismic risk in Venezuela.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de planes de prevención y mitigación del riesgo es una tarea que constantemente crece en muchos países del mundo que frecuentemente son afectados por desastres debidos a amenazas naturales o tecnológicas que cobran la vida de personas y ocasionan grandes pérdidas. Algunas iniciativas internacionales se han dedicado a dar respuesta a esta compleja tarea haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales facilitan el manejo y la representación mediante mapas temáticos de la información requerida para la toma de decisiones con fines de prevención y mitigación del riesgo. Por otra parte se han hecho grandes esfuerzos por caracterizar los complejos fenómenos que representan la amenaza y estimar la vulnerabilidad propia de los elementos expuestos. Bajo este enfoque han sido desarrollados el sistema HAZUS (FEMA-NIBS, 2003), ampliamente utilizado para este fin en muchas partes del mundo y las aplicaciones SIG del proyecto de la Unión Europea RISK-UE (2004), entre otros. En Venezuela se han llevado a cabo varias iniciativas en el tema del riesgo sísmico entre las cuales se encuentra el proyecto JICA en colaboración con FUNVISI (JICA, 2004) y el reciente proyecto de microzonificación sísmica para la ciudades de Caracas y Barquisimeto (FUNVISIS, 2009), entre otros.

En muchos países con amenaza sísmica alta y moderada, las edificaciones escolares existentes han sido objeto de estudios, investigaciones y planes orientados a reducir su vulnerabilidad y riesgo sísmico debido al carácter esencial que poseen por su densa ocupación, porque pueden servir de refugio post-desastre y por la función social que cumplen en la educación. Eventos sísmicos recientes como los de Molise (Italia) 2002, Boumerdes (Argelia) 2003, Bingöl (Turquía) 2003, Kashmir (Paquistán) 2005, Perú 2007, China 2008 y el reciente terremoto en Haití de enero de 2010, entre otros, han ocasionado importantes daños a edificaciones escolares y numerosas muertes de niños y maestros. En Venezuela el terremoto de Cariaco del 9 de julio de 1997 derrumbó cuatro edificios escolares, produjo la muerte de 22 niños y una maestra y originó la creación del programa nacional denominado “*Reducción del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares de Venezuela*” donde participan el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela (UCV), la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y la Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas (FEDE) del Ministerio del Poder Popular para la Educación (MPPE), bajo el apoyo del Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT) a través del proyecto N° 2005000188 (López et al., 2010). Esta investigación se enmarca dentro de esta iniciativa y tiene como objetivo estimar daños, pérdidas y niveles de riesgo sísmico en edificaciones escolares de Venezuela, mediante el desarrollo de curvas de fragilidad sísmica y su implementación en una herramienta basada en SIG, con la finalidad de priorizar futuros refuerzos estructurales y de servir de apoyo para la toma de decisiones en planes de prevención, de reducción de riesgo y de atención de emergencias.

INVENTARIO DE EDIFICIOS ESCOLARES

Se ha desarrollado un inventario parcial de las edificaciones escolares de Venezuela, atendiendo a las características estructurales básicas que condicionan su desempeño sísmico. Entre los años 2007 y 2008 se llevo a cabo el Registro Nacional Escolar (SINACOES, 2008) a través del Ministerio del Poder Popular para la Educación, en el cual se incorporaron una serie de preguntas para conocer el número de edificaciones por plantel, el número de pisos, el año de construcción, la ubicación geográfica y la tipología constructiva de cada edificio. Se ha logrado obtener hasta la

fecha información de 16.921 edificios escolares de 28.878 planteles registrados. Esta información ha sido incorporada al inventario de edificaciones escolares complementada con una base de datos de 18.685 planteles educativos ubicados mediante coordenadas georreferenciadas la cual fue desarrollada inicialmente por FEDE. En la Figura 1 se muestra la localización de los planteles escolares sobre el mapa de zonificación sísmica del país, siendo las Zonas 0 y 7 las de menor y mayor amenaza, respectivamente.

