PÉRDIDAS POR SISMO ESTIMADAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO COMO BASE PARA LA GESTIÓN FINANCIERA DEL RIESGO E INCREMENTAR SU RESILIENCIA

Eduardo Reinoso Angulo[(1)], José Giovanni Cruz Vargas[(2,)] y Pablo David Quinde Martínez[(3)]*

RESUMEN

La estimación de pérdidas económicas por sismo es una herramienta fundamental para la gestión financiera del riesgo y la planificación de ciudades resilientes. En este trabajo se evalúa el riesgo sísmico de los edificios de la Ciudad de México mediante el análisis probabilista de pérdidas económicas. Para ello se emplea una base de datos de más de un millón de edificios derivada del catastro urbano, complementada con inspecciones de campo y revisiones digitales que permitieron identificar características estructurales, número de niveles, año de construcción y patologías que afectan su desempeño sísmico. Con esta información se estiman escenarios de pérdidas asociados a sismos históricos, como el evento del 19 de septiembre de 2017, y a diferentes escenarios obtenidos mediante desagregación del peligro sísmico. Los resultados muestran, como se ha observado en las décadas recientes, que en la zona de lomas las pérdidas estimadas son bajas, mientras que en la zona de lago las pérdidas son considerablemente mayores, particularmente en edificaciones de mediana altura. Entre los escenarios analizados, el que presenta el mayor número de edificios con pérdidas altas corresponde a un evento sísmico con características similares al sismo de 1985. Los escenarios analizados permiten identificar edificios con mayor vulnerabilidad, proporcionando información útil para orientar estrategias de mitigación, reforzamiento estructural y planificación de la respuesta ante futuros eventos sísmicos.

Palabras clave: Resiliencia sísmica urbana, estimación de pérdidas económicas, riesgo sísmico, Ciudad de México

ISSN-e 2395-8251

EXPECTED EARTHQUAKE LOSSES FOR MEXICO CITY AS AN INPUT FOR THE FINANCIAL ASSESSMENT AND RESILIENCE

ABSTRACT

The estimation of earthquake-induced economic losses is a fundamental tool for financial risk management and the planning of resilient cities. This study evaluates the seismic risk of buildings in Mexico City through a probabilistic analysis of economic losses. For this purpose, a database of more than one million buildings derived from the land tax city database is used, complemented with field

Artículo recibido el 01 de julio de 2025 y aprobado para su publicación el 21 de 09 de 2026. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

(1) Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F. EReinosoA@iingen.unam.mx

(2,*) Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F. JCruzV@iingen.unam.mx. **Autor para correspondencia**.

(3) Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F. PQuindeM@iingen.unam.mx

inspections and digital surveys that allowed the identification of structural characteristics, number of stories, year of construction, and pathologies that affect seismic performance. Using this information, loss scenarios associated with historical earthquakes, such as the September 19, 2017 event, and scenarios obtained through seismic hazard disaggregation are estimated. The results show that in the hill zone, as observed during recent earthquakes, the estimated losses are low, whereas in the lakebed zone the losses are considerably higher, particularly for mid-rise buildings. Among the analyzed scenarios, the one with the largest number of buildings with high losses corresponds to a seismic event with characteristics similar to the 1985 earthquake. The analyzed scenarios allow the identification of buildings with greater vulnerability, providing useful information to guide mitigation strategies, structural retrofitting, and response planning for future seismic events.

Keywords: Urban seismic resilience, economic loss estimation, seismic risk, Mexico City

INTRODUCCIÓN

La estimación oportuna de pérdidas económicas debido a eventos naturales es una herramienta necesaria para los encargados de tomar decisiones en la gestión financiera de riesgos. En los últimos años, diversas entidades y gobiernos han visto la necesidad de mejorar y aumentar la información relacionada con los riesgos naturales, con el fin de desarrollar medidas de gestión financiera y mitigación de riesgos para tener ciudades resilientes. Diversos estudios han abordado la estimación de pérdidas sísmicas y el análisis del riesgo urbano utilizando información catastral y modelos de vulnerabilidad estructural, particularmente para el caso de la Ciudad de México (Ordaz et al., 1994; Ordaz et al., 2017).

ISSN-e 2395-8251

La Ciudad de México ha experimentado daños significativos debido a diversos eventos sísmicos a lo largo de su historia, recientemente, destacan los sismos de 1957, 1979, 1985 y 2017. Estos eventos han evidenciado el riesgo, particularmente en las zonas asentadas sobre el antiguo lecho lacustre. Estos sismos corresponden principalmente a eventos de subducción o intraplaca de mediana y gran magnitud, cuyos efectos se ven amplificados por las condiciones locales del suelo (Singh et al., 1988; Reinoso and Ordaz., 1999).

En este trabajo, se utiliza una base de datos de más de un millón de edificios identificando su sistema estructural, número de pisos y año de construcción, y en algunos casos también las condiciones estructurales que agravan el desempeño sísmico y aumentan la probabilidad de daño (patologías), tales como: planta baja débil, efecto de esquina, irregularidad en planta, entre otros. Estas características son relativamente fáciles de identificar para un ingeniero estructural al momento de inspeccionar un edificio, aunque el tamaño de la base de datos hace que esta tarea sea impráctica sin la ayuda herramientas tecnológicas, como el aprendizaje automático de computadores, empleada en este trabajo. El objetivo es disminuir las incertidumbres en la información de los edificios para desarrollar un análisis confiable en la estimación del desempeño estructural de los edificios, probabilidad de daño y porcentaje de pérdidas.

Para estimar pérdidas económicas por sismo, se deben utilizar modelos de vulnerabilidad estructural, que nos permitan obtener las pérdidas esperadas y con base en ellas proponer algunas medidas de gestión de riesgo.

DAÑOS DURANTE SISMOS RECIENTES EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Históricamente, la CDMX ha sido afectada por grandes sismos, los primeros registros se remontan a la ocupación azteca del Valle de México y a la fundación de la Ciudad de México durante el Virreinato de

la Nueva España, de acuerdo con García y Suárez (1996). Sin embargo, es a partir del sismo de julio de 1957 (conocido popularmente como el sismo del Ángel), cuando inicia el estudio a detalle de la vulnerabilidad sísmica de estructuras modernas. Además del evento de 1957, los sismos ocurridos en marzo de 1979 (sismo de la Ibero), septiembre de 1985 y septiembre de 2017, se consideran en este trabajo debido a las afectaciones y repercusiones que tuvieron en la infraestructura urbana y en la economía. Estos eventos están ampliamente documentados, lo que permite conocer las características y propiedades de las estructuras dañadas. El estudio estadístico de los efectos de los sismos (daños a edificaciones, pérdidas económicas, pérdidas humanas, entre otros) es útil para identificar, en primera instancia, las estructuras y sus daños esperados ante futuros eventos, los sistemas estructurales y los rangos de altura más afectados, así como información técnica para su estudio ingenieril: el periodo de vibración del suelo y de las estructuras dañadas, las aceleraciones de diseño, entre otros parámetros. Para los datos mostrados en este trabajo, no se han considerado los daños observados durante el sismo del 2017 asociados a agravantes del comportamiento del suelo como subsidencia y agrietamiento causados por la extracción de agua, y solo se incluyen aquellos causados por las ondas sísmicas y el comportamiento dinámico del suelo y de la estructura.

