

Aproximación cartográfica a la vulnerabilidad estructural ante sismos empleando una metodología cualitativa: aplicación para la Ciudad de Toluca

ALEXIS ORDAZ HERNÁNDEZ¹ | JAIME AMADOR HERNÁNDEZ MILLÁN¹ |
JUAN CARLOS GARATACHIA RAMÍREZ¹

Recibido: 02/05/2019 | Aceptado: 15/01/2020

Resumen

La vulnerabilidad constituye aquella variable en que los tomadores de decisiones pueden influir, especialmente cuando se analiza un espacio geográfico ya construido en condiciones de peligro sísmico evidente. Este caso de estudio se enfoca en el análisis de la vulnerabilidad estructural del fondo habitacional de la Ciudad de Toluca, empleando una metodología cualitativa. Se consideraron tres indicadores: tipologías constructivas, edad de las construcciones y el periodo constructivo en función de la aplicación del Reglamento General de Construcciones del Municipio de Toluca.

Los resultados obtenidos permitieron identificar cuatro niveles de vulnerabilidad estructural, sobresalen 866 manzanas con vulnerabilidad muy alta y 1430 con alta vulnerabilidad, donde aproximadamente residen 218 314 personas. La cartografía generada puede ser considerada un insumo en los planes de reducción de la vulnerabilidad estructural para manejar el riesgo de desastres. Así mismo, quedaron enunciadas algunas líneas de investigaciones para futuros trabajos, especialmente en la definición de funciones de vulnerabilidad para las edificaciones típicas de la ciudad y el análisis del efecto de sitio a partir de las condiciones geotécnicas dentro del escenario urbano.

Palabras claves: cartografía; vulnerabilidad estructural; metodología cualitativa; tomadores de decisiones; peligro sísmico

Abstract

Cartographic approach to structural vulnerability to earthquakes using a qualitative methodology: application to Toluca City

Vulnerability is the variable in which the decision makers can influence, specially when analyzing a geographical space built under obvious seismic hazard conditions. This case of study is centered on the analysis of structural vulnerability in Toluca City, using a qualitative methodology. Three indicators are considered in this article: constructive typologies, age of the constructions and the period of construction based on the application of the General Construction Regulations in Toluca Municipality.

1. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

Email: alexisordaz.1978@gmail.com, jaimehmillan_28@outlook.com, jc_gr22@hotmail.com

The results obtained allowed us to identify four levels of structural vulnerability, in which there can be identified 866 blocks in a very high level of vulnerability and 1430 classified with high vulnerability, where approximately 218 314 people live. The resulting cartography is included in the structural vulnerability reduction plans to manage the disaster risk. At the same time, some lines of inquiry were established for future investigations, mainly when defining the function of vulnerability for the typical buildings in the city, and the analysis of the site effect through the geotechnical conditions of the urban scenery.

Keywords: cartographic; structural vulnerability; qualitative methodology; authorities; seismic hazard

1. Introducción

La sismicidad es un fenómeno principalmente de génesis tectónica, sin embargo, sus efectos hay que abordarlos desde diferentes perspectivas que afectan a la población. Precisamente las urbanizaciones son escenarios geográficos con grandes densidades poblacionales y de edificios, que constituyen elementos expuestos a mayor o menor vulnerabilidad. El desconocimiento de elementos básicos de distribución espacial de inmuebles vulnerables estructuralmente somete a las poblaciones a una exposición que puede materializarse en caso de un terremoto. Lo anterior en materia individual o familiar. Pero desde una perspectiva más amplia, la falta de información limita sustancialmente la toma de decisiones por parte de las autoridades.

La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2015), posterior al análisis realizado en 22 países latinoamericanos y caribeños, subraya el notable incremento de pérdidas de vidas humanas y la destrucción de infraestructuras debido a la actividad sísmica. El escenario de desaliento se repite sistemáticamente con impactos notables en el PIB de los países de América Latina debido a los sismos.

El simple repaso a los eventos sísmicos de mayor intensidad en América Latina durante las últimas décadas ratifica la idea anterior. Por ejemplo, en Nicaragua (23 de diciembre de 1972) se reportaron de 4000 a 6000 muertos y pérdidas estimadas en 844,8 millones de dólares (Kates et al., 1973). En Guatemala (4 de febrero de 1976) con 23 000 muertes y pérdidas económicas que exactamente aún no son calculadas (Consultores en Riesgos y Desastres, 2009). El sismo de Haití (12 de enero de 2010) ocasionó 300 000 fallecidos y pérdidas evaluadas en 7,8 billones de dólares, cantidad equivalente al 120% del PIB del país correspondiente al 2009 (Gobierno de Haití, 2010). En Chile, el 27 de febrero del 2010, unas 525 personas perdieron la vida, con un centenar de desaparecidos y 800 000 personas damnificadas (Morales, 2010 y Ministerio de Interior y Seguridad Pública de Chile, 2012) y se estima que las pérdidas económicas fueron de 30 billones de dólares (Moehle et al., 2010).

Así mismo, y en un contexto geográfico más cercano al caso de estudio, se ubicaría el desastre derivado del sismo del 19 de septiembre del 2017 que afectó principalmente a las entidades de Guerrero, México, Morelos, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala y Ciudad de México, en las cuales, de acuerdo con cifras oficiales, 470 personas perdieron la vida y 1372 requirieron hospitalización (Comisión Nacional de los Derechos Humanos, 2018). Mientras que las afectaciones sobre la viviendas, edificios y espacios públicos se estiman que alcanzaron 35 000 millones de pesos solo para la Ciudad de México (Comisión de Gobierno, 2017).

Safina (2003), refiriéndose a la vulnerabilidad sísmica y específicamente dentro de esta a la vulnerabilidad estructural, la define como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultando de la probable ocurrencia de un evento sísmico desastroso. Es una condición intrínseca de la estructura a sufrir daños ante la ocurrencia de un evento determinado, y está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño. Así mismo, Iglesias et al. (2006) indican, que la vulnerabilidad estructural constituye un problema de gran complejidad que ha de ser abordado de diferentes formas en función de la escala de trabajo, tipo de cimentación, antigüedad, altura del edificio, su geometría en planta, respuesta del terreno, distribución de masas, relación con otros edificios, etc.

En la actualidad, una de las soluciones a este serio problema, ha sido la introducción de métodos empíricos, que en muchas ocasiones responden a los niveles de información catastral de uso público con que se cuente. Se fundamentan en la experiencia recopilada sobre el comportamiento de las diferentes estructuras frente a un terremoto. Martínez (2014), le asigna clases de vulnerabilidad a cada tipología constructiva, en una escala cualitativa o numérica. Un ejemplo, es la clasificación de vulnerabilidad propuesta en la Escala Macrosísmica Europea EMS-98, la cual adopta clases desde la A (más vulnerable) hasta la F (menos vulnerable). En la dirección descrita varios autores han sustentado sus trabajos de zonificación de la vulnerabilidad estructural en núcleos urbanos (Pérez, 2005; Caballero, 2007; Alcahuamán 2013 y Ordaz et al., 2015). Según Climent et al. (2003), el análisis cualitativo puede basarse en consideraciones sobre el comportamiento de los diferentes sistemas constructivos ante sismos, calidad del diseño y construcción, edad; y en relaciones empíricas desarrolladas a nivel mundial referentes al nivel de daños esperados de acuerdo con el tipo de estructura y el nivel de intensidad sísmica. Algunas experiencias similares fueron puestas en práctica por Sauter (1989), Wald et al. (1999) y Kramer (2014).

Esta investigación asume como objetivo, analizar el comportamiento espacial de la vulnerabilidad estructural del fondo habitacional de la Ciudad de Toluca, como un aporte esencial en la reducción de riesgos de desastres. El procedimiento empleado en el trabajo se representa a escala de manzana y se ha realizado sobre una plataforma de Sistemas de Información Geográfica. Se diseñó una metodología que se acercara al contexto real de la Ciudad de Toluca en función de la información catastral disponible y de la observancia del desempeño de las estructuras en los sismos ocurridos en el pasado, teniendo en consideración que el caso de estudio no cuenta con funciones de vulnerabilidad o matrices de daños para edificaciones tipo.

