

Eco Matemático

Scientific Journal of Mathematics



Simulation of seismic damage scenario in San José de Cúcuta, Colombia

Simulación de escenario de daño sísmico en San José de Cúcuta, Colombia

Carlos Humberto Flórez-Góngora^a, Juan Camilo Ramírez-Gamboa^b, Jorge Fernando Márquez-Peñaranda^c

¹Magíster en Ingeniería Civil, carloshumbertofg@ufps.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-6924-0713>, Universidad Francisco de Paula Santander, Departamento de Geotecnia y Minería, Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental-GIGA, San José de Cúcuta, Colombia.

²Magíster en Ingeniería Civil, juancamilorg@ufps.edu.co, <https://orcid.org/0009-0002-5317-6192>, Universidad Francisco de Paula Santander, Departamento de construcciones civiles, vías y transportes, Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental-GIGA, San José de Cúcuta, Colombia.

³Doctor en Ingeniería, jorgefernandomp@ufps.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-9193-8349>, Universidad Francisco de Paula Santander, Departamento de construcciones civiles, vías y transportes. Grupo de Investigación en ingeniería estructural-POLIMATAS, San José de Cúcuta, Colombia.

Forma de citar: Florez-Góngora, C. H., Ramírez-Gamboa, J. C., y Márquez-Peñaranda, J. F. (2024). Simulación de escenario de daño sísmico en San José de Cúcuta, Colombia. *Eco Matemático*, 15 (1), 32-40. <https://doi.org/10.22463/17948231.4226>

Recepción: Agosto 19, 2023

Aprobación: Diciembre 07, 2023.

Keywords

Damage index,
Damage scenario,
Earthquake,
Vulnerability,
PGA.

Abstract: In this work, the probable damage scenario produced by seismic effects upon buildings in an urban sector of the city of San José de Cúcuta has been investigated. To do so, a method based on assigning a value related to the qualification of eleven variables which include key structural aspects to compute the vulnerability index related to two maximum acceleration scenarios in rock is applied. As a result, global data are displayed using a geographic information system. Such graphic representation shows that a high percentage of one to three story buildings have damage indices that forecast medium and severe damage. Therefore, it is highly probable that buildings made of unconfined masonry and reinforced concrete moment-resistant frames that have less than four levels must be subjected to structural reinforcement or other actions tending to reduce structural vulnerability.

*Autor para correspondencia: carloshumbertofg@ufps.edu.co

<https://doi.org/10.22463/17948231.4226>

2462-8794© 2024 Universidad Francisco de Paula Santander. Este es un artículo bajo la licencia CC BY 4.0

Palabras clave

Índice de vulnerabilidad, Índice de daño, Escenario de daño, Sismo, Vulnerabilidad, PGA.

Resumen: En este trabajo se ha investigado el escenario probable de daños producidos por efectos sísmicos en edificaciones de un sector urbano de la ciudad de San José de Cúcuta. Para ello, se aplica un método basado en la asignación de un valor relacionado con la calificación de once variables que incluyen aspectos estructurales clave para calcular el índice de vulnerabilidad relacionado con dos escenarios de máxima aceleración en roca. Como resultado, los datos globales se muestran utilizando un sistema de información geográfica. Dicha representación gráfica muestra que un alto porcentaje de edificaciones de uno a tres pisos tienen índices de daño que pronostican daños medianos y severos. Por lo tanto, es altamente probable que los edificios hechos de mampostería no confinada y pórticos resistentes a momentos de hormigón armado que tengan menos de cuatro niveles deban ser sometidos a refuerzo estructural u otras acciones tendientes a reducir la vulnerabilidad estructural.

Introducción

El desarrollo urbano en el mundo en zonas de amenaza sísmica alta ha permitido establecer lo que se denominan estudios de vulnerabilidad para conocer la posible respuesta de las edificaciones ante la ocurrencia de un probable terremoto (Maldonado Rondón & Chio Cho, 2008) (Senouci et al., 2018), es decir, elaborar un probable escenario de daño por sismo (Chieffo et al., 2019) (Barbat et al., 1996). Las metodologías se han enfocado en la elaboración de funciones de vulnerabilidad sísmica y matrices de probabilidad de daño, las cuales calculan el índice de vulnerabilidad, I_v , y el índice de daño, D (%).