La Figura 1 muestra el porcentaje por alcaldía del total de estructuras con daños graves y colapsadas para cada sismo. Se observa que la alcaldía Cuauhtémoc es la que más porcentaje de estructuras dañadas tiene, lo que es un reflejo de que allí se concentran una gran parte de los edificios; también se observa que a medida que la ciudad ha crecido, se presentan más daños en otras alcaldías. Lo mostrado en la Figura 1 es un reflejo de la complejidad de la respuesta sísmica en el valle de México puesto que involucra el tipo de ondas incidentes de diversas fuentes sísmicas, la enorme variabilidad de la respuesta del suelo y el crecimiento de la ciudad, por lo que no se pueden extrapolar ni usarlas para predecir lo que puede pasar en sismos futuros. Por otro lado, algunos de los edificios en las alcaldías más afectadas en sismos anteriores han sido también objeto de intervenciones estructurales y reconstrucciones, lo que podría haber modificado positivamente su vulnerabilidad original, pero también, para muchos edificios, la falta de mantenimiento y adecuada reparación de daños puede haber aumentado la vulnerabilidad original, y por lo tanto, el riesgo. Desafortunadamente, no se tiene certeza de que las rehabilitaciones efectuadas hayan sido adecuadas, como se demostró en 1985 con los edificios que fueron rehabilitados por los daños de sismos previos. Las colonias Buenavista, Centro, Condesa, Cuauhtémoc, Doctores, Guerrero, Hipódromo, Hipódromo Condesa, Juárez, Morelos, Nonoalco-Tlatelolco, Obrera, Roma Norte, Roma Sur y San Rafael, dentro de la alcaldía Cuauhtémoc, han sido las más afectadas. La alcaldía Benito Juárez es la segunda alcaldía más afectada, la mayor parte de los daños se han concentrado en las colonias Del Valle, Del Valle Centro, Del Valle Sur, Independencia, Narvarte Poniente, Narvarte Oriente, Piedad Narvarte, Tlacoquemécatl y Vértiz Narvarte, principalmente. En las alcaldías de Iztapalapa y Venustiano Carranza los daños no presentan un patrón de distribución especifico, sino que se encuentran distribuidos heterogéneamente en estas demarcaciones. En Coyoacán, las colonias más afectadas han sido las que se encuentran al oriente de la calzada de Tlalpan. Finalmente, en el sismo de septiembre de 2017, la porción noreste de la alcaldía Tlalpan presentó daños importantes. Es posible concluir, con base a los antecedentes históricos, que después de la ocurrencia de un sismo importante de subducción o falla normal, estas alcaldías sean las más afectadas, por lo que es prioritario hacer evaluaciones estructurales de los edificios más vulnerables y llevar a cabo planes de refuerzo o reconstrucción. Cabe destacar que, durante el sismo de 2017, alcaldías como Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco presentaron una proporción importante de edificios con daños graves y colapsos, lo que evidencia que la vulnerabilidad sísmica de la ciudad no se limita a las alcaldías históricamente más afectadas y resalta la necesidad de ampliar las evaluaciones de vulnerabilidad, así como las estrategias de mitigación, hacia estas zonas de la ciudad. Suárez y Jaimes (2022) publicaron que podrían esperarse daños en estas alcaldías para sismos corticales cercanos.

ISSN-e 2395-8251

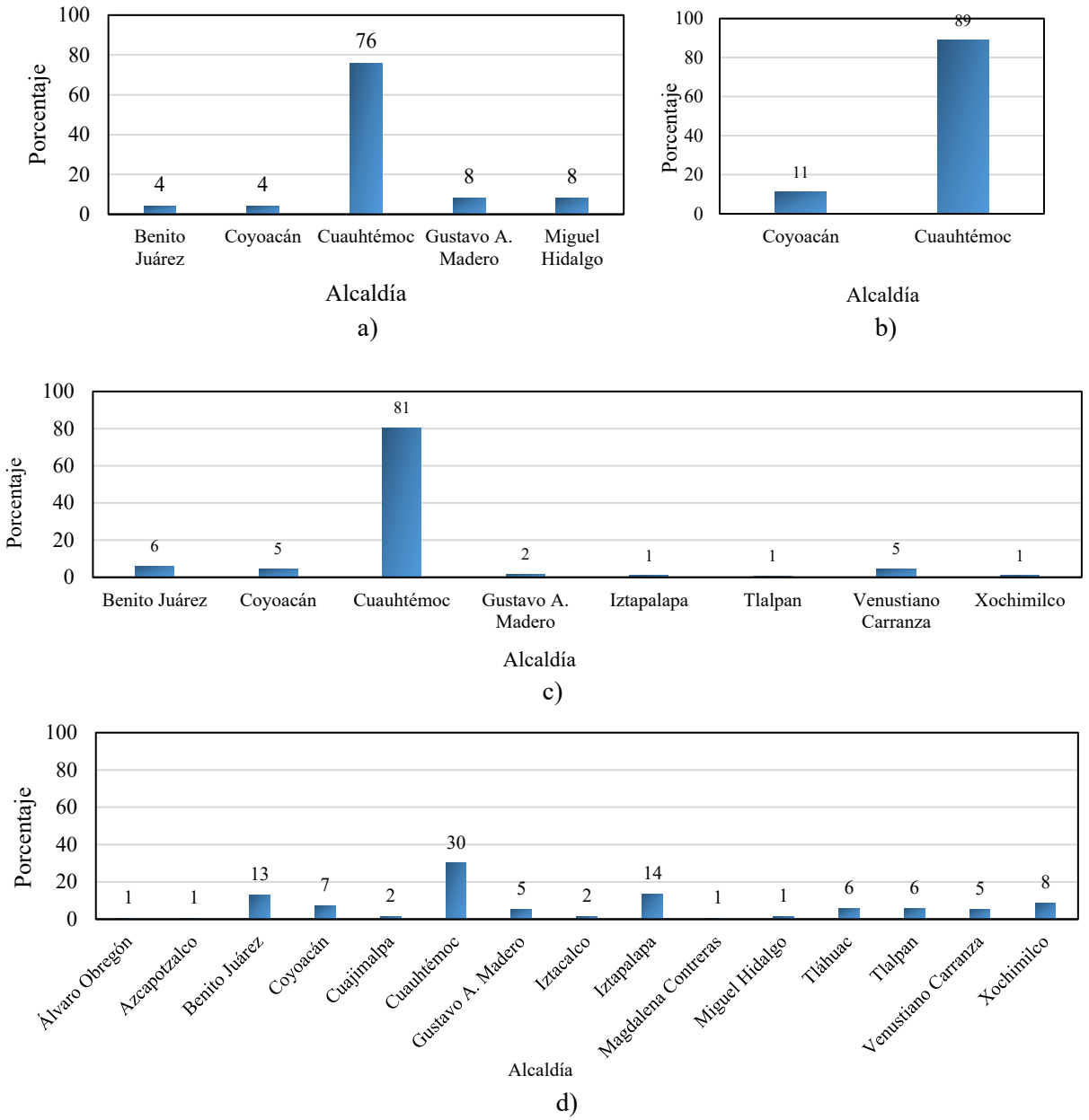


Figura 1. Porcentaje de estructuras gravemente dañadas y colapsadas por alcaldía para cada sismo: (a) 1957, (b) 1979, (c) 1985 y (d) 2017

En cuanto a la edad de las estructuras con daños graves o totales, la mayor parte de estas fueron construidas entre las décadas de 1950 y 1980. Esto se explica principalmente porque a partir de 1950 muchas estructuras comenzaron a construirse con sistemas estructurales modernos para la época, como losas planas que no dependían de muros de mampostería, y fueron diseñadas bajo demandas sísmicas muy pobres. Con la experiencia adquirida del sismo de 1985, el Reglamento de Construcción tuvo modificaciones considerables, lo que resultó en una mejoría en la calidad de las construcciones y es de esperarse que la vulnerabilidad general de las construcciones sea mucho menor.

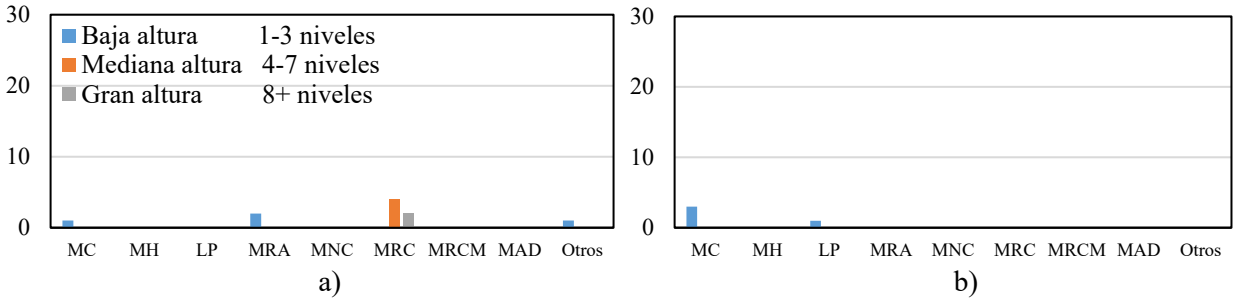
ISSN-e 2395-8251

Para los sismos analizados (1957, 1979, 1985 y 2017), de manera proporcional a lo mostrado en la Figura 1, el 38.19% de los daños corresponde a grietas en acabados y elementos no estructurales, seguido de grietas pequeñas en muros, trabes y columnas con un 25.16% y grietas grandes en muros, trabes y columnas con 18.05%. Estos tres suman poco más del 80% de los daños. Únicamente el 5.53% corresponde a colapsos parciales o totales.