2. Metodología

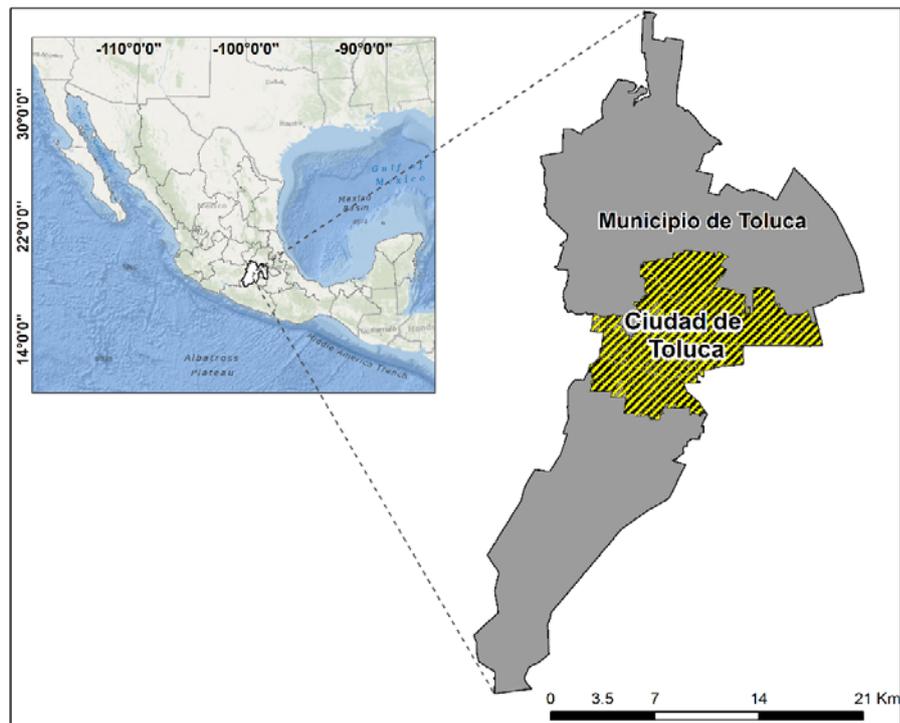
2.1. Área de estudio

El municipio de Toluca se localiza en la porción centro-oeste del Estado de México. Mientras que la Ciudad de Toluca, objeto de investigación en este caso, es la cabecera municipal y capital del estado (Figura 1), en las coordenadas 19° 17' 34" de latitud norte y 99° 39' 24" de longitud oeste. La altitud promedio es de 2660 msnm. De acuerdo con datos del Marco Geoestadístico Nacional (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010) la Ciudad de Toluca de Lerdo tiene una superficie de 89,6 km². Desde el punto de vista administrativo, el Sistema Estatal de Información Metropolitana del Estado de México, indica que la ciudad está conformada por 263 localidades, de las cuales 87 corresponden a colonias, 58 a barrios, 53 a condominios, 39 a fraccionamientos

y 10 son delegaciones, mientras que el resto pertenecen a asentamientos humanos de menor categoría administrativa.

Desde de la década de los 70, la Ciudad de Toluca ha estado sometida a un proceso de crecimiento urbano (García et al., 2015). Incorporando corredores y parques industriales, así como el desarrollo de vialidades regionales (Secretaría de Desarrollo Urbano, 2014). Según datos del último Censo de Población y Vivienda realizado en México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010), la Ciudad de Toluca tenía una población de 489 333 habitantes, de los cuales, el 52% eran mujeres y el 48% hombres. Concentrando el 60% de la población total municipal. Mientras que, la dinámica de crecimiento poblacional ha experimentado un incremento continuo, al menos en las últimas tres décadas; datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía reportan un aumento de 161 468 habitantes entre los años 1990 y 2010. Este aumento poblacional, obedece entre otros factores, al ya citado proceso de metropolización, el cual generó la aceleración de la migración campo-ciudad. Así mismo, el sismo de 1985 que afectó a la Ciudad de México también añade un factor de crecimiento poblacional para Toluca (García et al., 2015).

Figura 1. Localización del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

De forma general, el escenario geológico en el cual se ubica la República Mexicana, le confiere un carácter de alta peligrosidad sísmica. Rosenblueth (1994) relaciona especialmente el origen de la sismicidad en México a dos tipos de interacciones entre placas tectónicas: (1) Deslizamientos horizontales relativos en las fallas de transformación y (2) De subducción. El primer tipo, ilustraría la sismicidad en la península de Baja California y de los estados de Sonora y Sinaloa, sitios bajo la influencia de fallas de transformación que forman parte del sistema de San Andrés. Mientras que el segundo tipo de interacciones (subducción), explicaría la sismicidad histórica desde Colima hasta Oaxaca, donde prevalece la subducción de las placas Rivera y de Cocos bajo la de Norteamérica.

Otro elemento clave en la comprensión de los efectos diferenciados de daños en un espacio urbano radica en las características de los materiales geológicos. Donde, materiales poco consolidados, saturados y localizados como estratos de gran espesor, provocarían amplificaciones de las ondas sísmicas y como consecuencia mayores daños en la infraestructura. Expósito (2012) describe paquetes de suelos pocos consolidados de hasta 100 metros de espesor. Así mismo, Auvinet *et al.* (2015) realizaron la primera zonación geotécnica para el Valle de Toluca, resaltando la presencia de depósitos lacustres, aluviales lacustres, aluviales, rocas y suelos firmes.

El marco demográfico, urbanístico, tectónico y geotécnico descrito ofrecen elementos para suponer un escenario geográfico de posible riesgo sísmico (Figura 2). Además, justifican la necesidad de un análisis a escala urbana que permita identificar la posición espacial de las manzanas con mayor concentración de inmuebles vulnerables estructuralmente.

Figura 2. Daños a la infraestructura provocados por el terremoto del 19 de septiembre del 2017. A: Edificio con daños severos en el centro de la Ciudad de Toluca. B: Detalle de una de las torres del edificio de Rectoría de la Universidad Autónoma del Estado de México.



Fuente: Fotos de Acevedo y Hernández (2017) y Milenio (2017).

2.2. Materiales y Métodos

El análisis de la vulnerabilidad estructural, se enfocó para esta primera etapa exclusivamente en el fondo habitacional, quedando para trabajos posteriores otros elementos vulnerables de gran importancia como líneas vitales, edificios de valor patrimonial, entre otros. Se propone para el caso específico de la Ciudad de Toluca la valoración de tres parámetros que ofrecen un panorama del nivel de vulnerabilidad del fondo habitacional:

- Tipo de materiales y diseño constructivo
- Edad de las construcciones
- Periodo de construcción (Aplicación del Reglamento General de Construcciones del Municipio de Toluca)

2.2.1. Vulnerabilidad por tipo de materiales y diseño constructivo

Existe una estrecha relación entre los materiales empleados y el diseño constructivo, con las posibilidades de que una estructura sufra daños frente a una solicitud sísmica. Por ejemplo: un edificio de muros de adobe sin castillos y cadenas, será mucho más vulnerable que un edificio de mampostería con castillos y cadenas de concreto armado.

Se consultó la información catastral disponible para el Municipio Toluca, que abarca elementos como categoría, materiales y tipo de estructura. Posteriormente se analizaron los criterios de clasificación, que ofrece el Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IGCEM) (Tabla 1).

Tabla 1. Tipologías constructivas para Toluca. Según el uso y prototipo arquitectónico: Habitacional (H), Comercio (C), Equipamiento especial (E) e Industrial (I).

TIPOLOGÍA DE ESTRUCTURAS	DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURA BÁSICA
H1	Viviendas precarias, sin proyecto. Materiales de mala calidad y/o de desecho, sin acabados o mal realizados. Claros menores a 3,0 m, autoconstrucción, y/o autofinanciamiento en periodos largos. Generalmente de un nivel. El aspecto dentro del lote es desordenado. Las superficies de construcción son mínimas, generalmente de 40,0 m ² o menores. Los materiales empleados en techumbres son lámina de cartón, teja, asbesto, lámina galvanizada. En muros se emplea madera, adobe, material de desecho, etc.
H2	Vivienda económica sin proyecto o parcialmente definido. Materiales económicos, con acabados incipientes, con ejecución de poca calidad. Claros menores a 3,5 metros. Autoconstrucción y autofinanciamiento en periodos medianos o largos, se localizan en los centros de los pueblos, en las periferias de estos y en zonas con asentamientos espontáneos. Los materiales empleados son el concreto, losas sin acabados, muros de tabique, tabicón o similar en muros.
H3	Viviendas de interés social con proyecto típico definido. Materiales económicos con ejecución de mediana calidad. Claros menores a 3,5 m. Construcción en serie por empresas particulares u oficiales. Se localizan en zonas determinadas de las zonas urbanas, en fraccionamientos o en lotes aislados, es frecuente que forme conjuntos en condominio. La techumbre puede ser de concreto, concreto premezclado; muros de block vidriado, tabique, tabicón, etc.
H4	Vivienda con proyectos regulares, bien definidos y funcionales. Materiales de mediana y buena calidad con acabados bien ejecutados. Claros medios de 4,0 m, construcción bajo supervisión de un profesional o la ejecución de una empresa constructora. Se localizan en zonas consolidadas de los centros de población o en fraccionamientos residenciales medios y campestres. Los materiales utilizados son de concreto y bóvedas. En la techumbre generalmente se emplean impermeabilizantes y recubrimientos de teja y/o ladrillo. Los muros son de tabique, tabicón, block, adobe y piedra.
H5	Viviendas con buen diseño arquitectónico, funcional y de calidad. Materiales de buena calidad, acabados bien ejecutados con detalles especiales. Claros medios de 6,0 metros, construcción realizada por empresas constructoras. Se localizan en zonas exclusivas y/o en fraccionamientos residenciales.
C2	Construcciones de uso comercial. Proyecto regular definido y funcional. Materiales de mediana calidad con acabados bien ejecutados. Claros medios menores a 4,0 metros, construidos bajo supervisión o por empresas constructoras; se localizan en las zonas comerciales, corredores comerciales planificados o fuera de las áreas urbanas.
E1	Edificaciones especiales con un diseño arquitectónico definido. Mampostería de piezas huecas con refuerzos interiores y cadenas de desplante o zapatas corridas; o bien aisladas de concreto armado. Muros con blocks extruido, con castillos y cadenas de cerramiento. Trabes y columnas metálicas, láminas de zinc y, armadura con largueros metálicos y contravientos rigidizantes. En esta categoría se incluyen mercados, escuelas; clínicas, hospitales, estadios, canchas y albercas, iglesias y edificios administrativos públicos.
I2	Infraestructura ligera con materiales de buena calidad y ejecución de mediana calidad. Claros de más de 10,0 m, con elementos horizontales estructurales de más de 1,10 m. Estructuras destinadas a procesos productivos básicos de empresas, fuera o dentro de las naves principales, que pueden o no, tener techumbre propia, muros divisorios, cimentación propia e instalaciones.
I3	Industrial media. Infraestructura con materiales de buena calidad y controlados. Acabados de buena ejecución. Estructuras que soportan la techumbre y adicionalmente cargas adicionales. Los sistemas de cubierta pueden ser de acero con peraltes mayores a 1.10 m, concreto pre-reforzado, y concreto de trabelosas.
I4	Infraestructura pesada, proyecto definido y funcional. Materiales de buena calidad y controlados. Acabados de buena ejecución, estructuras que soportan el sistema de techumbre. Son instalaciones especiales, con alturas de 7,0 m o más, pueden tener techumbre propia, muros divisorios, cimentación propia e instalaciones.