Los I_v analizan características de las estructuras y del suelo de cimentación y las funciones de daño, D (%) se elaboraron para escenarios estimativos de la acción sísmica sobre los valores de aceleración horizontal máxima, A_a (PGA, por su sigla en inglés). Las metodologías distinguen entre los sistemas estructurales más comunes en las zonas urbanas y calculan los índices de vulnerabilidad para estructuras de mampostería no reforzada (Benedetti & Vincenzo Petrini, 1984) y pórticos de concreto reforzado (Carlos Vielma et al., 2008) (Benjamín Hernández & Lockhart Castro, 2011) (CNR, 1993). Los métodos para el cálculo de daños por escenario sísmico se han usado con fuerza en ciudades europeas (Lantada et al., 2018) (Feliciano et al., 2023) (Anglade et al., 2020) (Pessina et al., 2021). En Colombia, el enfoque de las metodologías

clásicas para calcular los escenarios de daño se ha mantenido. Los trabajos abordados en ciudades como Cali (Yepes-Estrada et al., 2022), Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C et al., 2005) y otras (Villar-Vega et al., 2017) muestran incluso, los cálculos económicos por daños materiales y número de muertos. La ciudad de San José de Cúcuta, la cual se encuentra clasificada en zona de amenaza sísmica alta según el código nacional de construcciones sismos resistentes (NSR10) fue destruida por un poderoso terremoto en el año de 1875. La complejidad del entorno tectónico de la ciudad de San José de Cúcuta (Florez et al., 2020) (Flórez-Góngora et al., 2022) (Lozano et al., 2013) justifica los esfuerzos por calcular un escenario de daño probable por sismo. El trabajo de (Flórez-Góngora et al., 2020) se considera una primera aproximación al tema. El presente trabajo investigativo y los resultados obtenidos se consideran una contribución a la comprensión de la amenaza sísmica para la ciudad de San José de Cúcuta y establece las alarmas objetivas para que desde el ámbito de las autoridades públicas se tomen las medidas necesarias para desarrollar estudios de profundidad tendientes conocer y mitigar la vulnerabilidad de las edificaciones de la ciudad y quienes habitan en ellas.

Metodología

Se utilizó la calificación y peso de ponderación para el cálculo del índice de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería de Benedetti y Petrini

(Benedetti & Vincenzo Petrini, 1984) y para las edificaciones de concreto reforzado (CNR, 1993), bajo el siguiente procedimiento:

Localización o selección del área de estudio, la cual correspondió a un sector de la comuna 2 de San José de Cúcuta, Colombia. Se usó la base de datos del estudio (Nieto Estévez, 2018) conformado por 1202 predios o edificaciones, los cuales se clasificaron por número de pisos y según sistema estructural, correspondiéndose así: edificios de uno hasta tres pisos (1062) y corresponden a edificios de mampostería no confinada y edificaciones mayores o iguales a cuatro pisos (140) que corresponden a estructuras de pórticos en concreto reforzado.

Aplicación de la escala numérica para el cálculo del índice de Vulnerabilidad, I_v para los edificios de mampostería no reforzada y para estructuras de concreto reforzado. Esta escala utiliza once parámetros, los cuales tienen cuatro clases o categorías identificadas como A, B, C y D, donde A representa óptimo y D desfavorable en la escala. Cada clase tiene un puntaje (K_i) el cual varía según la apreciación del calificador experto y cada parámetro tiene asociado un peso (W_i) que indica la importancia del parámetro dentro del sistema estructural de la edificación. La Tabla I muestra la calificación y pesos de ponderación usados para cada parámetro en edificaciones de mampostería y la Tabla II para edificaciones de concreto reforzado.