La Figura 2 muestra el número de estructuras con colapso total o parcial para cada sismo en función del intervalo de alturas: baja (1 a 3 niveles), mediana (4 a 7 niveles) y gran altura (8+ niveles). Para el sismo de 1957 se registraron 8 colapsos y no predomina ninguna altura, de los 3 colapsos totales, dos eran estructuras de marcos de concreto de 4 y 5 niveles, la otra era una casa en proceso de construcción (Orozco y Reinoso, 2007). Las edificaciones bajas y medianas concentraban la mayor parte de los daños debido a que había muy pocas construcciones altas, prácticamente toda la ciudad estaba formada por construcciones de 1 y 2 niveles, por lo que el porcentaje de daño en estas estructuras bajas es también muy bajo, no así el de mediana altura, de las que había muchas menos en la ciudad. En el sismo de 1979 solo colapsaron dos casas viejas y los edificios de la Universidad Iberoamericana, que eran de 3 pisos de marcos de concreto, muy distintos a cómo se construye la vivienda en México. El sismo de 1985 presenta una concentración significativamente mayor de colapsos en edificaciones de mediana y gran altura, que eran mucho menos numerosas que las estructuras bajas. Finalmente, en el sismo de 2017, los colapsos se concentran nuevamente en edificaciones de mediana altura. Si bien también se registran algunos colapsos en edificaciones de baja altura, en estos casos el daño no se atribuye exclusivamente a la intensidad o vulnerabilidad sísmica del edificio, sino a factores como fallas del suelo (subsidencia o pérdida de capacidad de carga), o al golpeteo de edificaciones adyacentes sobre estas estructuras o por alteraciones estructurales posteriores a la construcción que modificaron significativamente la vulnerabilidad estructural. Los edificios de baja altura (2-3 pisos) colapsados, su sistema estructural y la causa de colapso se muestran en la Tabla 1.

ISSN-e 2395-8251

Una de las características que definen el comportamiento sísmico de una estructura y por ende el nivel de daño que puede sufrir es el tipo constructivo. En la CDMX los principales sistemas estructurales son: mampostería confinada (MC), mampostería histórica (MH), columnas y losas planas (LP), marcos rígidos de acero (MRA), mampostería no confinada (MNC), marcos rígidos de concreto (MRC), marcos rígidos de concreto con mampostería (MRCM) y mampostería con adobe (MAD). El comportamiento de estos sistemas estructurales varía también en función de la altura del edificio, de esta manera, en las estructuras no mayores a tres pisos, la mampostería confinada ha sido el más vulnerable (Figura 2). Mientras que, para edificios con cuatro a siete pisos, marcos de concreto con mampostería, mampostería confinada, columnas y losa plana y marcos de concreto son los más vulnerables. Finalmente, en edificios con más de siete pisos, los más afectados son los de marcos de concreto y los de marcos de concreto con mampostería.



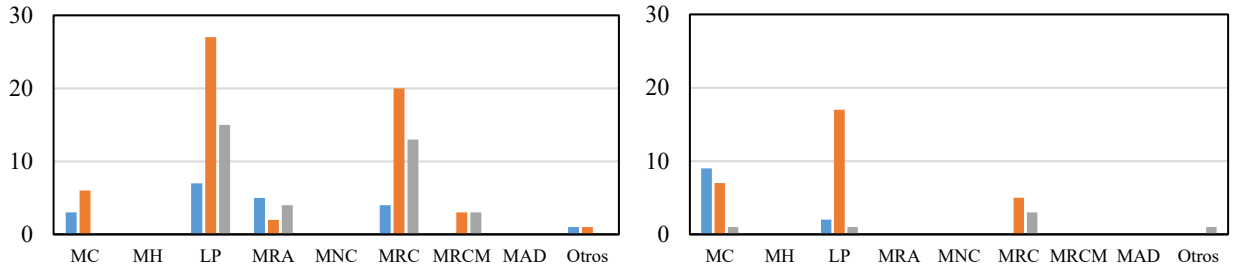


Figura 2. Número de estructuras dañadas por sistema estructural en función de tres intervalos de altura para los siguientes sismos: (a) 1957, (b) 1979, (c) 1985 y (d) 2017

Tabla 1. Edificios de baja altura colapsados en el sismo del 19S2017

Edificio	No. Pisos	Sistema estructural*	Causa del colapso
Avenida 323 # 655, Gustavo A. Madero	2	MC	Pérdida de capacidad de carga del suelo
Puebla 280, Roma Norte, Cuauhtémoc	2	MC	Colapso provocado por edificio adyacente
Bretaña 92, Zacahuitzco, Benito Juárez	2	MC	Colapso provocado por edificio adyacente
Saratoga 720, Benito Juárez	2	MC	Colapso provocado por edificio adyacente
Escocia 33, Coyoacán.	2	MC	Colapso provocado por edificio adyacente
Av, Santa Ana 10, Coyoacán.	3	MC	Graves alteraciones estructurales
Canal de Miramontes 2747, Coyoacán.	3	MC	Graves alteraciones estructurales
Calzada del Hueso 480	2	LP	Colapso provocado por edificio adyacente
Av. Hermenegildo Galeana 407, Xoch.	3	LP	Planta baja débil

* MC, Mampostería confinada, LP, Columnas y losas planas

ISSN-e 2395-8251

Al analizar exclusivamente los colapsos, las edificaciones de mediana altura han mostrado mayor vulnerabilidad. En la Figura 3, se muestran los porcentajes de edificios colapsados agrupados por intervalos de altura para los sismos de 1985 y 2017. Estas construcciones se localizan principalmente en la zona del lago de las alcaldías Cuauhtémoc y Benito Juárez, donde se presentan las intensidades espectrales máximas, las cuales están asociadas al comportamiento dinámico del suelo que amplifica en movimiento en los periodos de vibración del edificio.

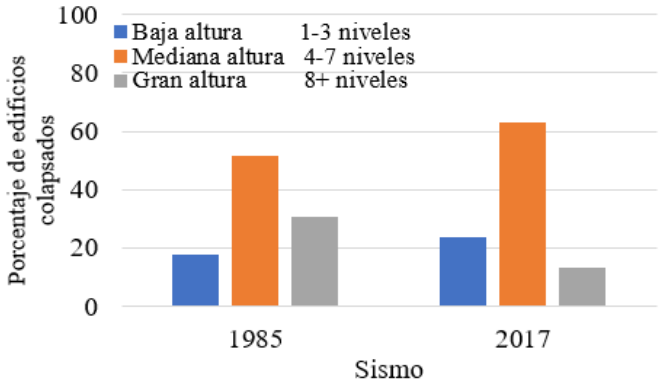


Figura 3. Porcentaje de edificios colapsados en cada sismo (1985 y 2017) agrupados en función de intervalos de altura

BASE DE DATOS DE EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

A partir de la versión 2010 del catastro de la CDMX, proporcionado por la Secretaría de Protección Civil de la CDMX al Instituto de Ingeniería de la UNAM que contiene el inventario geográfico de la infraestructura urbana, se ha estimado el riesgo sísmico de la ciudad, como se muestra en este trabajo. Con este catastro se ha creado una base de datos con más de 1,000,000 de registros correspondientes a la geometría de los lotes en los que está dividida el trazo urbano de las 16 alcaldías. El análisis conjunto de esta base, la amenaza sísmica y los daños históricos producidos por los sismos de 1957, 1979, 1985 y 2017 permitirá ubicar los edificios vulnerables para su eventual estudio y atención.