Fuente: Servicios Catastrales (Instituto de Información e Investigación, Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México, 2018) y descripciones modificadas a partir del Gobierno del Estado de México (2009).

La tabla 1 muestra las 10 categorías de tipologías constructivas oficialmente reconocidas en la Ciudad de Toluca, con una detallada descripción de los materiales y diseños empleados. Esta información sirvió de fundamento para la asignación de niveles de vulnerabilidad e importancia (ponderación) para cada categoría, unido a las experiencias de daños en terremotos fuertes históricos en la Ciudad de México y el contexto regional de Centro América (Tabla 2). Posterior a la definición de los tipos de estructuras y su vulnerabilidad estructural se analizó el álgebra de mapas por cada manzana para definir el % de viviendas por niveles de vulnerabilidad. En la figura 3, se muestran las cuatro tipologías más extendidas en la Ciudad de Toluca: Viviendas precarias (H1), Habitacional económica (H2), Habitacional de interés social (H3), Industrial media (I3).

Tabla 2. Niveles de vulnerabilidad por tipos de estructuras.

Tipo de Estructura		Niveles de Vulnerabilidad				Ponderación
		Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
H1	Estructuras emplazadas en sitios de alta humedad u otras características que facilitan el deterioro de las estructuras.					4
	Estructuras emplazadas sobre materiales geológicos óptimos					3
H2						2
H3						1
H4						1
H5						1
C2						2
E1						1
I2						2
I3						1
I4						1

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Ejemplos de algunos tipos de estructuras para la Ciudad de Toluca: Viviendas precarias (H1), Habitacional económica (H2), Habitacional de interés social (H3) e Industrial media (I3).



Fuente: Google Maps (2018).

2.2.2. Vulnerabilidad por edad de las construcciones

Para este indicador se siguieron las sugerencias de Climent et al. (2003), donde consideran que la vulnerabilidad de las edificaciones estará influenciada por su edad y el aspecto o condición física aparente, de tal forma que edificaciones más viejas y más deterioradas presentarán mayor vulnerabilidad y lo contrario en el caso de edificaciones más recientes y de una buena condición física. Así se procedió a la zonificación por periodos históricos del crecimiento de la ciudad utilizando las fichas del catálogo de bienes e inmuebles históricos (Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2010) y la cartografía histórica por medio de Ortofotos y Líneas de Vuelo del año 1984 (Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México, IGCEM, 2002) (Tabla 3).

Tabla 3. Características generales de las construcciones por periodos constructivos y sus niveles de vulnerabilidad.

Periodo Constructivo	Características generales de las construcciones	Niveles de vulnerabilidad				Ponderación
		Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
Anterior al siglo XVII	Fachada principal con aplanado de cal y arena, muros adobe y tabique. Con entresijos vigas y duela.					4
XVIII	Fachada principal con aplanado, muros de adobe, techo con cielo raso, entresijos y cubiertas de forma plana.					3
XIX	Fachada principal de cantera labrada, muros de adobe, entresijos de bóveda catalana, cubierta de bóveda catalana y la forma de entresijos plana.					2
XX y lo transcurrido del Siglo XXI	Cimentaciones con zapatas aisladas o corrida con contratrabes de concreto armado en ocasiones diseño especial, pilas, pilotes, muros de contención de piedra o concreto, trabes y columnas metálicas o de concreto armado prefabricado.					1

Fuente: Elaboración propia empleando descripciones de las construcciones obtenidas del Instituto Nacional de Antropología e Historia (2010).

2.2.3. Vulnerabilidad por periodo de construcción

Según el código reglamentario del municipio de Toluca, a partir del año 2009 se requeriría una Licencia Municipal de Construcción para todas aquellas edificaciones que se pretendieran realizar dentro del perímetro municipal (Gobierno del Estado de México, 2009). Pero, anteriormente, desde el año 1993 hubo un giro de la política dirigida a proteger la infraestructura con el Reglamento General de Construcciones del Municipio de Toluca (Gobierno Municipal de Toluca, 1993), donde explícitamente en el Título Décimo "Seguridad Estructural", en sus capítulos del I al

VI, se abordaron elementos como las características de las construcciones, criterios de diseño estructural, criterios para calcular la intensidad de las acciones, diseño de cimentaciones y diseños por sismos (Ramírez et al. 2002).

Aplicando este criterio, se adjudicarán dos niveles de vulnerabilidad, “Muy Alta” a las construcciones anteriores al año 1993 y “Baja” a las edificaciones posteriores a la entrada en vigor del Código Sísmico del Estado de México. Para obtener este mapa temático fue necesario acceder al Censo de Población y Vivienda del año de 1990. Quedando pendiente el completamiento de la información catastral entre los años 1990-1993, estos tres años se completaron con imágenes de Satélite Spot 6 y Ortofotos del año 1993 obtenidas del Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México, IGCEM (2002).

La base de datos se conforma por cuatro columnas, la primera “Clave de la Manzana Urbana”, en la cual se registran las 5121 manzanas que conforman el perímetro urbano de la Ciudad de Toluca, donde cada una tiene asignado un código (identificador) por el Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IGCEM) (2018). La segunda columna “Tipología”, ofrece la descripción de las estructuras constructivas predominantes en cada manzana (Tabla 1), mientras que la tercera columna “Ocupación”, coloca en perspectiva el uso sistemático o actividad más recurrente dentro de la manzana (comercio, residencial, industrial, entre otros). Y finalmente, la cuarta columna “Materiales-Estructura”, describe de forma breve, los materiales de construcción más empleados dentro de la manzana, así como la estructura o técnica constructiva aplicada (Tabla 4).

Tabla 4. Fragmento, a modo de ejemplo, de la base de datos construida para el análisis en plataforma de Sistema de Información Geográfica de vulnerabilidad estructural de la Ciudad de Toluca.

Clave de la Manzana Urbana	Tipología	Ocupación	Materiales-Estructura
1505100010468000	C2	Comercial Medio	Construcciones de uso comercial. Proyecto regular definido y funcional. Materiales de mediana calidad con acabados bien ejecutados. Claros medios menores a 4,0 metros, construidos bajo supervisión o por empresas constructoras. Se localizan en las zonas comerciales, corredores comerciales planificados o fuera de las áreas urbanas.
1505100010472045	H1	Habitacional Precaria	Viviendas precarias, sin proyecto. Materiales de mala calidad y/o de desecho, sin acabados o mal realizados. Claros menores a 3,0 m, autoconstrucción, y/o autofinanciamiento en periodos largos. Generalmente de un nivel. El aspecto dentro del lote es desordenado. Las superficies de construcción son mínimas, generalmente de 40,0 m ² o menores. Los materiales empleados en techumbres son lámina de cartón, teja, asbesto, lámina galvanizada. En muros se emplea madera, adobe, material de desecho, etc.
1505000010472040	H2	Habitacional Popular	Vivienda económica sin proyecto o parcialmente definido. Materiales económicos, con acabados incipientes, con ejecución de poca calidad. Claros menores a 3,5 metros. Autoconstrucción y autofinanciamiento en periodos medianos o largos, se localizan en los centros de los pueblos, en las periferias de los mismos y en zonas con asentamientos espontáneos. Los materiales empleados son el concreto, losas sin acabados, muros de tabique, tabicón o similar en muros.

Clave de la Manzana Urbana	Tipología	Ocupación	Materiales-Estructura
1505100010468050	H3	Habitacional Interés social	Viviendas de interés social con proyecto típico definido. Materiales económicos con ejecución de mediana calidad. Claros menores a 3,5 m. Construcción en serie por empresas particulares u oficiales. Se localizan en zonas determinadas de las zonas urbanas, en fraccionamientos o en lotes aislados, es frecuente que forme conjuntos en condominio. La techumbre puede ser de concreto, concreto premezclado; muros de block vidriado, tabique, tabicón, etc.
1505100010468040	H4	Habitacional Residencial Medio	Vivienda con proyectos regulares, bien definidos y funcionales. Materiales de mediana y buena calidad con acabados bien ejecutados. Claros medios de 4,0 m, construcción bajo supervisión de un profesional o ejecuta por empresas constructoras. Se localizan en zonas consolidadas de los centros de población o en fraccionamientos residenciales medios. Los materiales utilizados son de concreto y bóvedas. En la techumbre generalmente se emplean impermeabilizantes y recubrimientos de teja y/o ladrillo. Los muros son de tabique, tabicón, block, adobe y piedra.

Fuente: Elaboración propia.