Tabla I. Calificación y peso de ponderación de ítems de vulnerabilidad, I_v para edificaciones de mampostería (Benedetti y Petrini, 1984)

No	Parámetro	$K_i (A)$	$K_i (B)$	$K_i (C)$	$K_i (D)$	Peso, W_i
1	Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.00
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3	Resistencia convencional	0	5	25	45	1.50
4	Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75
5	Diafragma horizontal	0	5	15	45	1.00
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.50
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1.00
8	Distancia máxima entre los muros	0	5	25	45	0.25

9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1.00
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1.00

Tabla II. Calificación y peso de ponderación de ítems de vulnerabilidad, I_v para edificaciones de concreto reforzado (CNR, 1993)

No	Parámetro	$K_i (A)$	$K_i (B)$	$K_i (C)$	Peso, W_i	Peso, W_i
1	Organización del sistema resistente	0	1	2	4	1.00
2	Calidad del sistema resistente	0	1	2	1	0.25
3	Resistencia convencional	-1	0	1	1	1.50
4	Posición del edificio y cimentación	0	1	2	1	0.75
5	Diafragmas horizontales	0	1	2	1	1.00
6	Configuración en planta	0	1	2	1	0.50
7	Configuración en elevación	0	1	3	2	1.00
8	Conexión entre elementos críticos	0	1	2	1	0.25
9	Elementos de baja ductilidad	0	1	2	1	1.00
10	Elementos no estructurales	0	1	2	1	0.25
11	Estado de conservación	0	1	2	2	1.00

El índice de vulnerabilidad, I_v está definido como la suma ponderada de los puntajes de cada parámetro, según ecuación (1):

$$I_v = \sum K_i * W_i \quad (1)$$

Se establece una escala en que un valor de $I_v = 382.5$ es un valor máximo de calificación y será desfavorable y un valor de $I_v = 0$ se califica como óptimo.

Cálculo del índice de daño, D (%), usando los valores de los coeficientes de vulnerabilidad para las edificaciones de mampostería no confinada y de pórtico de concreto reforzado con vigas y columnas, obtenidos en el cálculo de las regresiones polinómicas, según ecuación (2).

$$D(\%) = a1I_v^2 + a2I_v^1 + B \quad (2)$$

Tabla III. Coeficientes de las funciones ajustadas para varios escenarios de daño, D (%). Maldonado et al, 2010. Modificación autores, 2023.

Escenario	a1	a2	B
Aa=0.25g	0.46975	3.22598	28.56765
Aa=0.30g	0.43687	2.78409	39.98343
Aa=0.35g	0.40399	2.34220	51.39921

Las funciones de daño, D (%), se presentan para dos escenarios. Escenario 1 con $Aa=0.30g$ y escenario 2 con $Aa=0.35g$. Las calificaciones de daños se establecen según la siguiente escala: :0% – 10% Ligero; 11% – 30% Moderado; 31% – 60% Fuerte; 61% – 80% Severo; 81% - 100% Destrucción.

Los resultados obtenidos para los dos escenarios de daños se presentan en un sistema de información geográfico (SIG).

Resultados y Discusión

En la Tabla IV se presentan los resultados obtenidos para el cálculo del índice de vulnerabilidad, I_v y el índice de daños, D (%) para las edificaciones de mampostería no confinada correspondiente a edificaciones entre 1 y 3 niveles, en los escenarios $Aa=0.30g$ y $Aa=0.35g$.

Tabla IV. Resultados de calificación para escenarios de daño, D (%) edificaciones de mampostería no confinada, entre 1 y 3 niveles

Escenario	I_v	D (%)	Calificación de Daño, D
Aa=0.30g	241.25	56.33	Severo
Aa=0.35g	241.25	68.42	Severo

En la Tabla V se presentan los resultados obtenidos para el cálculo del índice de vulnerabilidad, I_v y el índice de daños, D (%) para las edificaciones de pórticos en concreto reforzado correspondiente a edificaciones iguales o mayores a 4 niveles, en los escenarios $Aa=0.30g$ y $Aa=0.35g$.