Información catastral

De acuerdo con el catastro, en la zona de lago (la de mayor riesgo), el número de edificios es de más de 700,000, lo que corresponde al 61% del total de construcciones, mientras que en la zona de lomas se asientan alrededor de 430,000 edificios (39% del total de construcciones). Por otro lado, la superficie construida que corresponde a la zonificación anterior es de aproximadamente 252 millones de metros cuadros (67%) para la zona de lago y 123 millones (33%) para zona de lomas. En la zona de lago la mayor superficie construida se encuentra en las construcciones menores a 5 pisos, las cuales suman un total de 207 millones de m² que representan el 82% de la superficie construida. El 18% restante, equivalente a 44 millones de m², se encuentra distribuido entre construcciones de 6 hasta más de 21 pisos.

Para la zona de lomas, 97 millones de m² de superficie construida corresponde a edificios de menos de 5 pisos, que representan el 80% del total de superficie; el 20% restante de la superficie corresponde a edificios de 6 a 21 pisos. Las estructuras mayores a 16 pisos se encuentran mayormente localizadas en esta zona debido en parte al menor riesgo sísmico en suelo firme, a partir del conocimiento adquirido de los daños ocasionados por sismos históricos, sobre todo el de 1985, en edificios en zona de lago.

Si bien, las estructuras de baja altura están asociadas a procesos de autoconstrucción y difícilmente son supervisadas por DRO y CSE, sus estándares de diseño y construcción pudieran ser menos estrictos en comparación con edificaciones de mayor altura, una suposición aún no demostrada ni comprobada. Sin embargo, estas estructuras tienen en general una gran densidad de muros lo que les da una mayor sobre-resistencia. La evidencia empírica observada en los principales sismos que han afectado a la ciudad no muestra un número significativo de colapsos en este tipo de edificaciones (Figura 3).

ISSN-e 2395-8251

A partir de estos datos y de los datos mostrados en la Figura 3 para el sismo del 2017, reorganizándolos en los mismos intervalos de edificios que tiene el catastro, la Tabla 2 muestra el porcentaje y la tasa de edificios colapsados durante este sismo por edificios existentes; es claro que, para este sismo, hay una enorme diferencia del riesgo observado entre las edificaciones de mediana altura y las de baja altura.

Tabla 2. Porcentaje y tasa de colapso de edificios según intervalo de número de niveles del catastro

Intervalo de niveles	Porcentaje de colapsos por edificios existentes	Tasa de colapsos por cada 10,000 edificios
1-2	0.0007	7
3-5	0.1414	1414
6-10	0.1257	1257

Si bien no se cuenta con un número aproximado de estructuras existentes durante los sismos previos a 2017, es de esperarse que la proporción haya sido similar a lo que muestra la base de datos del 2010, por lo que los porcentajes y tasas mostrados en la Tabla 2 deben ser similares para los sismos de 1957, 1979 y 1985. Algunos estudios recientes (Suárez y Jaimes, 2022; Jaimes y Suárez, 2025) han señalado que las estructuras de menor altura, particularmente aquellas de uno o dos niveles, podrían eventualmente presentar afectaciones relevantes bajo sismos corticales de gran magnitud.

Datos obtenidos por medios digitales

La base de datos del catastro tiene información útil pero limitada para estimar la vulnerabilidad de las estructuras, por lo que se han hecho visitas en algunas zonas para recabar más información de los edificios. Estos esfuerzos se han concentrado en zonas escogidas arbitrariamente, pero que estuvieran donde ha habido daños y en donde fuera seguro hacer inspecciones de banqueta, actualizando las características físicas. Además, se ha ampliado la información a partir de inspecciones virtuales mediante la herramienta Street View® de Google Earth® en donde la información es disponible. Algunas de las características estructurales que se actualizaron fueron las del sistema estructural, número de pisos construidos y patologías (ubicación en esquina, planta baja débil, irregularidad en planta y elevación, ubicación en cuña, columna corta, cambio de rigidez en elevación y apéndices), que son determinantes para estimar el comportamiento y la vulnerabilidad sísmica. También, se actualizaron los parámetros urbanos como identificación de manzanas, superposición de lotes de catastro, identificación de límites de lotes y cuentas catastrales (Figura 4).

ISSN-e 2395-8251

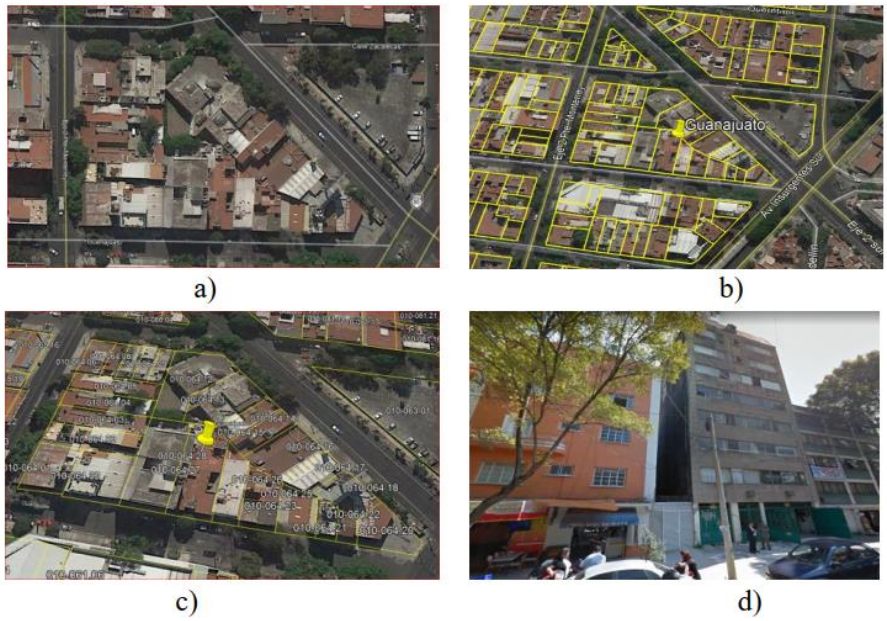


Figura 4. Verificación y actualización de parámetros urbanos de la base de datos: a) identificación de manzanas, b) superposición de lotes de catastro, c) identificación de límites de lotes y cuentas catastrales, d) ejemplo de una imagen de un edificio obtenida con inspecciones virtuales.

ISSN-e 2395-8251

En una primera etapa de inspección de banqueta, se establecieron las seis zonas mostradas en la Figura 5, manteniendo por cada zona una uniformidad de distribución espacial que considerará todos los eventos, la mayor diversidad posible de sistemas estructurales y las áreas comprendidas entre los periodos naturales de vibración de suelo de 0.5 a 3 segundos, donde históricamente se han presentado los principales daños. A continuación, se enlistan las seis zonas estudiadas:

Zona 1: colonias Condesa, Roma Norte, Juárez y Centro (porción norte) en la alcaldía Cuauhtémoc. En esta zona se concentra la mayor parte de los daños registrados para la totalidad de los cuatro eventos sísmicos considerados, entre los cuales se encontraban el hotel Regis (Av. Juárez) y el edificio conocido como Superleche (Av. Eje Central), ambos colapsados en septiembre de 1985 y los edificios dañados o colapsados en el sismo de septiembre de 2017, como el edificio de Álvaro Obregón 286.

Zona 2: colonias Centro (porción sur), Esperanza, Obrera, Tránsito, Vista Alegre, Paulino Navarro en la alcaldía Cuauhtémoc. Esta zona fue fuertemente afectada en el sismo de septiembre de 2017, donde colapsaron la fábrica y almacén de textiles en la calle de Bolívar 168 y el edificio de oficinas de Gobierno, Bomberos y Trabajo en San Antonio Abad 122.

Zona 3: colonias Churubusco Tepeyac, Lindavista, Magdalena de las Salinas, Revolución IMSS y Tlacamaca en la alcaldía Gustavo A. Madero. Esta zona también fue afectada significativamente durante el sismo de septiembre de 2017, por ejemplo, en el Hospital de Gineco Obstetricia del IMSS se reportó daño intermedio, y colapso en Coquimbo 911.