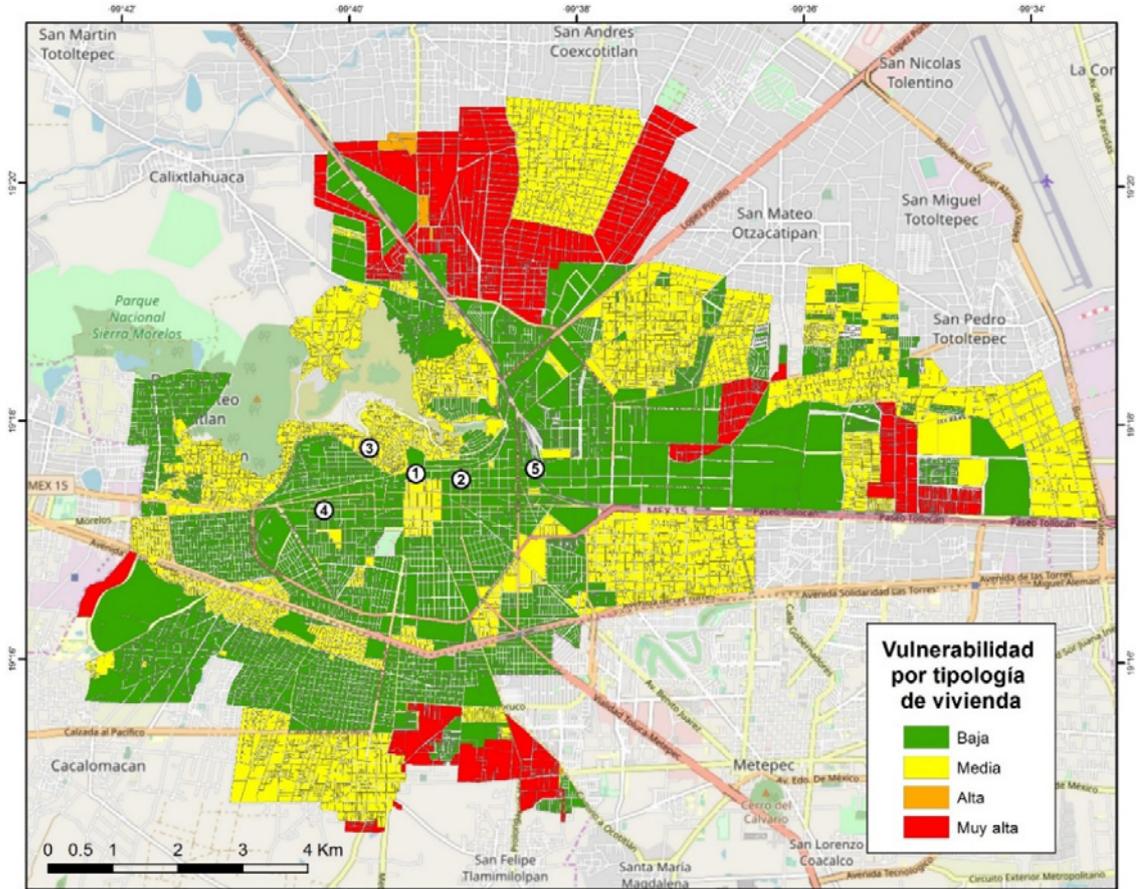
3. Resultados

3.1. Análisis de la vulnerabilidad estructural según las tipologías constructivas para la Ciudad de Toluca

La disposición espacial, en el escenario urbano de los diferentes niveles de vulnerabilidad en función del diseño constructivo, reveló el predominio de las vulnerabilidades baja (2918 manzanas) y media (1877 manzanas) (Figura 4). En este caso es significativo resaltar las 319 manzanas clasificadas con vulnerabilidad muy alta, donde aproximadamente habitan 57 000 personas especialmente en viviendas precarias (H1) (Figura 5).

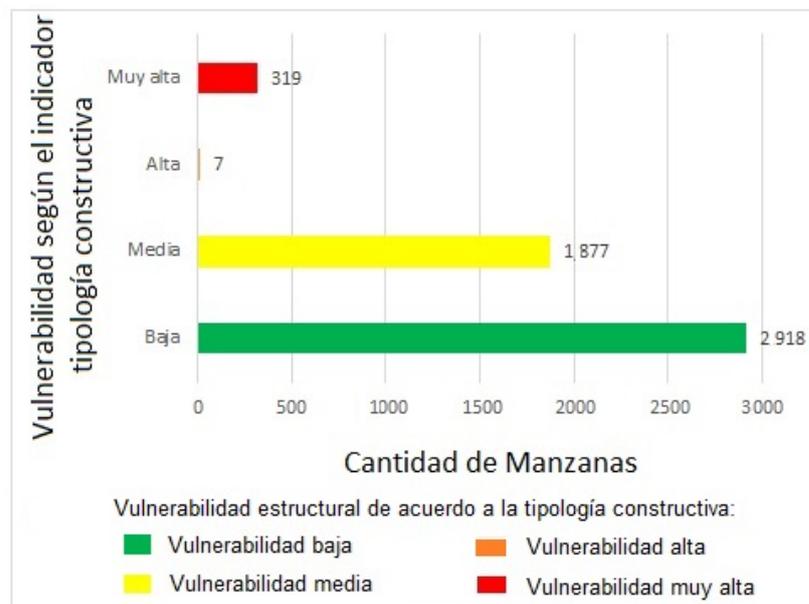
La tipología constructiva, constituye un elemento clave cuando se revisa el comportamiento de estructuras muy similares durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. En municipios cercanos como Tenango y Tenancingo, ubicados en un radio de aproximadamente 21 y 36 km respectivamente, respecto a Toluca, las viviendas precarias (H1) sufrieron daños severos frente a solicitudes sísmicas provocadas por un sismo de magnitud 7,1 con epicentro en el Estado de Puebla (Figura 6).

Figura 4. Mapa de vulnerabilidad estructural para el fondo habitacional por tipologías de las viviendas. Ciudad de Toluca. Donde, 1: Colonia Centro, 2: Barrio de Santa Clara, 3: Barrio de San Miguel Apinahuizco, 4: Barrio San Bernardino y 5: Colonia Reforma y Ferrocarriles Nacionales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Cantidad de manzanas de acuerdo o los niveles de vulnerabilidad según el indicador tipología constructiva de la Ciudad de Toluca.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Daños ocasionados en los municipios de Tenancingo y Tenango en viviendas precarias de muros de adobe con techos de madera y teja. Terremoto de magnitud 7,1 que tuvo su epicentro en el Estado de Puebla el 19 de septiembre del 2017.



Fuente: Fotos de González (2017) y El Pulso del Estado de México (2017)

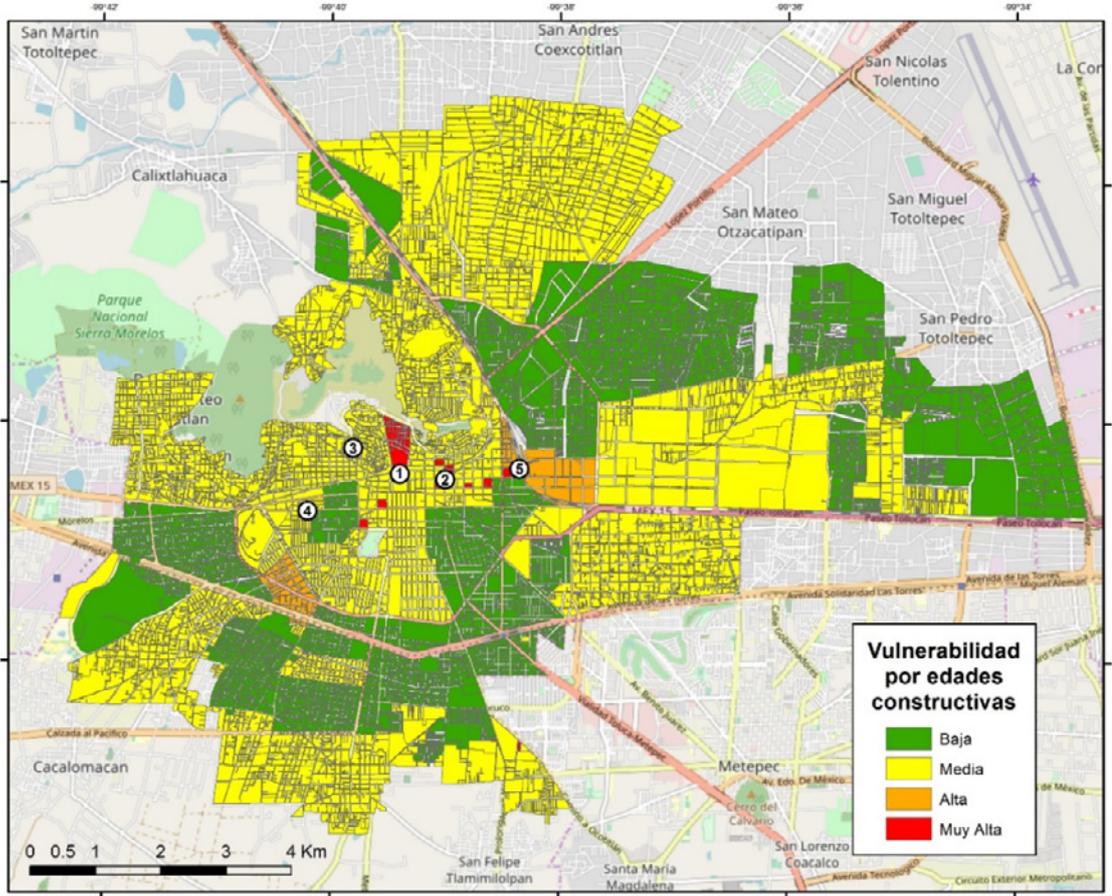
3.2. Análisis de la vulnerabilidad estructural según la edad de las construcciones

El análisis de la vulnerabilidad por edades constructivas permitió distinguir las manzanas que se han desarrollado urbanísticamente desde el siglo XVII, durante los siglos XVIII, XIX y XX, y lo que ha transcurrido del siglo XXI (Figura 7). Así mismo, es probable que, para la construcción de edificios importantes y recientes se debieron analizar condiciones geotécnicas de efecto de sitio, como la amplificación de las ondas sísmicas y la licuefacción.