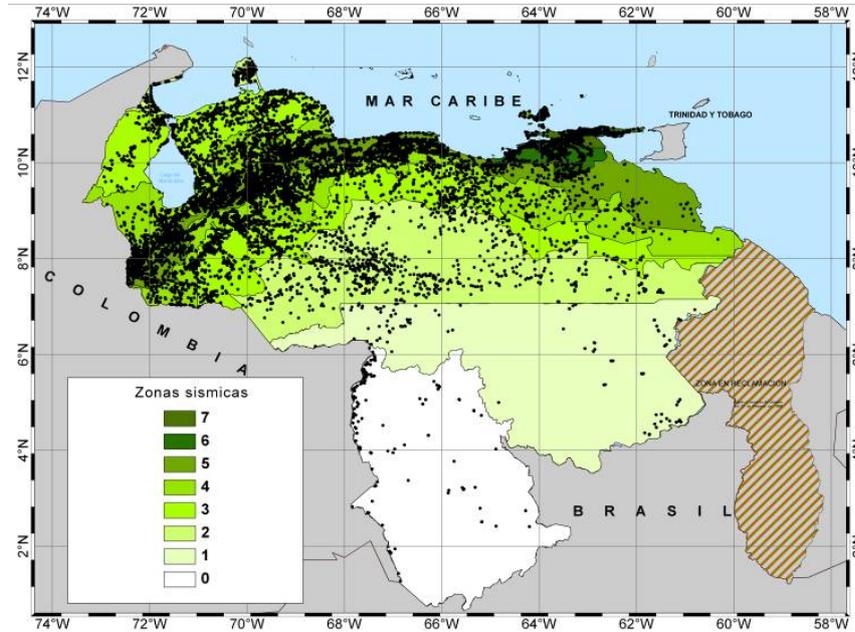


Figura 1 – Ubicación de edificios escolares sobre el mapa de zonificación sísmica de Venezuela

En la Tabla 1, se muestra la distribución de edificios por año de construcción; se aprecia que el 45,9% de los 16.921 edificios fueron construidos antes de 1982, con requerimientos sismorresistente bastante menos exigentes que los incluidos en las normas posteriores (COVENIN, 1982 y COVENIN, 2001).

Tabla 1 – Cantidad de edificios escolares por periodo constructivo (en total 16.921 edificios)

Año de Construcción	Pre 1939	1940-1947	1948-1955	1955-1967	1967-1982	1983-1998	Post 1998
% de edificios	1,5	1,8	3,7	14,2	24,8	27,7	26,4

CURVAS DE FRAGILIDAD SÍSMICA

La caracterización de la vulnerabilidad sísmica del edificio mediante curvas de fragilidad se basa en la información básica de cada escuela, suponiendo que los edificios fueron diseñados acorde con la normativa correspondiente a su época (López et al., 2010). Bajo esta hipótesis se construyen curvas de capacidad bilineal (Figura 2.a) para cada edificio a partir de: 1) La estimación de la capacidad resistente a nivel de cedencia (V_y) dividida entre el peso (W) del edificio, a partir de los coeficiente sísmicos (C_s) establecido por las seis normas venezolanas de los años 1939, 1947, 1955, 1967, 1982 y 1998 o 2001, llevados a nivel de cedencia e incorporando un factor de sobrerresistencia (Ω_y):

$$\frac{V_y}{W} = \Omega_y \cdot C_s \quad (1)$$

2) La determinación del desplazamiento cedente (u_y) suponiendo que la respuesta dinámica de la estructura está contenida en el modo fundamental (T_e):

$$u_y = \frac{\alpha_1 V_y}{\beta_1 W} g \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 \quad (2)$$

donde α_1 es el factor de participación del modo fundamental en el desplazamiento del último piso para el cual se adoptaron los valores sugeridos en experiencias nacionales e internacionales. El parámetro β_1 es la fracción de la masa del edificio contenida en el modo fundamental, el cual se adoptó igual al valor μ_0 definido en la norma venezolana COVENIN (2001);

3) La determinación del desplazamiento último (u_u) asignando un factor de ductilidad última (μ_u) a cada norma:

$$u_u = \mu_u u_y \quad (3)$$

Se implementan cuatro estados de daños denominados: 1) Ligero; 2) Moderado; 3) Severo y 4) Completo. Cada estado de daño queda representado en la curva de capacidad de la Figura 2.a en función del desplazamiento cedente y del último a partir de los siguientes límites (Barbat et al., 2008):

$$\begin{aligned} u_1 &= 0,70 u_y \\ u_2 &= u_y \\ u_3 &= u_y + 0,25(u_u - u_y) \\ u_4 &= u_u \end{aligned} \quad (4 \text{ a,b,c,d})$$