Tabla V. Resultados de calificación para escenarios de daño, D (%) edificaciones pórticos de concreto reforzado, iguales o mayores a 4 niveles

Escenario	I_v	D (%)	Calificación de Daño, D
Aa=0.30g	56.25	28.57	Moderado
Aa=0.35g	56.25	28.57	Moderado

Los índices de vulnerabilidad, I_v , para las edificaciones de mampostería no confinada, edificaciones entre 1 y tres niveles, $I_v = 241.25$ obtiene una calificación de comportamiento desfavorable y para las edificaciones con pórticos en concreto reforzado, mayores o iguales a cuatro niveles, $I_v = 56.25$ con calificación más cercano a un comportamiento óptimo. Igualmente, se presentan los resultados obtenidos en tres mapas usando un sistema de información geográfica para la base de datos utilizada. La Figura 1 muestra la localización y delimitación del área estudiada correspondiente a un sector de la comuna 2 de San José de Cúcuta, Colombia, zona de estudio. La Figura 2 y la Figura 3 muestran los escenarios de daños, D (%) obtenidos para los escenarios $Aa = 0.30g$ y $Aa = 0.35g$ respectivamente. Para el primer escenario, las edificaciones entre uno y tres pisos, arroja un $D=56,33\%$, indicándose que, los daños para el conjunto de edificaciones son severo (identificado con color rojo oscuro en el mapa) y para edificaciones iguales o mayores a cuatro pisos, $D = 28,57\%$, calificándose como daños moderados (identificado con color crema en el mapa). Para el segundo escenario, $Aa = 0.35g$, las edificaciones menores o iguales a tres pisos, $D = 68,42\%$, daños severos, y para las edificaciones de cuatro pisos o más, $D = 28,57\%$, daños moderados, con igual asignación de color en el mapa en SIG, color rojo oscuro y color crema, respectivamente.

Los valores de daño encontrados para el conjunto de edificaciones analizadas correspondientes a un sector de la comuna 2 de San José de Cúcuta es consistente, dado que, alrededor del 90% de las edificaciones entre uno y tres niveles de los barrios Colsag, La Riviera, Urbanización Sayago, Los Libertadores, Los Caobos, Rosetal, Barrio Blanco y Quinta Vélez, que hacen parte del conjunto

analizado fueron construidos entre los años 1940 y 1970, anterior a la expedición del primer código de construcciones sismo resistente para Colombia, expedido en 1984. De otro lado, la zona de estudio se encuentra ubicada sobre depósitos de suelos transportados y pertenecientes a la unidad geomorfológica del valle aluvial del Río Pamplonita y sus quebradas afluentes que drenan los cerros del costado sur oriental hacia las terrazas aluviales cuaternarias (Qtal). Estudios recientes de perfiles de velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros del depósito cuaternario, localizados sobre la comuna 2, zona de estudio, obtenidos a partir de la inversión de curvas de autocorrelación espacial para un arreglo lineal muestran cinco capas sobre un semi espacio dentro de un rango de velocidades entre 300 m/s y 650 m/s (Lozano et al., 2013), lo cual se infiere que, el perfil de suelo tendría asociado un periodo de vibración aproximado a 0,223 segundos, coincidiendo con los periodos estructurales de las edificaciones entre uno y tres niveles. Las edificaciones entre uno y tres niveles suman el 88% del total de las edificaciones analizadas en la zona. Los elementos anteriores, como edad de las edificaciones, velocidad de onda cortante asociada al depósito de suelo, periodo de vibración del suelo y periodo estructural hacen que las calificaciones para cálculo del índice de vulnerabilidad, I_v , se encuentra en el umbral *desfavorable* y con un índice de daño que califica como *severo*.

Adicionalmente, la mampostería no confinada tiende a estar compuestas por elemento como la arcilla cocida (cerámicos) o concreto, los cuales presentan buen aporte mecánico bajo cargas de compresión, pero muy poca capacidad bajo consideraciones de tracción. Considerando únicamente cargas verticales, los elementos de mampostería no confinada, se pueden considerar, en función de las cargas, aptos para soportar mecanismos de compresión, sin embargo, al momento de cargas laterales, como sismos, la capacidad de los muros de mampostería es baja o tiende a ser despreciable. La aparición de fuerzas laterales, como los sismos,