Las edificaciones construidas en el Siglo XVII utilizaron materiales como adobe, piedra para mamposterías, aplanados de cal y arena. Una parte de estos inmuebles en la actualidad han sido remodelados y/o reforzados, y corresponden a templos, escuelas y casas habitación. Por las técnicas y materiales empleados se consideran inmuebles con “vulnerabilidad muy alta” a 50 manzanas donde se emplazan 14 936 viviendas. La mayor parte de estas se encuentran espacialmente localizados en la Colonia Centro, Barrio Santa Clara, Barrio de San Miguel Apinahuizco, Barrio de San Bernardino y Jardín Reforma (Figuras 7 y 8). Las construcciones para el siglo XIII, con 102 manzanas equivalentes al 2% del total de la ciudad, se le adjudican una “vulnerabilidad alta”. Se caracterizaron por un fondo habitacional con empleo de aplanados de cal, arena gris, cantera labrada, con predominio de muros de piedra, adobe y tabique. Los entrepisos conformados por vigas, duela cubierta de vigas y terrado. La forma predominante de los entrepisos y cubierta es plana con 46 387 viviendas en esta condición (Figuras 7 y 8).

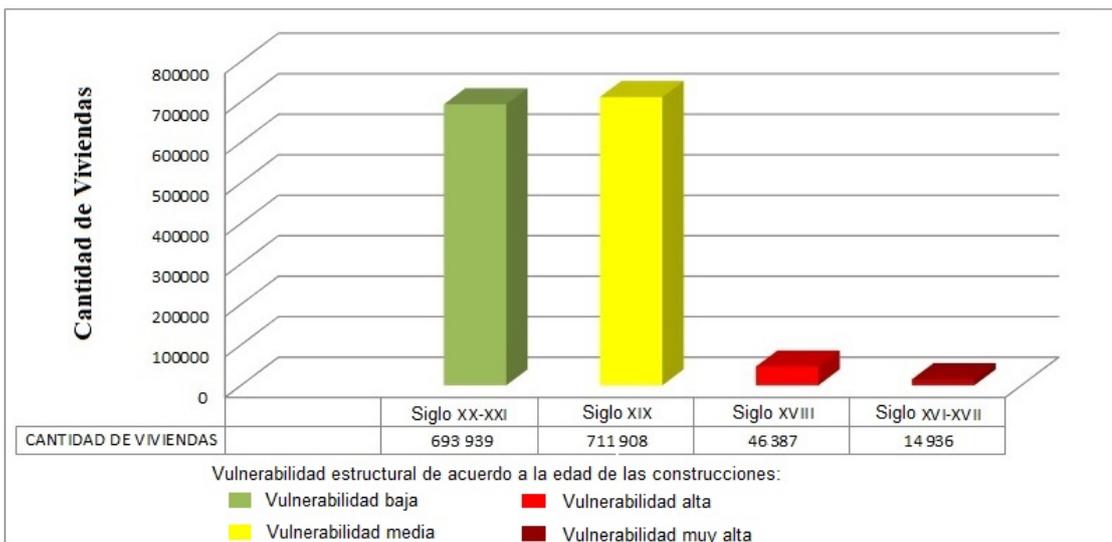
En el siglo XIX se establecen 2 516 manzanas equivalentes al 48% del total con fachadas de una mejora en el revestimiento estético arquitectónico, se emplearon materiales como cantera labrada, muros de adobe, con forma de entrepisos plana y reforzamiento estructural de mamposterías con cadenas y castillos de concreto, zapatas aisladas entre otras. Durante los siglos XX y los primeros 18 años del siglo XXI, la Ciudad de Toluca experimenta un crecimiento de 2468 manzanas, el crecimiento urbanístico se caracteriza por mejoras en el ordenamiento y planeación de la ciudad. En este periodo entra en vigor el Reglamento General de construcciones para el Municipio de Toluca (Gobierno Municipal de Toluca, 1993). Se aplicaron nuevas vertientes ingenieriles y arquitectónicas con aplicaciones sismorresistentes, mamposterías y cimientos con zapatas aisladas, contratraveses de liga, columnas de metal, soportes estructurales en construcciones de grandes dimensiones, entre otras. En este periodo se construyen aproximadamente 693 939 viviendas, cifra similar al crecimiento del fondo habitacional del siglo XIX.

Figura 7. Mapa de Vulnerabilidad estructural aplicando el criterio de las edades constructivas. Donde, 1: Colonia Centro, 2: Barrio de Santa Clara, 3: Barrio de San Miguel Apinahuizco, 4: Barrio San Bernardino y 5: Colonia Reforma y Ferrocarriles Nacionales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Distribución del fondo habitacional de la Ciudad de Toluca por los intervalos de tiempo: Siglo XVI-XVII, Siglo XVIII, Siglo XIX y Siglo XX-XXI.

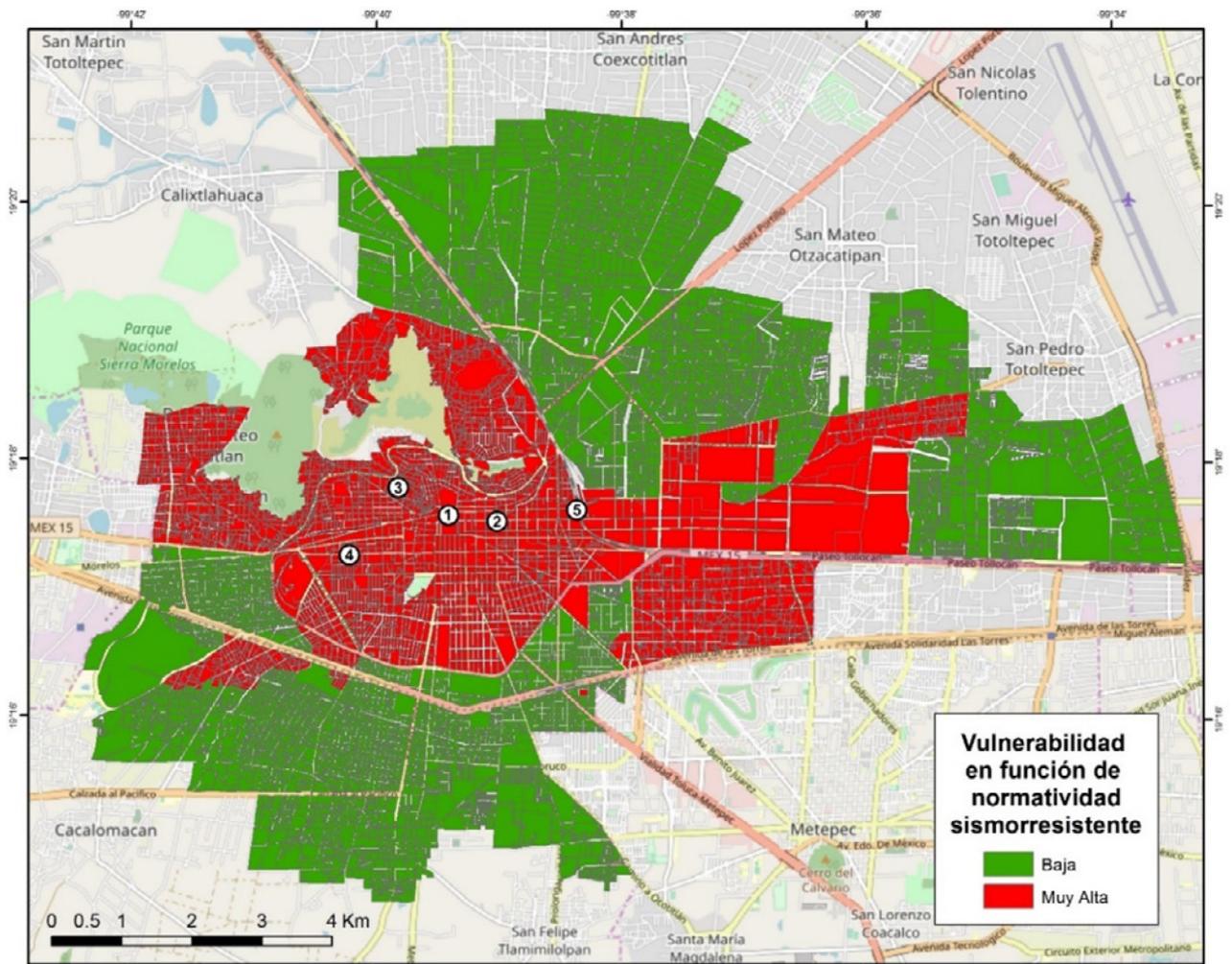


Fuente: Elaboración propia.