Las curvas de fragilidad permiten representar en términos probabilísticos la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones y proporcionan la probabilidad de que la respuesta de una estructura alcance o exceda determinado límite asociado al daño, como función de un parámetro indicador de la intensidad sísmica. A partir de la curva de capacidad de cada edificio se estima la curva de fragilidad para el límite de cada estado de daño. Para definir la curva de fragilidad se adoptó una distribución lognormal, la cual se expresa como:

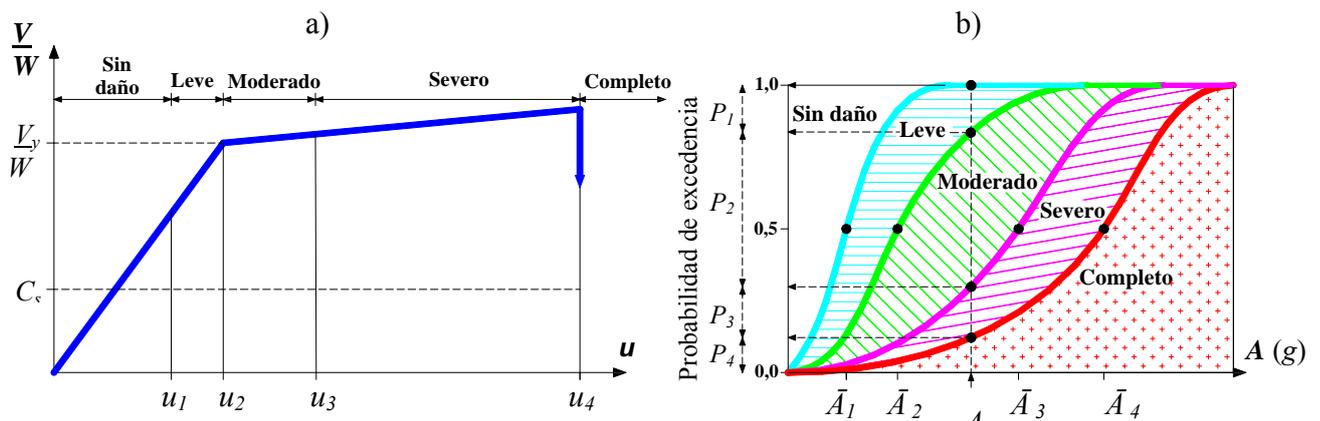


Figura 2 – a) Modelo bilineal de la curva de capacidad y límites de los estados de daños; b) Ejemplo de curvas de fragilidad para cada estado de daño.

$$P[d \geq i/A] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{Ai}} \ln \left(\frac{A}{\bar{A}_i} \right) \right] \quad (5)$$

donde, $\Phi[.]$ es la función de distribución normal estándar acumulada, β_{Ai} es la desviación estándar del $\ln(A)$ para el estado de daño (i), \bar{A}_i es el valor medio de la aceleración del terreno asociado al inicio del estado de daño (i) y $P [d \geq i / A]$ es la probabilidad de que el estado de daño (d) en la estructura alcance o supere el estado de daño discreto (i) condicionado a un valor de aceleración del terreno (A). Los valores medios de aceleración del terreno ($\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$ y \bar{A}_4) asociados al inicio de cada estado de daño ($i=1,2,3$ y 4) se estiman a través del método de los coeficientes (FEMA, 2005) a partir de los desplazamientos (u_1, u_2, u_3 y u_4) respectivamente. La desviación estándar del $\ln(A)$ para cada estado de daño, representada por β_{Ai} , se estima tomando en consideración experiencia nacional e internacional (FEMA-NIBS, 2009; Bonett, 2003). En la Tabla 2, se presentan los valores preliminares de β_{Ai} adoptados en este trabajo para cada estado de daño.

Tabla 2. Valores adoptados de la desviación estándar (β_{Ai}) para cada estado de daño.