genera flexión en los elementos de mampostería, y subsecuentemente zonas a compresión y zonas a tracción. Las zonas a compresión generalmente son soportadas por el sistema de mampostería, pero las zonas de tracción, tal como ya se ha mencionado, son susceptibles a daños ya que los materiales mecánicamente no aportan una capacidad relevante. La falta de capacidad a tracción, genera un proceso de agrietamiento, el cual posteriormente genera la falla del sistema. La falla por tracción mencionada corresponde a una falla frágil, la cual no da indicios de la misma, es decir que no presenta deformaciones o agrietamiento aparente para los usuarios, soportando la carga hasta el estado de rotura. Este tipo de sistemas estructurales no son recomendados individualmente, pero si se combinan con sistemas con refuerzo estructural, el cual sea apto para soportar tracción, se puede mejorar las falencias del sistema previo y generar un sistema compuesto entre los distintos materiales que puedan presentar una mejor respuesta para las condiciones de servicio. Estos aspectos del funcionamiento estructural de la mampostería sin confinamiento permiten establecer la congruencia entre los índices de daño calculados y el porcentaje de estructuras afectadas para el sector analizado de la comuna 2 de San José de Cúcuta.

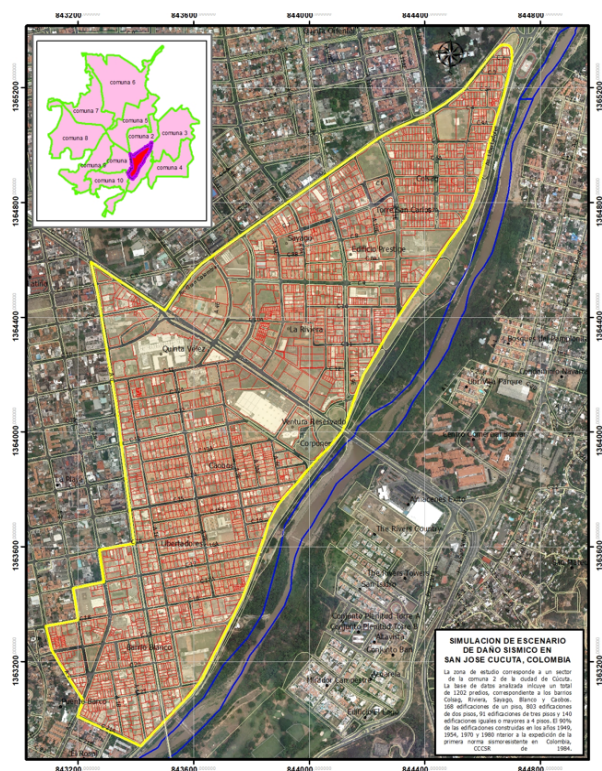


Figura 1. Localización y delimitación del área de estudio, comuna 2 Sector central, comuna 2 San José de Cúcuta, Colombia.

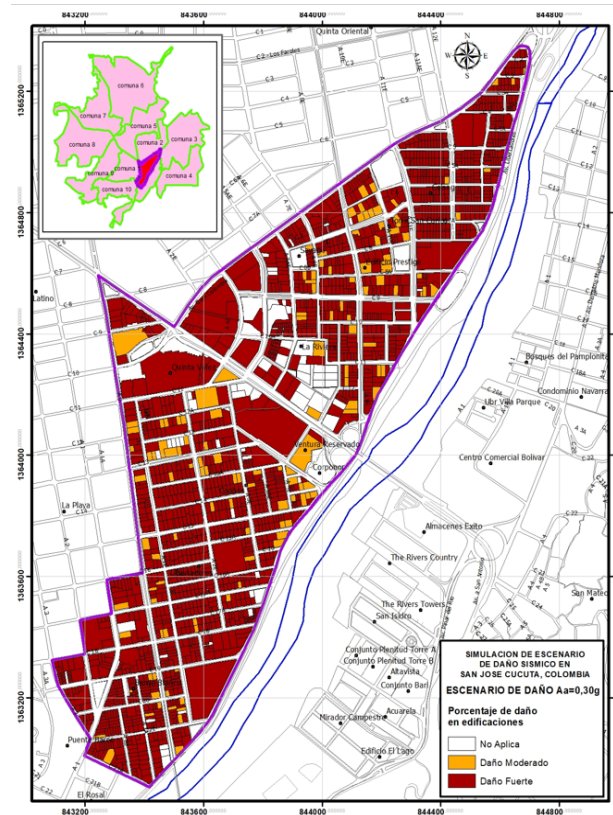


Figura 2. Escenario de daño, D (%) para escenario $A_a=0.30g$ Sector central, comuna 2 San José de Cúcuta, Colombia.