3.3. Análisis de la vulnerabilidad estructural según la puesta en vigor de la normatividad sismorresistente para la Ciudad de Toluca

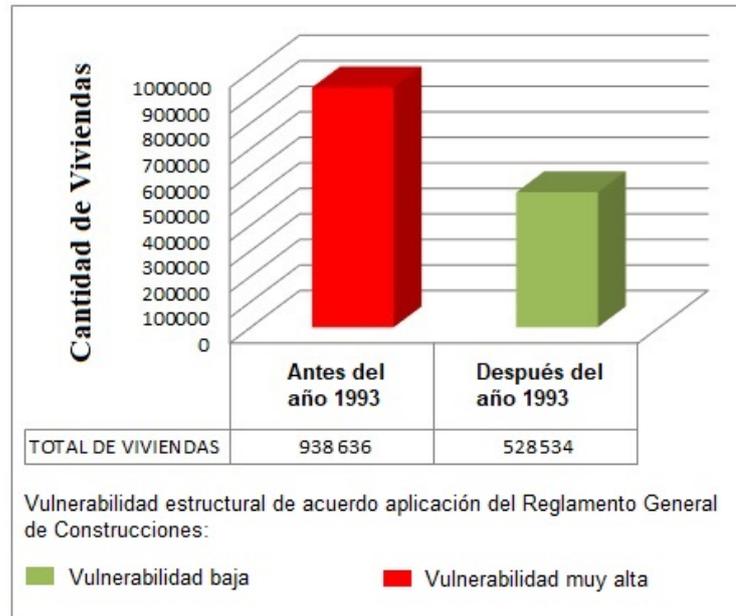
La puesta en vigor de las normativas de 1993 que inducen a mejoras en las técnicas constructivas de seguridad, frente a un sismo, es un elemento clave en la reducción de la vulnerabilidad estructural en los entornos urbanos. La Ciudad de Toluca contaba con 3179 manzanas para el año 1993, y posteriormente creció en 1989 manzanas más, hasta la actualidad (Figuras 9 y 10). En este caso la ubicación en el tiempo del fondo habitacional construido, indica que más del 50% de las viviendas (938 636), no se erigieron bajo el Reglamento General de Construcciones.

Figura 9. Mapa de Vulnerabilidad estructural en función de la puesta en vigor de la Norma Sismorresistente de la Ciudad de Toluca en el año 1993. Donde, 1: Colonia Centro, 2: Barrio de Santa Clara, 3: Barrio de San Miguel Apinahuizco, 4: Barrio San Bernardino y 5: Colonia Reforma y Ferrocarriles Nacionales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Cantidad de viviendas para la Ciudad de Toluca para los periodos: “Antes del Año 1993” y “Después del Año 1993”. Los dos periodos seleccionados están en correspondencia con la aplicación del Reglamento General de Construcciones del Municipio de Toluca (Gobierno Municipal de Toluca (1993).



Fuente: Elaboración propia.

3.4. Vulnerabilidad estructural frente a sismos para la Ciudad de Toluca

La estimación cualitativa de la vulnerabilidad estructural del fondo habitacional de la Ciudad de Toluca consideró la *Tipología Constructiva*, la *Edad de las construcciones* y la posible *Aplicación de la Norma Sismorresistente*, combinándose los tres mapas con operaciones de superposición y aplicando la matriz plasmada en la tabla 5.

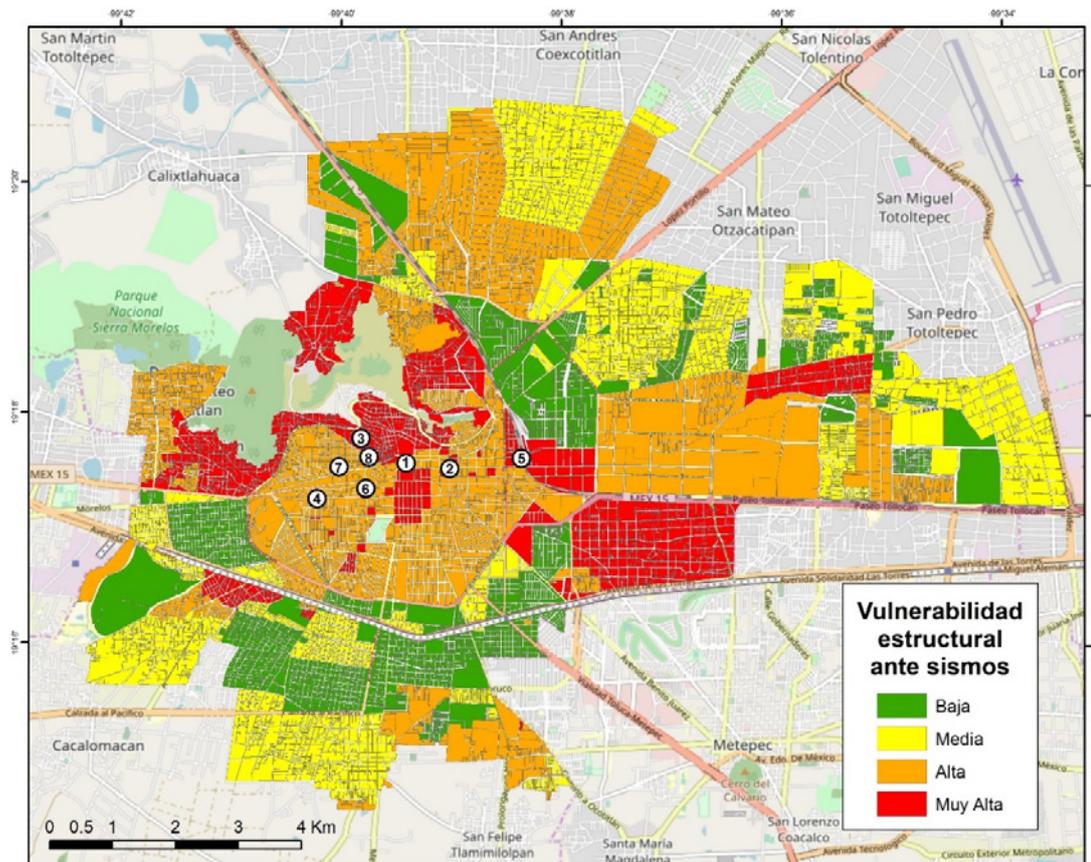
Tabla 5. Matriz para el análisis cualitativo de la vulnerabilidad estructura del fondo habitacional.

Criterios de Vulnerabilidad estructural considerados para el fondo habitacional de la Ciudad de Toluca			Vulnerabilidad estructural del fondo habitacional a partir de la combinación de criterios
Tipología Constructiva	Edad de las construcciones	Aplicación de la Norma Sismorresistente	
Baja	Baja	Baja	Baja
Baja	Baja	Media	Baja
Baja	Baja	Alta	Media
Media	Media	Media	Media
Media	Media	Alta	Media
Media	Media	Baja	Media
Baja	Media	Alta	Media
Baja	Alta	Alta	Alta
Media	Alta	Alta	Alta
Alta	Alta	Alta	Alta

Fuente: Elaboración propia.

La situación más desventajosa, en caso de un sismo de magnitud moderada o alta, la deben experimentar las viviendas ubicadas en manzanas de “Muy Alta Vulnerabilidad” (866), las cuales representan el 17 % del total localizadas en un sector del centro de la ciudad y en las Colonias: Barrio de la Merced, Sor Juana Inés de la Cruz y Barrio de la Retama, entre otras (Figura 11).

Figura 11. Mapa de Vulnerabilidad estructural para las viviendas de la Ciudad de Toluca. Donde, 1: Colonia Centro, 2: Barrio de Santa Clara, 3: Barrio de San Miguel Apinahuizco, 4: Barrio San Bernardino, 5: Colonia Reforma y Ferrocarriles Nacionales, 6: Barrio de la Merced, 7: Sor Juana Inés de la Cruz y 8: Barrio de la Retama.



Fuente: Elaboración propia.

En las manzanas catalogadas de “Muy Alta Vulnerabilidad Estructural”, existe un predominio evidente de tipologías constructivas H1 (material de Adobe) y H2 (zapatas corridas de dimensiones mínimas y muros de adobe), construidas especialmente entre los siglos XVI y XVII. En esta situación habitan 95 428 personas. El segundo lugar, lo constituyen las 1430 manzanas de “Alta Vulnerabilidad”, donde se ubican 38 852 viviendas. Como característica distintiva se define el predominio de tipologías constructivas “H1” con materiales de adobe, con cimientos y muros de piedra. Según el periodo constructivo en que se desarrolló este sector de la ciudad, aún no estaba vigente el Reglamento General de Construcciones del Municipio de Toluca. Especialmente estas manzanas surgen en el siglo XVIII y en la actualidad habitan 122 886 personas.

Los dos niveles de vulnerabilidad estructural del fondo habitacional descritos, constituyen los escenarios más desfavorables, donde aplica perfectamente el calificativo de “vulnerabilidad construida”, descrito por Hernández-Santana et al. (2017), especialmente para urbanizaciones crecientes en condiciones de vulnerabilidad y peligro significativas.

4. Discusión de los resultados. La vulnerabilidad estructural como una fuente invisible de peligro ante sismos

Los resultados de esta investigación colocan en perspectiva el contexto real del escenario de vulnerabilidad del fondo habitacional de la Ciudad de Toluca. Las figuras 12 y 13, son escenas que ilustran aproximadamente los escenarios de vulnerabilidad y su relación con la población y el fondo habitacional. Los productos obtenidos constituyen la primera aproximación cartográfica aplicada a la vulnerabilidad estructural de la ciudad de Toluca, una ciudad de aproximadamente 489 333 habitantes, en donde, no existe un antecedente que permita comparar y discutir los resultados obtenidos. Sin embargo, es posible comparar la metodología empleada en este caso de estudio, con otras similares, y definir áreas de mejoras para esta aplicación.

Entre las aplicaciones metodológicas análogas a la de esta investigación, se ubica la evaluación sísmica de edificios urbanos a partir de datos geoespaciales para la Delegación Benito Juárez de la Ciudad de México (García, 2015) que considera: tipología, sistema estructural empleado, resistencia de materiales, aplicación de la normativa de construcción (vectorial y ráster). Resulta interesante el análisis realizado por García (2015), para determinar la irregularidad en la base de las estructuras constructivas, empleando herramientas SIG. La irregularidad en planta (en la base), así como también la irregularidad vertical, son factores estructurales que inciden notablemente en el nivel de daños frente a solicitudes sísmicas. Esto puede ser incluido, en etapas posteriores para el caso de la Ciudad de Toluca, especialmente en las manzanas de alta y muy alta vulnerabilidad estructural. Al respecto, González y Gómez (2008), habían realizado un análisis de los efectos de la irregularidad en planta, donde afirman que las irregularidades son uno de los errores más frecuentemente causantes de daños durante un terremoto.