(1) Leve	(2) Moderado	(3) Severo	(4) Completo
0,40	0,45	0,50	0,60

En la Figura 2.b, se ejemplifican las cuatro curvas de fragilidad para cada estado de daño. Cada curva representa la probabilidad de alcanzar o exceder el estado de daño indicado en el área inferior a la curva. La diferencia (P_1, P_2, P_3 o P_4) de ordenadas entre las curvas representa la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño para la aceleración A .

Para ejemplificar la metodología se presenta en la Figura 3.a las curvas de capacidad y en la Figura 3.b las curvas de fragilidad para el estado daño “completo”, representativas de edificaciones de dos pisos, ubicadas en la zona sísmica de mayor amenaza y bajo un suelo de características intermedias, diseñadas y construidas en los periodos correspondientes a cada norma. Se puede observar la influencia de la norma de diseño sobre la vulnerabilidad de las edificaciones, siendo más vulnerables las más antiguas.

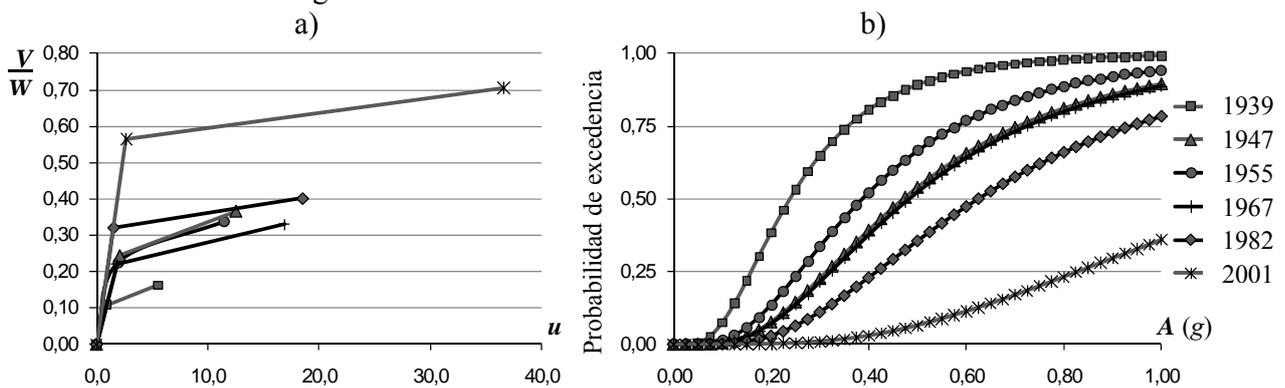


Figura 3 – Ejemplo para edificaciones de 2 pisos diseñadas con distintas normas; a) Curvas de capacidad para cada edificio (u en centímetros); b) Curvas de fragilidad para el daño completo.

Se comparan a continuación las curvas de fragilidad para los estados de daño severo y completo desarrolladas en este trabajo para edificios de 2 pisos, con las curvas implementadas en el sistema HAZUS para edificios bajos (1-3 pisos), aperticados, de concreto reforzado (CL1). En la Figura 4.a se comparan las curvas de fragilidad de edificios venezolanos diseñados con la norma de

1947 con las respectivas de HAZUS para un nivel de diseño bajo. En la Figura 4.b se comparan las curvas para edificios venezolanos diseñados con la norma de 2001 con las respectivas de HAZUS para un nivel de diseño alto. Se puede observar la similitud en dichas curvas, siendo las venezolanas un poco más vulnerables.