Zona 4: colonias Del Valle, Narvarte Poniente, Narvarte Oriente, Niños Héroes de Chapultepec, Unidad Habitacional IMSS Narvarte y Postal en la alcaldía Benito Juárez. El sismo de septiembre de 1985 provocó daños totales al edificio de la SCT, mientras que el sismo de 2017 los de Escocia 4, Edimburgo 4 y Galicia 173.

Zona 5: colonias Atlántida, Barrio La Concepción, Barrio San Lucas, Centinela, Ciudad Jardín, Multifamiliar Tlalpan, porciones de Narvarte Oriente y Poniente, Pacífico, Parque San Andrés Rosedal en la alcaldía Coyoacán. En septiembre de 1985 colapsó el Hotel Finisterre (Ave. Tlalpan), mientras que en el sismo de 2017 se registraron colapsos en Escocia 29 y 33 y el Multifamiliar Tlalpan (Av. Tlalpan).

Zona 6: comprende las colonias Los Girasoles II y III, Jardines de Villa Coapa, Nueva Oriental Coapa, Vergel Coapa, Residencial Miramontes, Villa Coapa y Condominio Tres Fuentes en las alcaldías de Coyoacán y Tlalpan. En esta zona se presentaron daños importantes en el sismo de 2017, entre ellos el colapso del Colegio Rébsamen y en Rancho de los Arcos 32.

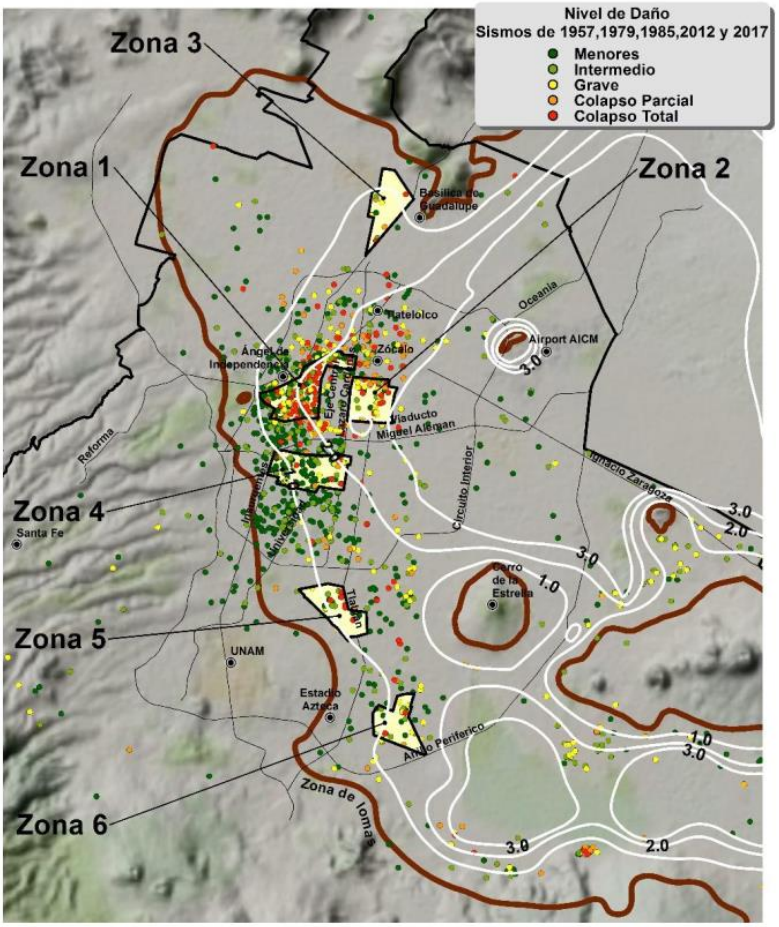


Figura 5. Zonas inspeccionadas para recabar datos en sitio para la integración de la base de datos de edificaciones.

Se recabó información en sitio de 7700 estructuras en las seis áreas seleccionadas. En la Zona 1 fueron 2,200 inspecciones, mientras que en las otras cinco zonas fueron 1100 por cada una. En la Zona 1, el número de inspecciones fue mayor porque comprende las colonias más afectadas por los eventos sísmicos de 1957, 1979 1985 y 2017.

ISSN-e 2395-8251

ESCENARIOS SÍSMICOS QUE PODRÍAN CAUSAR PÉRDIDAS SIGNIFICATIVAS EN EL FUTURO

En esta sección se analizan los eventos sísmicos que podrían generar pérdidas significativas en la Ciudad de México en el futuro. Para ello, se estudia el riesgo sísmico con el objetivo de identificar los escenarios sísmicos más desfavorables en términos de daños estructurales y pérdidas económicas, lo que permite fortalecer los planes de respuesta ante un evento sísmico importante y desarrollar medidas de prevención que contribuyan a incrementar la resiliencia de la ciudad. La identificación de estos escenarios permite desarrollar con anticipación estrategias de mitigación y planes de emergencia post-sísmica que incluyan: a) la definición de los escenarios sísmicos más desfavorables para la ciudad y su posible impacto; b) la delimitación de las zonas de mayor riesgo en términos de pérdidas económicas ante distintos escenarios sísmicos; c) campañas de reforzamiento estructural para mejorar el desempeño sismorresistente de los edificios existentes; y d) la planificación de acciones de respuesta y apoyo para las zonas potencialmente afectadas.

El peligro sísmico en la Ciudad de México está dominado por la ocurrencia de varios tipos de sismos que generan distintos tipos de ondas que se ven enormemente amplificadas por los efectos de sitio (Reinoso y Ordaz, 1999). Por lo tanto, no existe un único evento sísmico representativo que permita estimar los daños estructurales y las pérdidas económicas. En este trabajo se analizan distintos escenarios sísmicos y sus consecuencias sobre las edificaciones de la ciudad, algunos asociados a un periodo de retorno, otros a los que arrojan grandes pérdidas y también a escenarios sísmicos históricos. Este análisis permite identificar los eventos sísmicos con mayor potencial de generar escenarios de pérdidas significativas y proporciona un panorama general del riesgo sísmico en la Ciudad de México, a partir del cual es posible proponer medidas de protección y mitigación.

ISSN-e 2395-8251

Modelación de la pérdida esperada

El análisis probabilista del riesgo sísmico tiene como objetivo fundamental determinar las pérdidas que pueden sufrir los bienes expuestos, en lapsos de tiempo dados, integrando las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. En general, el procedimiento de cálculo probabilista consiste en evaluar las pérdidas de los edificios de la cartera para cada uno de los eventos, considerando su frecuencia, que ocurrirán en todas y cada una de las fuentes sísmicas (Ordaz *et al.*, 2000).

La pérdida esperada es una cantidad incierta que debe ser tratada como variable aleatoria. Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida p, dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

$$(P > p|Evento_i) = \int_I P_r(P > p|I) f(I|Evento) dI \quad (1)$$

El primer término del integrando, $P_r\ (P > p|I)$, es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor p dado que la intensidad local fue I; este término toma en cuenta la incertidumbre que hay en las relaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término $f(I|Evento)$ es la densidad de probabilidades de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento; este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

ESCENARIOS DE PÉRDIDAS PARA LA CDMX

Escenario histórico: sismo del 19S2017

A partir de un análisis probabilista de riesgo sísmico de la base de datos corregida y actualizada de la CDMX se obtuvieron las pérdidas esperadas en las estructuras de la CDMX como si el sismo del 19 de septiembre de 2017 volviera a ocurrir. Estas pérdidas fueron estimadas utilizando un software basado en Ordaz *et al*. (2000), la cual integra modelos de amenaza sísmica, exposición y vulnerabilidad estructural. Los resultados se muestran en la Figura 6. Como se ha observado históricamente, en la zona de lomas las pérdidas esperadas son muy bajas, menores a 2%, lo que se considera como de bajo riesgo sísmico. En la zona de lago, las estructuras de 1 y 2 niveles de algunas zonas del centro y sur presentan pérdidas estimadas máximas del orden de 10%. Para edificios de 3 a 5 niveles, las pérdidas se incrementan a alrededor de 10%, con máximos de hasta 20% para algunas zonas del poniente, centro, oriente y sur de la CDMX. Para edificios de 6 a 10 niveles, los daños se concentran principalmente en la zona centro y centro-sur de la ciudad. En esta área se observa pérdidas promedio cercanas a 20%, lo que en términos prácticos podría representar daños considerables. Las pérdidas esperadas disminuyen para edificios de 11 y hasta 20 niveles, y están alrededor del 5%, con eventuales máximos de 20% en una baja cantidad de edificios. Si bien es claro que el sismo del 19S2017 no volverá a ocurrir, el escenario de la Figura 6 alerta sobre lo que puede pasar si ocurren sismos similares.