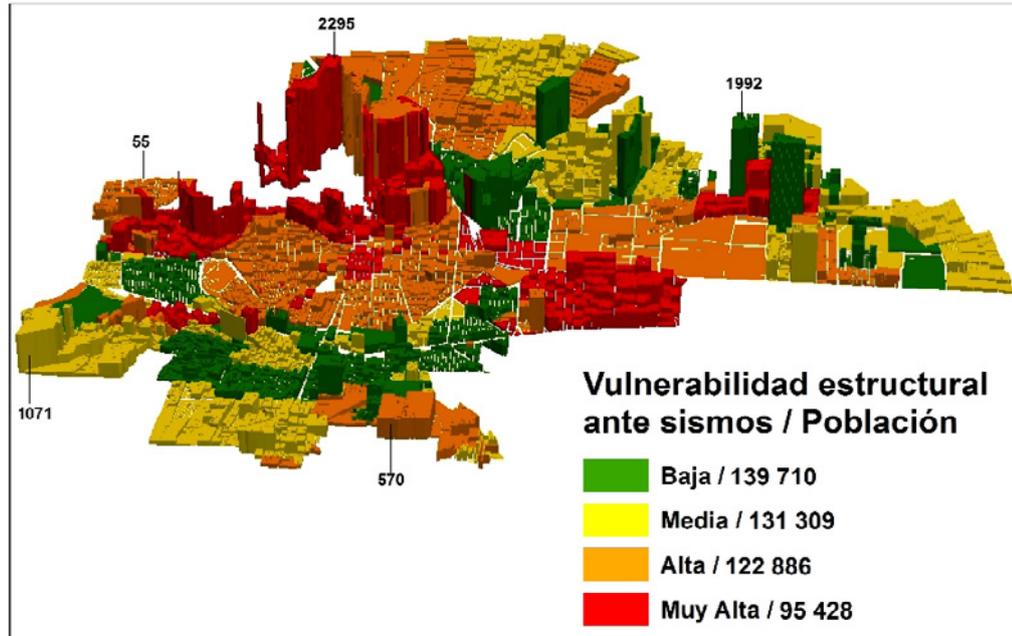
Iglesias *et al.* (2006), aunque fuera de las fronteras mexicanas, aporta importantes elementos metodológicos, que pueden ser incluidos en fases posteriores para el caso de la Ciudad de Toluca. Con el apoyo de los sistemas de información geográfica, realizaron el análisis del riesgo sísmico en la Ciudad de Granada (España). Para lo cual, en el caso mexicano se debe evolucionar especialmente en la determinación de la respuesta sísmica local. En el análisis de la vulnerabilidad estructural, existen puntos coincidentes entre el trabajo Iglesias *et al.* (2006) y el que aquí se presenta; especialmente al considerarse en ambos trabajos, las variables “calidad de las edificaciones” y “la aplicación de la normativa legal y técnica”. Otros trabajos, con buenas prácticas en el tratamiento de información catastral, aplicados al análisis de la vulnerabilidad sísmica en entornos urbanos, pueden ser consultados en Lantada (2007), Fernández- Castanys (2012), Kassaras *et al.* (2015), Lestuzzi *et al.* (2016).

Las investigaciones futuras en Toluca deben robustecer estudios en materia de vulnerabilidad, peligro y riesgo sísmico. Derivado de esto, se considera el trabajo como una aproximación a la vulnerabilidad del fondo habitacional, muy lejos de una alarma sobre daños evidentes para la ciudad, especialmente tratándose de la aplicación de una metodología cualitativa. Para lograr un mejor acercamiento al contexto real, sería necesario el análisis de efecto de sitio, así como profundizar en el estudio de vulnerabilidad a escala de edificio.

Además, se deben obtener funciones de vulnerabilidad para las edificaciones típicas de la Ciudad de Toluca, y analizar la vulnerabilidad estructural para edificios individuales que sean de interés patrimonial, social u otros. También se debe realizar el análisis del efecto de sitio a partir de las condiciones geotécnicas sobre las cuales se desarrolla la ciudad y continuará su crecimiento in-

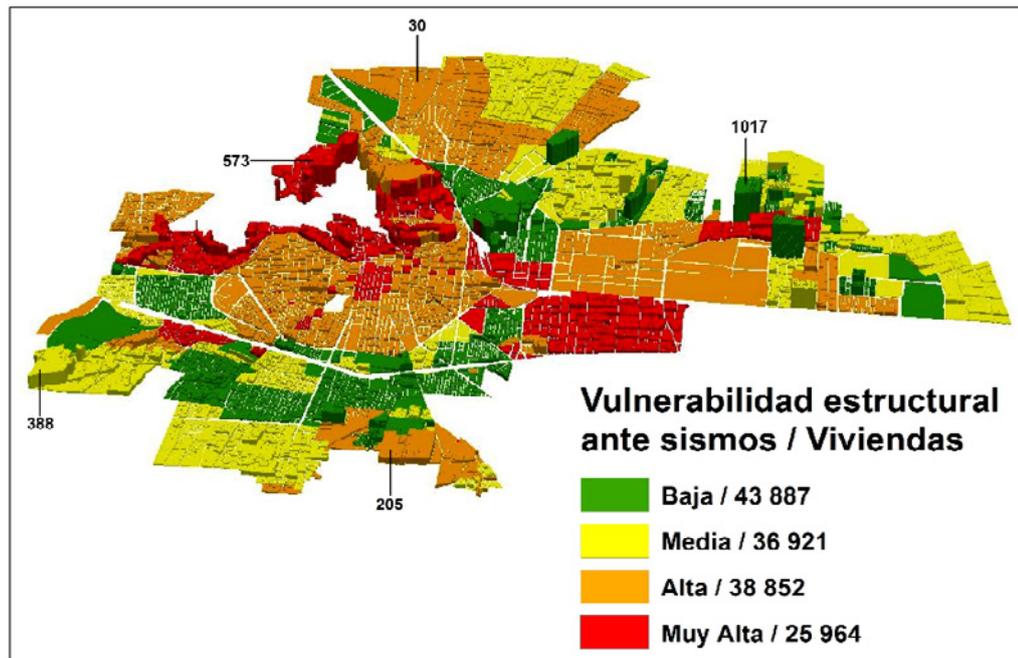
mediato. Este punto, permitirá conocer parámetros de los suelos y rocas, como el periodo dominante de diseño, posibilidades de amplificación de las ondas sísmicas o factor de amplificación y la susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos inducidos por los sismos, como la licuefacción y rupturas de fallas en superficie.

Figura 12. Escena que representa los niveles de vulnerabilidad estructural frente a sismos y su relación espacial con la población.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Escena que representa los niveles de vulnerabilidad estructural frente a sismos y su relación espacial con el fondo habitacional.



Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

El análisis cualitativo de la vulnerabilidad estructural permitió identificar cuatro niveles de vulnerabilidad para el fondo habitacional de la Ciudad de Toluca, destacando como casos más extremos 866 manzanas en el nivel de vulnerabilidad muy alta y 1430 clasificadas con alta vulnerabilidad, donde residen 218 314 personas. Los resultados obtenidos deben considerarse como una primera aproximación a escala de manzana de la concentración espacial de los elementos expuestos, y pueden ser empleados en la toma de decisiones en la reducción de vulnerabilidad estructural durante el proceso de gestión de riesgos.

Finalmente, se realizó una revisión bibliográfica de un grupo de trabajos que mejorarían sustancialmente los subsiguientes análisis de vulnerabilidad estructural y los diseños estructurales de cara al futuro en la Ciudad de Toluca. Entre las principales sugerencias se ubica la obtención de funciones de vulnerabilidad para las edificaciones típicas de la ciudad, analizar el efecto de sitio a partir de las condiciones geotécnicas y esclarecer dentro del escenario urbano, parámetros como el periodo dominante de diseño de acuerdo a la geología local, posibilidades de amplificación de las ondas sísmicas o factor de amplificación y la susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos inducidos por los sismos como puede ser la licuefacción o la ruptura de fallas en superficie.