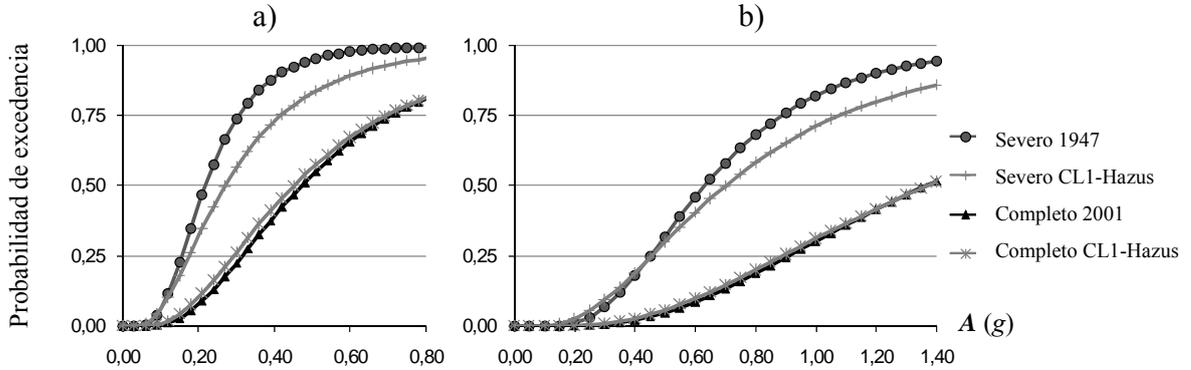


Figura 4 – Comparación de las curvas fragilidad con las utilizadas en HAZUS para los estados de daño severo y completo; a) Edificio venezolano diseñado con la norma de 1947 vs Edificio tipo CL1 de HAZUS, nivel de diseño bajo; b) Edificio venezolano diseñado con la norma de 1998 o 2001 vs Edificio tipo CL1, nivel de diseño Alto.

DAÑOS Y NIVELES DE RIESGO SÍSMICO

Para la estimación de daños las probabilidades de ocurrencia (P_i) de cada estado de daño (i) prefijado se obtienen de las curvas de fragilidad a partir de la aceleración máxima del terreno (A_k) estimada en cada escuela para cada evento sísmico (k) definido de forma determinística (Figura 2.b). El daño medio (D_m) se estima en cada edificio mediante la Ecuación (7), ponderando las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño con los factores de daño (D_i) de la Tabla 3, definidos para cada estado de daño en (Hwang and Lin, 2002) y (Blondet et al., 2005):

$$D_m = \sum_{i=0}^4 P_i \cdot D_i \quad (7)$$

Tabla 3. Factores de daño (D_i), niveles de riesgo e índices de riesgo (I_r).

i	Estado de Daño	D_i (%)	D_m (%)	Nivel de Riesgo	I_r (%)
0	Sin daño	0	< 2,5	Muy bajo	< 2,5
1	Ligero	5	2,5 – 12,5	Bajo	2,5 – 12,5
2	Moderado	20	12,5 – 30,0	Moderado	12,5 – 30,0
3	Severo	65	30,0 – 75,0	Alto	30,0 – 75,0
4	Completo	100	> 75,0	Muy alto	> 75,0

El valor de D_m permite representar un resultado discreto del daño de cada edificación, definiendo los rangos de valores asociados a cada estado de daño que se muestran en la Tabla 2.

En la Tabla 3 se definen cinco niveles de riesgo sísmico asociado a los rangos del índice de riesgo (I_r), el cual se obtiene mediante la Ecuación 8 ponderando las probabilidades de ocurrencia (P_i) con los Factores de daño (D_i) de la Tabla 3. Para determinar I_r se determinan las P_i de cada

estado de daño (i) a partir de las curvas de fragilidad para el valor de aceleración máxima del terreno (A_0), correspondiente a la ubicación de cada escuela determinada a partir de un mapa de zonificación asociado a cierta probabilidad de ocurrencia o periodo de retorno (T). Estos niveles de riesgo permiten representar de forma discreta el resultado y facilitan la interpretación de los mismos mediante mapas y gráficos.

$$I_r = \sum_{i=0}^4 P_i \cdot D_i \quad (8)$$

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA BASADA EN SIG

Para la estimación de daños, pérdidas y niveles de riesgo sísmico en las escuelas de Venezuela se ha desarrollado una herramienta computacional en forma integrada dentro de la plataforma del SIG conocido como ArcGIS 9.2 (ESRI, 2009); a partir de la programación en el entorno del *Visual Basic Application* propio del sistema. En la Figura 4, se observa en forma general las fases y procedimientos de la herramienta desarrollada (Coronel et al., 2010):

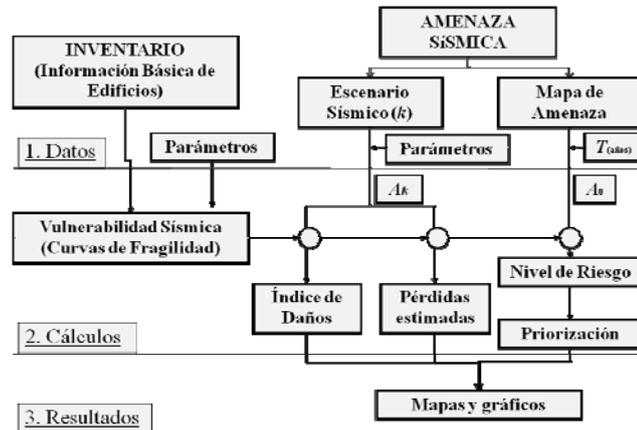


Figura 4 – Esquema general de la herramienta computacional desarrollada.