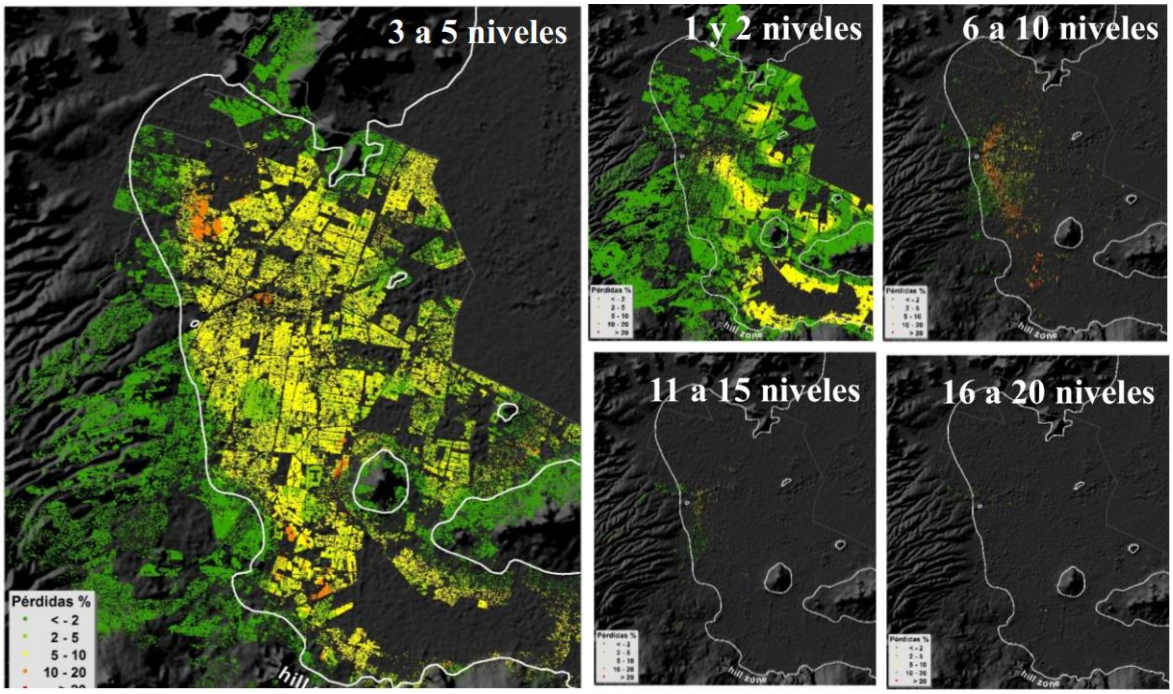


Figura 6. Pérdidas esperadas para la CDMX en función del número de pisos para el sismo del 19S2017; se consideran muy bajas las pérdidas menores al 5% (color verde).

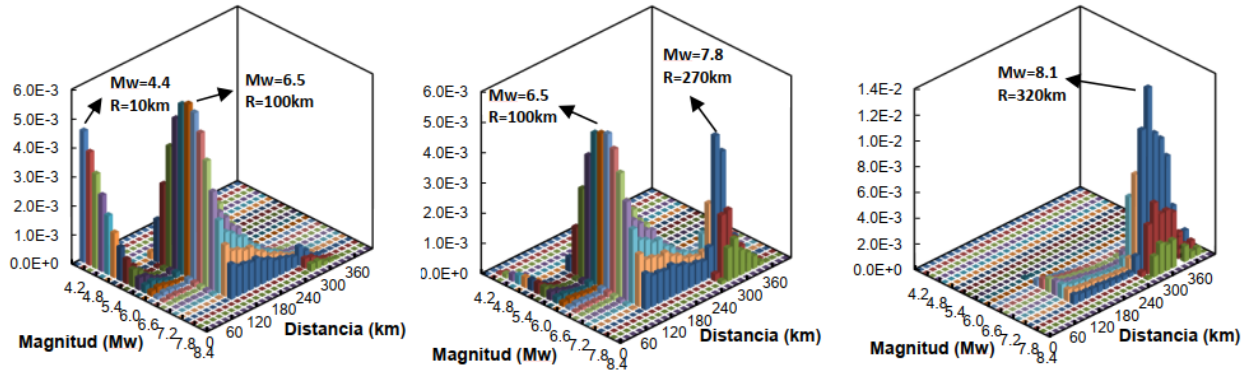
Escenarios deterministas basados en la desagregación del peligro sísmico

En esta sección se presentan escenarios que por alguna razón son relevantes en la Ciudad de México. Se buscaron los sismos que arrojaran la mayor intensidad dadas su magnitud (M) y distancia (R), utilizando desagregación del peligro sísmico que permite determinar qué eventos contribuyen a la intensidad del movimiento.

En la Figura 7 se muestran los resultados de la desagregación sísmica para la estación acelerométrica en Ciudad Universitaria (CU) en la CDMX para un periodo de retorno de 250 años y para tres periodos estructurales: Te=0.5 s, relevante para deslizamientos de tierra y para estructuras rígidas, Te=1.0 s, para

ISSN-e 2395-8251

estructuras de mediana altura, y Te=2.0 s, para estructuras altas. Dentro de cada figura, se resaltan cuatro eventos detallados en la Tabla 3 que son los eventos que más contribuyen al peligro sísmico para diferentes periodos estructurales. Para periodos bajos (Figura 7a), asociados a estructura rígidas (de baja altura) el peligro está representado por sismos corticales locales (evento 1) y de distancia intermedia (evento 2). Para periodos intermedios (Figura 7b), los sismos corticales de magnitud intermedia (eventos 2 y 3) son los que dominan la intensidad, mientras que, para periodos largos (Figura 7c), es decir, para edificios más flexibles (generalmente, edificios más altos) los sismos de subducción son los que más intensidad sísmica provocan.



a) Te=0.5s b) Te=1.0s c) Te=2.0s

Figura 7. Desagregación sísmica de estación CU para un periodo de retorno de 250 años.

A partir de lo mostrado en la Figura 7, se puede considerar que estos cuatro eventos sísmicos son los que causan las mayores intensidades para esos periodos estructurales en CU. Para los sitios en el resto de la ciudad, incluyendo los de zona de lago, consideraremos que están correlacionados con el movimiento en CU como se ha demostrado en trabajos previos (Reinoso y Ordaz, 1999), por lo tanto, la forma de la desagregación se mantiene similar.