6. Bibliografía

- Acevedo, V. & Hernández, J. (2017). Foto publicada el 19 de septiembre del 2017 en https://twitter.com/8_Columnas/status/910266794778165248/
- Alcahuamán, R. (2013). *Análisis de riesgo sísmico del centro poblado "San Isidro" usando sistemas de información geográfica (SIG)* (Informe de Suficiencia para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil). Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima.
- Auvinet, G., Méndez, E., Juárez, M., Hernández, F. & Martínez, O. R. (2015). *Riesgos geotécnicos en las principales zonas urbanas del Estado de México*. Informe Técnico. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Caballero, A. R. (2007). *Determinación de la vulnerabilidad sísmica por medio del método del índice de vulnerabilidad en las estructuras ubicadas en el centro histórico de la Ciudad de Sincelejo, utilizando la tecnología del sistema de información geográfica* (Tesis de Maestría). Universidad del Norte, Barranquilla.
- Climent, A., Salgado, D., Slob, S. & Van-Westen, C. (2003). Amenaza sísmica y vulnerabilidad física de la ciudad de Cañas, Guanacaste, Costa Rica. En el Informe del Proyecto Regional Action Program Central America (RAP-CA) subprograma del Capacity Building for Natural Disaster Reduction Program (CBNDR) de UNESCO. Recuperado de/ Retrieved from <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20v2.0/CEDO/pdf/spa/doc15075/doc15075.htm/>
- Comisión de Gobierno (2017). Gaceta Parlamentaria de la Asamblea Legislativa de la Ciudad de México. En *VII Legislatura. No. 186*. Recuperado de/Retrieved from <http://aldf.gob.mx/gaceta-parlamentaria-903-1.html>.
- Comisión Nacional de los Derechos Humanos (2018). Descoordinación entre instancias de gobierno, opacidad e inconsistencia en la información y en el manejo de recursos, así como resultados insuficientes en las tareas de reconstrucción y en las acciones preventivas, son el saldo de los sismos de septiembre de 2017. En *Comunicado de Prensa DGC/269/18*. Recuperado de/Retrieved from http://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/Comunicados/2018/Com_2018_269.pdf
- Consultores en Riesgos y Desastres (2009). Evaluación probabilista de riesgos en Centro América Guatemala. Recuperado de/Retrieved from https://ecapra.org/sites/default/files/documents/ERN-CAPRA-R3-T1.1B%20-%20Revisi%C3%B3n%20de%20Eventos%20Hist%C3%B3ricos_GUA.pdf
- El Pulso del Estado de México (2017). Foto publicada el 23 de septiembre del 2017 en el Periódico El Pulso del Estado de México en <https://elpulsoedomex.com.mx/reporta-ayuntamiento-tenango-del-valle-conteo-afectaciones-sismo-del-martes-19-septiembre/>

- Expósito, J. L. (2012). *Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- Fernández-Castany, M. F. (2012). *Elaboración de escenarios de daños sísmicos en la Ciudad de Granada* (Tesis de doctorado). Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos. Universidad de Granada.
- García, J. H. (2015). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios urbanos a partir de datos geoespaciales* (Tesis de Maestría). Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, A.C., Ciudad de México.
- García, M. L., Adame, S. & Sánchez, R. M. (2015). Expansión metropolitana de Toluca: caso de estudio municipio de Calimaya, México. *Quivera*, 17, (1), 35-53. Recuperado de/Retrieved from <https://www.redalyc.org/jatsRepo/401/40140031003/html/index.html>
- Gobierno de Haití (2010). Plan de Acción para la recuperación y el desarrollo de Haití. Recuperado de/Retrieved from <http://whc.unesco.org/document/106246/>
- Gobierno del Estado de México (2009). *Gaceta del Gobierno del Estado de México*. Tomo CLXXXVII, No. 1, 1 de enero del 2009. Toluca de Lerdo, México.
- Gobierno Municipal de Toluca (1993). *Reglamento General de Construcciones del Municipio de Toluca*. H. Ayuntamiento de Toluca.
- Gobierno Municipal de Toluca (2009). *Código Reglamentario del Municipio de Toluca*.
- González, C. (2017). Foto publicada el 19 de septiembre en el Periódico DigitalMex en <https://www.digitalmex.mx/municipios/story/1118/tenancingo-y-tenango-claman-ayuda-200-casas-afectadas-tras-el-sismo/>
- González, R. & Gómez, C. (noviembre de 2008). "Efectos de la irregularidad en planta por forma arquitectónica". En *XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, Veracruz, México.
- Hernández-Santana, J. R., Méndez, A. P.; Ordaz, A. & Baró, J. E. (2017). Vulnerabilidad construida. Una mirada geomorfológica y geodinámica. En M.F. Rodríguez (Coord.), *Factores de vulnerabilidad en la construcción del riesgo*. México: UNAM e Itaca.
- Iglesias, S., Irigaray, C. & Chacón, J. (2006). Análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas mediante sistemas de información geográfica. Aplicación a la Ciudad de Granada. *Cuadernos Geográficos*, 39 (2), 147-166. Recuperado de/Retrieved from <https://www.ugr.es/~cuadgeo/docs/articulos/039/039-009.pdf>
- Instituto de Información e Investigación, Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México, IGCEM (2018). *Cartografía a nivel manzana aplicable al 2018*. Recuperado de/Retrieved from <http://igcem.edomex.gob.mx/productos-servicios/servicios-catastrales/cartografia-por-manzana-2018/>
- Instituto Nacional de Antropología e Historia, INHA (2010). Catálogo Nacional de Monumentos Históricos. Estado de México. Tomo III. 1183-1880.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Recuperado de/Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Kassaras, I., Kalantoni, D., Pomonis, A., Kouskouna, V., Karababa, F. & Makropoulos, K. (2015). Development of seismic damage scenarios in Lefkada old town (W. Greece): part I-vulnerability assessment of local constructions with the use of EMS-98. *Bulletin of Earthquake Engineering*, (13), 799-825.
- Kates, R., Haas, E., Amaral, D., Olson, R., Ramos, R. & Olson, R. (1973). Impacto humano del terremoto de Managua. *Encuentro: Revista Académica de la Universidad Centroamericana*, (3), 56-71. <http://repositorio.uca.edu.ni/2164/>
- Kramer, Steven (2014). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Printed in the United States of America: Prentice-Hall. International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.
- Lantada, M. N. (2007). *Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la Ciudad de Barcelona*. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Lestuzzi, P., Podestà, S., Luchini, C., Garofano, A., Kazantzidou-Firtinidou, D., Bozzano, C., Bischof, P., Haffter, A., & Rouiller, J. D. (2016). Seismic vulnerability assessment at urban scale for two typical Swiss cities using Risk-UE methodology. *Natural Hazards*, (84), 249-269.
- Martínez, S. (2014). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica urbana basada en tipologías constructivas y disposición urbana de la edificación. Aplicación en la Ciudad de Lorca, Región de Murcia* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid.

- Milenio (2017). Foto publicada en el periódico Digital Milenio, en <https://www.milenio.com/estados/el-temblor-en-edomex?image=2>
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile (2012). *Informe final de fallecidos y desaparecidos por comunas*. Recuperado de/Retrieved from https://web.archive.org/web/20140429161238/http://www.interior.gob.cl/filesapp/listado_fallecidos_desaparecidos_27Feb.pdf
- Moehle, J., Riddell, R. & Boroschek, R. (2010). The Mw 8.8 Chile Earthquake of February 27, 2010. EERI Special Earthquake Report, 10 (June), 1-20. Recuperado de/Retrieved from https://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2010_pdf/Chile10_insert.pdf
- Morales, R. (2010). Terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010. Efectos urbanos en localidades de la provincia de Arauco. *Urbano*, 13, (22), 43-62. Recuperado de/Retrieved from <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RU/article/view/305>
- Ordaz, A., Hernández, J. R. & Saeed, A. (2015). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica para la Ciudad de San Cristóbal. *Avances*, 147 (2), 155-164. Recuperado de/Retrieved from <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/7>
- Pérez, E. F. (2005). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica estructural del Barrio San Antonio en la zona 6 de la Ciudad de Guatemala* (Tesis de Ingeniero). Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Ramírez, H., Vera, R., Rivera, J. L., Pérez, J. & Manjarrez, L. (2002). "Propuesta de reglamento de construcciones para el Municipio de Toluca". En el XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. Puebla, México. Recuperado de/Retrieved from http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_12/te_08/ar_02.pdf
- Rosenblueth, E., García, V., Rojas, T., Núñez, F. J. & Orozco, J. (1992). *Macrosismos*. Ciudad de México: Impresores Cuadratín y Medio.
- Safina, S. (2003). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico* (Tesis doctorado). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Sauter, F. (1989). *Fundamentos de Ingeniería Sísmica 1. Introducción a la Sismología*. San José: Tecnológica de Costa Rica.
- Secretaría de Desarrollo Urbano (2014). *Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca*. Recuperado de/Retrieved from <https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/gct/2014/sep123.PDF>
- UNISDR (2015). "Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción del Riesgo de Desastres". Conferencia llevada a cabo del 14 a 18 de marzo de 2015, Sendai, Japón.
- Wald, D., Quitoriano, V., Heaton, T., & Kanamori, H., (1999). Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California". *Earthquake Spectra*, 15 (3), 557-564.

Sobre los autores

ALEXIS ORDAZ HERNÁNDEZ

Doctor en Ciencias Técnicas (2014), Master en Geología (2010) e Ingeniero Geólogo (2002); por la Universidad "Hermanos Saíz Montes de Oca" de Pinar del Río, Cuba. Actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Desarrolla la línea de investigación sobre Riesgos Socio-Naturales.

JAIME AMADOR HERNÁNDEZ MILLÁN

Licenciado en Geografía por la Universidad Autónoma del Estado de México, UAEMex (2018); actualmente compagina sus estudios de Licenciatura en Ingeniería Civil en la Facultad de Ingeniería de la UAEMex. Profesor de Nivel Básico Secundaria General, Gobierno del Estado de México (2019) y Administrativo por la empresa ALCER ALIMENTOS S.A. de CV (2017). Se desempeña en temas de riesgos físicos, ingeniería estructural y educación.

JUAN CARLOS GARATACHIA RAMÍREZ

Licenciado en Geografía (2013) y Especialista en Cartografía Automatizada, Teledetección y Sistemas de Información Geográfica por la Universidad Autónoma del Estado de México (2015) Maestro en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México (2017). Técnico Académico de la Facultad de Geografía en la Universidad Autónoma del Estado de México (2019). Sus principales líneas de investigación son el análisis de la dinámica superficial terrestre y el análisis de peligros naturales mediante geotecnologías.