Una primera fase de entrada de datos o pre-proceso está fundamentada en una interfaz gráfica compuesta de un menú principal (Figura 5) y de ventanas dentro del sistema mediante las cuales se puede manejar el inventario de edificios, seleccionar y modificar los parámetros propios de la metodología y definir escenarios sísmicos.



Figura 5 – Entorno de trabajo y menú principal de la herramienta computacional.

Una segunda fase de cálculo o proceso en la cual se determinan las curvas de fragilidad, y a partir de la aceleración en cada escuela se estiman las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño. Posteriormente de acuerdo al escenario definido se determinan índices de daño, pérdidas o niveles de riesgo. Finalmente una tercera fase de resultados o post-proceso en la cual se representan los resultados obtenidos a través de mapas temáticos y gráficos.

EVALUACIÓN DE NIVELES DE RIESGO SÍSMICO

En la Figura 6 se presenta como ejemplo de aplicación los niveles de riesgo estimados para un grupo de 42 edificios escolares, ubicados en el estado Sucre en las zonas sísmicas 6 y 7. Se indica el número de pisos y la norma utilizada para su diseño. Se estima el nivel de riesgo para tres periodos de retorno (T) de 50, 475 y 1000 años, asociados a valores de A_0 en la zona 7 de 0,20g, 0,40g y 0,50g y en la zona 6 de 0,18g, 0,35g y 0,44g, respectivamente. Se asume un tipo de suelo promedio.

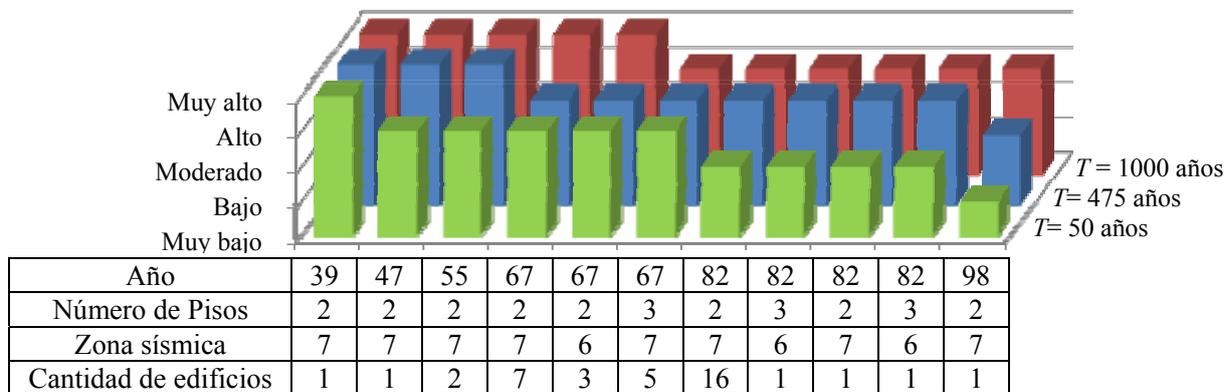


Figura 6 – Nivel de riesgo de 42 escuelas del estado Sucre para diferentes periodos de retorno.

En la Figura 7 se muestra el mapa que representa el nivel de riesgo estimado para 547 edificaciones escolares del estado sucre para un periodo de retorno de 475 años. El 56% de estas edificaciones fueron construidas antes de 1982 con normas menos exigentes. Se encuentra que el 53% de ellas presentan un nivel de riesgo Muy alto para el sismo de diseño ($T=475$ años).