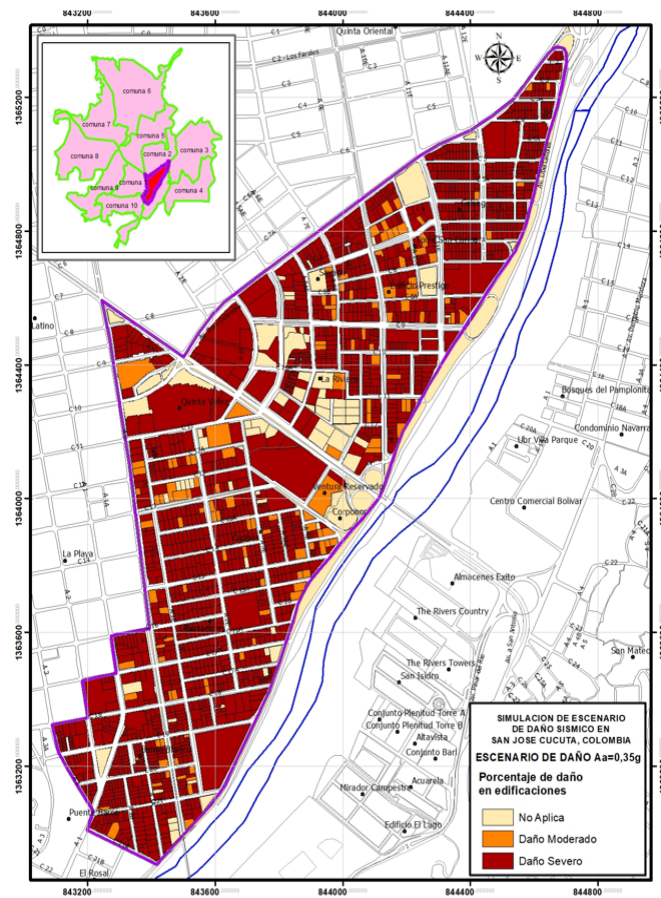


Figura 3. Escenario de daño, D (%) para escenario $A_a=0,35g$ Sector central, comuna 2 San José de Cúcuta, Colombia.

Conclusiones

Los resultados de los índices de daño, D (%) para los dos escenarios analizados, $A_a=0,30g$ y $A_a=0,35g$ muestran que las edificaciones entre uno y tres niveles correspondientes a estructuras de mampostería no confinada obtendrían daños severos. Para las edificaciones mayores o iguales a cuatro niveles, el índice de daño, D (%), se mantiene igual para los dos escenarios, es decir, el aumento de la aceleración horizontal máxima en roca (A_a) no estaría afectando el comportamiento de las estructuras aportricadas en concreto reforzado. Lo escénario crítico para las edificaciones de niveles bajos construidas en mampostería no confinada obedece, por un lado, a la edad de las edificaciones (entre 50 y 80 años) y, por otro lado, las condiciones probables del perfil de velocidad de onda cortante de la zona correspondiente al valle aluvial del río

Pamplonita con periodos de vibración del suelo muy cercano al periodo de vibración de las estructuras bajas, lo que podría configurar un fenómeno de resonancia. Se recomienda estudios que involucren el cálculo del índice de daño con efectos de sitio.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, Dirección de prevención y atención de emergencias, Centro de estudios sobre desastres y riesgos CEDERI, & Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Universidad de los Andes. (2005). *Escenarios de riesgo y pérdidas por terremoto para Bogotá D.C.*
- Anglade, E., Giatreli, A. M., Blyth, A., Di Napoli, B., Parisse, F., Namourah, Z., Rodrigues, H., & Ferreira, T. M. (2020). Seismic damage