Tabla 3. Eventos sísmicos encontrados a partir del análisis de desagregación

Evento	Magnitud (Mw)	Distancia epicentral (km)	Profundidad	Tipo de sismo
1	4.2	15	15	Sismo cortical (falla local)
2	6.5	105	55	Intraplaca, profundidad intermedia
3	6.8	105	60	Intraplaca, profundidad intermedia
4	8	270	25	Interplaca (subducción)

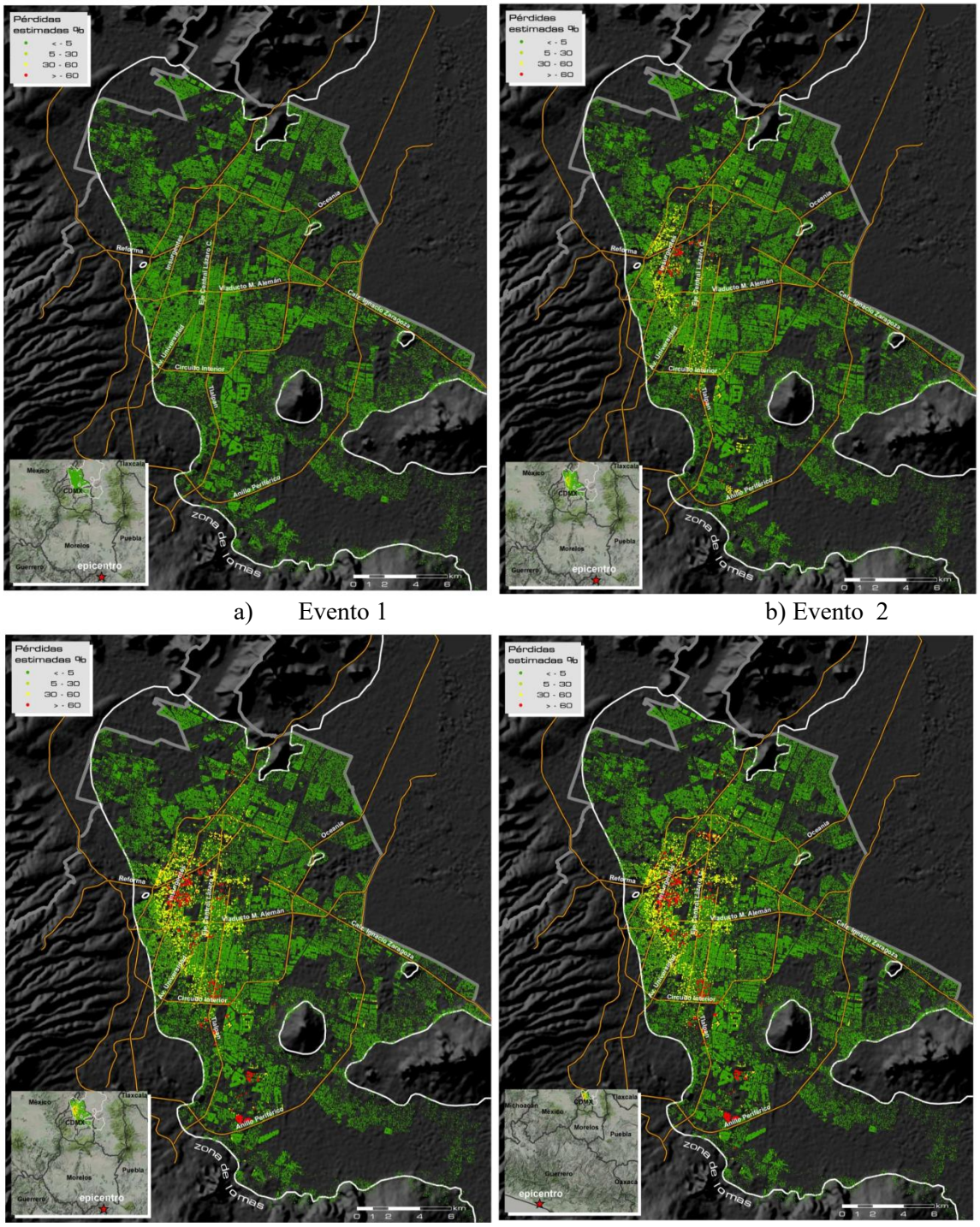
A partir del análisis de desagregación que arroja los cuatro eventos mostrados en la Tabla 3 que son los que afectan a la ciudad para un periodo de retoron de 250 años, se generaron los mapas de pérdida esperada. La Figura 8 muestra la distribución espacial de las pérdidas dentro de la ciudad, donde los puntos verdes oscuro representan edificios con pérdidas menores a 5%, los verdes claros pérdidas entre 5% y 30%, los amarillos pérdidas entre 30% y 60%, y los rojos pérdidas mayores al 60%. La Figura 8a muestra que para el evento 1 (sismo cortical local) los daños por pérdidas menores a 5% (daño ligero) son generalizados en la ciudad, con algunos casos aislados de pérdidas que no exceden 30% (daños intermedios). La Figura 8b muestra los resultados para el evento 2 (sismo intraplaca), donde la mayor parte de las estructuras dañadas se concentra en la alcaldía Cuauhtémoc aunque se aprecian algunos puntos en otros sitios, similar a lo que ocurrió durane el sismo del 19S2017. La Figura 8c muestra los resultados para el escenario 3 (sismo intraplaca), con mayores pérdidas que el evento 2 aunque con un patrón muy similar. Finalmente, la Figura 8d muestra los resultados para el escenario 4 (sismo de

ISSN-e 2395-8251

subducción), donde las pérdidas superan 60% en los tres niveles de altura; las pérdidas en el mapa para los eventos 3 y 4 son muy similares, pero en el detalle, varios edificios tienen pérdidas distintas. En los cuatro escenarios se observa que afortunadamente la mayor parte de la ciudad presenta pérdidas menores a 5%. Sin embargo, las pérdidas moderadas y altas tienden a concentrarse principalmente en la zona central, especialmente en los escenarios 3 y 4, lo que indica una mayor susceptibilidad al daño en estas áreas dada por las características de los edificios.

La Figura 9 muestra el número de edificios afectados según su número de niveles para pérdidas superiores a 60% para los cuatro eventos analizados. Aunque el número total de edificios es bajo, se observa una mayor afectación a edificaciones de 6 a 10 niveles. Los edificios de los intervalos de 11 a 15 y de 16 a 20 representan una fracción relativamente pequeña del parque inmobiliario, pero en proporción al número de edificios de esos niveles en la ciudad es grande. No hay edificios de uno o dos niveles, ni edificios de más de veinte niveles, con este nivel de pérdidas, y las pérdidas para el evento 1 para cualquier intervalo de niveles son muy bajas.

ISSN-e 2395-8251



a) Evento 1 b) Evento 2

c) Evento 3 d) Evento 4

Figura 8. Mapas de pérdidas esperadas por edificio en la CDMX para los cuatro eventos considerados (Tabla 3).

ISSN-e 2395-8251

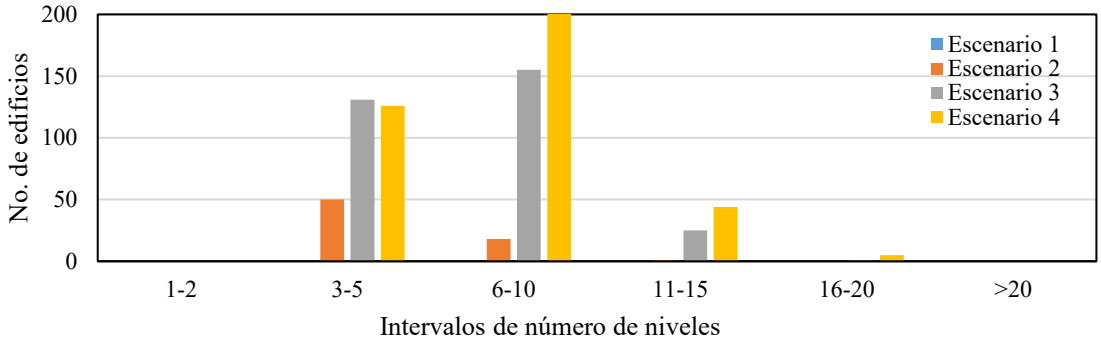


Figura 9. Edificios con pérdidas mayores al 60% para los eventos analizados.

CONCLUSIONES

Con la información obtenida de los escenarios sísmicos probabilistas calculados con datos confiables de amenaza y vulnerabilidad, como los cuatro escenarios mostrados en este trabajo, se pueden orientar las medidas de mitigación y gestión en los edificios de más riesgo, lo que favorece un uso más eficiente de los recursos económicos y humanos; sin embargo, debe tomarse en cuenta que los resultados de un modelo probabilista de riesgo como el utilizado en este trabajo no pueden ser usados de forma directa para la toma de decisiones sobre mitigación o refuerzo, sino como una herramienta preliminar que proporciona información útil, aunque no definitiva, y se deberá hacer uso de estudios detallados de análisis estructural.