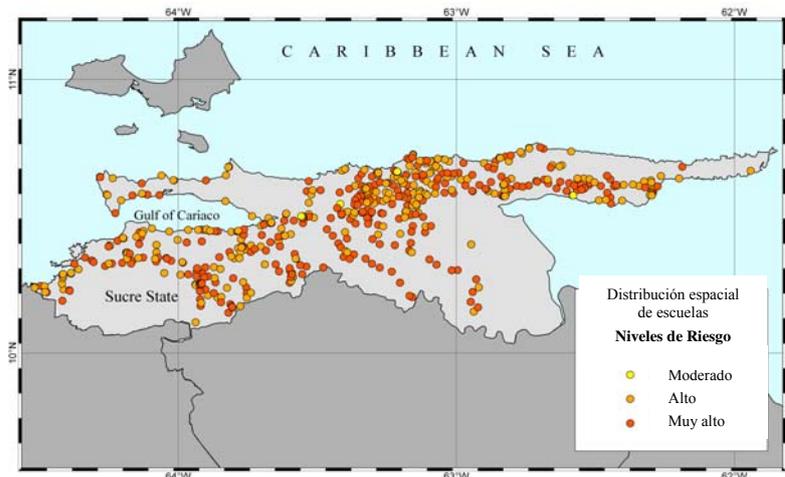


Figura 7 – Mapa de nivel de riesgo sísmico en 547 escuelas del estado Sucre para $T=475$ años.

En la Figura 8.b se muestra el nivel de riesgo sísmico estimado para 83 edificaciones escolares de la ciudad de Cumaná en el estado Sucre. La evaluación corresponde a un periodo de retorno de 475 años asociado a valores de A_0 de 0,40g y se consideró para el desarrollo de las curvas de fragilidad las formas espectrales características de los tipos de suelo S1, S2 y S3 establecidos en la norma COVENIN (2001) a partir del mapa de la Figura 8.a tomado de Grases et al. (2005). Para este caso el 54,2 % de las edificaciones fueron construidas antes de 1982 con normas menos exigentes. Se encuentra que el 69,8 % de ellas presentan un nivel de riesgo Muy alto para el sismo de diseño ($T=475$ años). Esta información facilita la toma de decisiones en planes de reducción del riesgo y de atención de emergencias.

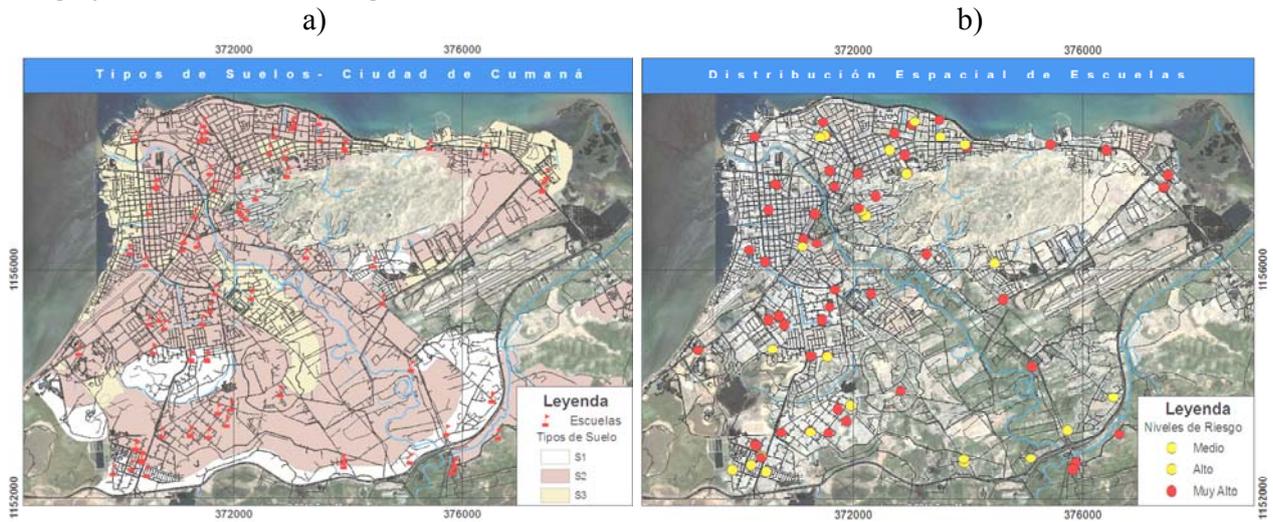


Figura 8 – a) Mapa de ubicación de 83 edificios escolares de Cumaná y tipos de suelo; b) Mapa de nivel de riesgo sísmico estimado en 83 edificios escolares de Cumaná para $T=475$ años.