- scenarios for the Historic City Center of Leiria, Portugal: Analysis of the impact of different seismic retrofitting strategies on emergency planning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 44, 101432. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2019.101432>
- Barbat, A. H., Moya, F. Y., & Canas, J. A. (1996). Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones. *Earthquake Spectra*, 12(3), 371–394. <https://doi.org/10.1193/1.1585889>
- Benedetti, D., & Vincenzo Petrini. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: un metodo di valutazione. A method for evaluating the seismic vulnerability of masonry buildings. *L'industria Delle Costruzioni*, 149, 66–74.
- Benjamín Hernández, J. D., & Lockhart Castro, S. A. (2011). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de hormigón armado existente. *Ciencia y Sociedad*, XXXVI(2), 256–275. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87019757004>
- Carlos Vielma, J., Barbat, A. H., & Oller, S. (2008). Un índice de daño sísmico objetivo para la evaluación de los edificios de hormigón armado. *Hormigón y Acero*, 59(248), 53–64.
- Chieffo, N., Mosoarca, M., Formisano, A., & Apostol, I. (2019). Seismic Vulnerability Assessment and Loss Estimation of an Urban District of Timisoara. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471(10), 102070. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/10/102070>
- Feliciano, D., Arroyo, O., Cabrera, T., Contreras, D., Valcárcel Torres, J. A., & Gómez Zapata, J. C. (2023). Seismic risk scenarios for the residential buildings in the Sabana Centro province in Colombia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(5), 1863–1890. <https://doi.org/10.5194/NHESS-23-1863-2023>
- CNR. (1993). *Determinazione del rischio sismico a fini urbanistici in Lombardia, Comune di Toscolano Maderno (BS)*.
- Florez, C. H., Marquez, J. F., & Lozano, C. F. (2020). A proposal for updating the Response Spectrum of San Jose de Cucuta, Colombia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 844(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/844/1/012018>
- Floréz-Góngora, C. H., Pedroza-Rojas, A. O., & Niebles-S., C. A. (2020). Análisis de vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificaciones de un sector de la comuna 2 de la ciudad de San José de Cúcuta, Colombia utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). *7th International Week of Science, Technology and Innovation*.
- Flórez-Góngora, C. H., Sereno-Vargas, B. S., & Lozano-Lozano, C. F. (2022). Probabilistic Seismic Hazard Analysis of San José de Cúcuta, Colombia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1253(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1253/1/012012>
- Lantada, N., Pujades, L. G., & Barbat, A. H. (2018). Earthquake Risk Scenarios in Urban Areas: A Review with Applications to the Ciutat Vella District in Barcelona, Spain. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(7–8), 1112–1130. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1503367>
- Lozano, C. F., Sánchez, J. J., & Bermudez, M. L. (2013). Uso de registros de microtemblores para la determinación de modelos de velocidad de ondas de corte y respuesta dinámica del suelo en la ciudad de Cúcuta. *XIV Congreso Colombiano*

de Geología.

Maldonado Rondón, E., & Chio Cho, G. (2008). *Vulnerabilidad sísmica en centros urbanos*. Ediciones Universidad Industrial de Santander.

Nieto Estévez, M. L. (2018). *Valoración de la gestión social del espacio público en transformaciones urbanas del suelo formal de Cúcuta Línea hábitat, ambiente y territorio* [Corporación Universidad Piloto de Colombia]. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/10010>

Pessina, V., Meroni, F., Azzaro, R., & D'Amico, S. (2021). Applying Simulated Seismic Damage Scenarios in the Volcanic Region of Mount Etna (Sicily): A Case-Study From the MW 4.9, 2018 Earthquake. *Frontiers in Earth Science*, 9, 629184. <https://doi.org/10.3389/FEART.2021.629184/BIBTEX>

Senouci, A., Yves Bard, P., Beck, E., Naboussi Farsi, M., & Cartier, S. (2018). Mapping seismic vulnerability at urban scale: Discussion on relevant cartography representations and smoothing for urban planning purposes on the Oran case study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 545–563. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.034>

Villar-Vega, M., Silva, V., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., Hube, M. A., Gustavo, C. D., & María, H. S. (2017). Development of a fragility model for the residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2), 581–604. <https://doi.org/10.1193/010716EQS005M>

Yepes-Estrada, C., Calderón, A., Acevedo, A., & Pérez, H. (2022). *Evaluación del riesgo sísmico para Santiago de Cali*.