En este trabajo solo se muestran cuatro casos, pero para una correcta toma de decisiones, se deberán considerar todos los posibles eventos para un periodo de retorno determinado, tal como lo considera el reglamento de construcciones en los espectros de diseño.

El diseño de estrategias de mitigación adecuadas requiere considerar, además de los factores ya incluidos en este análisis probabilista como número de pisos, sistema estructural, año de construcción y patologías estructurales (irregularidades, planta baja débil, asimetría de esquina, entre otros), factores relevantes como el golpeteo o alteraciones estructurales, que en muchos casos son los causantes de daños y hasta colapsos. El presente análisis de los daños se centra en los efectos del movimiento fuerte del terreno y en la respuesta dinámica suelo–estructura, por lo que no se consideran otros procesos geotécnicos también relevantes en la Ciudad de México como la subsidencia y agrietamientos del suelo asociados a la extracción de agua, socavones o deslizamientos, los cuales tienen un origen distinto al de los sismos y requieren enfoques de análisis y solución también distintos al comportamiento dinámico del suelo y de las estructuras.

En la zona de lomas las pérdidas estimadas son bajas (menores al 2 %) lo que se muestra con la evidencia de los daños históricos que se han presentado en la zona de lago, donde las pérdidas estimadas son mucho mayores, particularmente para edificios entre 6 y 10 niveles. Dependiendo de las características del evento sísmico las pérdidas estimadas están más concentradas en ciertas colonias de las alcaldías Benito Juárez, Coyoacán y Cuauhtémoc, pero claramente se debe a la mayor densidad de edificios, muchos de ellos construidos con reglamentos antiguos. El evento sísmico que presenta el mayor número de edificios con pérdidas estimadas mayores a 60% es el escenario 4 (Mw8.0, R270km, H25km), cuyas características sismológicas son comparables con las del sismo del 19 de septiembre de 1985.

La sismicidad de Ciudad de México es un fenómeno complejo debido a los efectos de sitio por la presencia del lecho lacustre de la ciudad. Por ello, distintos tipos de sismos contribuyen de manera diferente al peligro sísmico de la ciudad, y todos deben ser tomados en cuenta tanto en el diseño de edificios nuevos

ISSN-e 2395-8251

como en la revisión de los existentes. No existe un evento sísmico particular que pueda considerarse único para la planificación de emergencias o el diseño de medidas de mitigación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el patrocinio del Instituto para la Seguridad de las Construcciones de la CDMX.

REFERENCIAS

Abrahamson, N., Gregor, N., y Addo, K (2016), "BC hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes", *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44. DOI: 10.1193/051712EQS188MR

Cruz-Atienza, V. M., Ito, Y., Kostoglodov, V., Hjörleifsdóttir, V., Iglesias, A., Tago, J., Calò, M (2018), "A seismogeodetic amphibious network in the Guerrero Seismic Gap, Mexico", *Seismological Research Letters*, 89(4), 1435–1449. DOI: 10.1785/0220170173

Cruz-Atienza, V. M., Tago, J., Sanabria-Gómez, J. D., Chaljub, E., Etienne, V., Virieux, J., y Quintanar, L (2016), "Long duration of ground motion in the paradigmatic valley of Mexico", *Scientific Reports*, **6**(June), 1–9. Nature Publishing Group. DOI: 10.1038/srep38807

Domínguez, J., Suárez, G., Comte, D., y Quintanar, L (2006), "Seismic velocity structure of the Guerrero gap, Mexico", *Geofisica Internacional*, 45(2), 129–139. DOI: 10.22201/igeof.00167169p.2006.45.2.187

FEMA (2015), "Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook", *FEMA P-154*, *Tercera edición.* DOI: 10.1061/9780784479728.064

Galvis, F., Miranda, E., Heresi, P., Dávalos, H., y Silos, J. R (2017), "Preliminary statistics of collapsed buildings in Mexico City in Puebla-Morelos earthquake", *Technical Report*, *October*, 17. https://www.researchgate.net/publication/320297374

García, A y Suárez, R (1996), "Los sismos en la historia de México", Fondo de Cultura Económica. ISBN: 978-968-16-4874-9

Gómez, D., Torres, M. A., Reinoso, E, (2015), "Realce geométrico de imágenes de muy alta resolución y extracción de catastro a través de GEOBIA en áreas con alta densidad urbana", *SELPER-XXI-México-UACJ- 2015.* Memorias en extenso.

Jaimes, M. A y Suárez, G (2025), "Estimation of damage scenarios in the Mexico City basin caused by local crustal earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America,* 115 (4): 1907–1923. DOI: https://doi.org/10.1785/0120240167

Jaimes, M., Reinoso, E. y Ordaz, M (2006), "Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake", *Journal of Earthquake Engineering*, 10(6), pp. 887–902. DOI: 10.1142/S1363246906002943

Jaimes, M., Reinoso, E. y Ordaz, M (2008), "Empirical Green's functions modified by attenuation for sources located at intermediate and far distances from the original source", *Journal of Earthquake Engineering*, 12, pp. 584–595. DOI: 10.1080/13632460701669967

Kang, J., Körner, M., Wang, Y., Taubenböck, H., Xiang Zhu, X (2018), "Building instance classification using street view images", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 145, 44-59. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.03.006

McGuire, R. K (1995), "Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(5), 1275–1284. DOI: 10.1016/0148-5-279062(96)83355-9

Okada, S y Takai, N (1999), "Classifications of structural types and damage patterns of buildings for earthquake field investigation", en *Memorias del XII Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica*. Ackland, Nueva Zelanda.

ISSN-e 2395-8251

Ordaz, M., Miranda, E., Reinoso E y Pérez-Rocha, LE, (2000), "Seismic loss estimation for Mexico City", XII Congreso mundial de Ingeniería Sísmica, CD.

Ordaz, M., Reinoso, E., Jaimes, M., Alcántara, L y Pérez, C (2017), "High-resolution early earthquake damage assessment system for Mexico City based on a single-station", Geofísica int. 56, no.1, 117-135. DOI 10.19155/geofint.2017.056.1.9

Ordaz, M., Singh, S. K., Reinoso, E., Lermo, J., Espinosa-Johnson, M., y Dominguez, T (1988), "The Mexico earthquake of september 19, 1985 - estimation of response spectra in the lake bed zone of the valley of Mexico", *Earthquake Spectra*, 4(4), 815–834. DOI: 10.1193/1.1585504

Ordaz. M., Meli, R., Montoya, C., Sánchez, L y Pérez-Rocha, L (1994), "Bases de datos para la estimación de riesgo sísmico en la ciudad de México". Cuadernos de Investigación, 16, Colegio de Ingenieros Civiles de México, Ciudad de México.

Reinoso, E. y Ordaz, M (1999), "Spectral ratios for Mexico City from free-field recordings", *Earthquake Spectra*. pp. 273–295 DOI: 10.1193/1.1586041

Singh, S. K., Astiz, L., y Havskov, J (1981), "Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: A reexamination", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**(3), 827–843. DOI: 10.1785/bssa0710030827

Singh, S. K., Reinoso, E., Arroyo, D., Ordaz, M., Cruz-Atienza, V., Pérez-Campos, X., Iglesias, A., et al (2018), "Deadly intraslab Mexico earthquake of 19 September 2017 (Mw 7.1): ground motion and damage pattern in Mexico City", *Seismological Research Letters*, 89(6), 2193–2203. DOI: 10.1785/0220180159

Suárez, G y Jaimes, M. A (2022), "Estimation of damage scenarios in Mexico City caused by nearby crustal earthquakes". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113 (1): 204–219. DOI: https://doi.org/10.1785/0120220186

Singh, S. K., Mena, E and Castro, R (1988), "Some aspects of the source characteristics and ground amplification in and near Mexico City from acceleration data of the September, 1985, Michoacan, Mexico, Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78, 451-477. DOI: 10.1785/BSSA0780020451

Orozco Narváez, V., Reinoso Angulo, E. (2007). Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la Ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica. Revista Ingeniería Sísmica, (76). DOI: https://doi.org/10.18867/ris.76.131

ISSN-e 2395-8251