CONCLUSIONES

Las curvas de fragilidad estimadas mediante esta metodología permiten representar de forma aproximada la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones escolares de Venezuela. Se desarrolló una herramienta computacional integrada en un SIG que permite estimar daños y niveles de riesgo sísmico en los edificios escolares basada en curvas de fragilidad aproximadas. Se aplicó a 547 edificios escolares del estado Sucre de los cuales se encontró que un 53% de ellos presentan un nivel de riesgo muy alto o un riesgo relativamente mayor al resto, al igual que 69% de los 83 edificios escolares evaluados en la Ciudad de Cumaná. Esta herramienta facilita la tarea de priorización en planes de prevención y reducción del riesgo pero debe seguir siendo calibrada a fin de obtener a futuro resultados más precisos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se desarrolló en el marco del proyecto “Reducción del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares de Venezuela” en el cual participan IMME, FUNVISIS y FEDE con financiamiento del FONACIT (proyecto N° 2005000188).

REFERENCIAS

- Barbat A. H., Pujades L.G., Lantada N. "Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, 2008: 851–865.
- Blondet M., Muñoz A., Velásquez J. y León H. "Estimación de pérdidas sísmicas en edificaciones educativas Peruanas," *IX Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Concepción, Chile, 2005.
- Bonett R. "Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada," *Tesis Doctoral. UPC*, Barcelona España, 2003.
- Coronel D. G., López O. A y Betancourt N. "Desarrollo de una herramienta basada en SIG para la evaluación de daños y pérdidas debidos a terremotos en edificios escolares de Venezuela," *X International Congress on Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences (CIMENICS)*, Mérida, Venezuela, 2010.
- COVENIN. "Edificaciones Antisísmicas. Norma COVENIN 1756:82," *Comisión Venezolana de Normas Industriales*, Caracas, Venezuela, 1982.
- COVENIN. "Edificaciones Sismorresistentes. Norma COVENIN 1756:01," *Comisión Venezolana de Normas Industriales*, Caracas, Venezuela, 2001.
- ESRI. "Sistema de Información Geográfica, ArcGIS 9.2, versión académica," *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*. <http://www.esriven.com/>, 2008.
- FEMA. "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. FEMA 440," *Federal Emergency Management Agency, ATC-55 Project*, Washington D.C., 2005.
- FEMA-NIBS. "Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS-MH MR4, Advance Engineering Building Module, Technical and User's Manual," *Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS)*. Washington D.C., 2009.
- FUNVISIS. "Proyecto de Microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738)," *Informe Técnico Final*. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela, 2009.
- Grases J., Malaver A., Montes L., Gonzales M., Herrera C., Acosta L., Lugo M., Madriz J., Hernández J. y Vargas R. "Amenazas Naturales y Vulnerabilidad en Cumaná," *Boletín Técnico IMME*, No 3, Vol. 42, 2005: 57-80.
- Hwang H., and Lin, Y. K. "Seismic Loss Assessment of Memphis City School Buildings," *Proceedings of The Seventh U. S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, 2002.
- JICA. "Estudio sobre: El Plan básico de prevención de desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas en la República Bolivariana de Venezuela," *Informe Final Principal*. Agencia de Cooperación Internacional de Japon (JICA), 2004.
- López O. A., Marinilli A., Bonilla R., Fernández N., Domínguez J., Baloa T., Coronel D. G., Safina S. y Vielma R. "Evaluación sísmica y adecuación de edificios escolares en Venezuela," *Revista de la Fac. Ing. UCV* (A ser publicado), 2010.
- RISK-UE. "The European Risk-UE Project: An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios," Proyecto de la Unión Europea (2001-2004), <http://www.risk-ue.net>, 2004.
- SINACOES. "Sistema Nacional de Control de Estudio," Ministerio del Poder Popular para la Educación. Caracas, Venezuela, <http://planteles.me.gob.ve/>, 2008.