

# APROXIMACIÓN CARTOGRÁFICA A LA RESPUESTA SÍSMICA LOCAL EN LA CIUDAD DE TOLUCA, MÉXICO: UNA CONTRIBUCIÓN A LA REDUCCIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES

Alexis Ordaz Hernández<sup>1\*</sup>

## RESUMEN

La gestión de los escenarios urbanos requiere de productos cartográficos que reflejen componentes sociales, económicos, ambientales y físicos. El artículo constituye una contribución al conocimiento actual del componente físico de la ciudad de Toluca, México. Se analizó la respuesta sísmica de los suelos y rocas que conforman el subsuelo de la ciudad, y se derivaron productos cartográficos que permitirán gestionar el perímetro urbano. La metodología se sustenta en la interpretación de las condiciones geológicas superficiales, con énfasis en las variables con mayor influencia en la respuesta sísmica local. Con sustento en las características geotécnicas de los materiales geológicos del sitio, se estima el contraste de impedancia ( $I_c$ ) y el periodo dominante del terreo ( $T$ ). Los resultados permiten resumir en cuatro cortes típicos las condiciones geológicas, constituyendo un insumo esencial para la interpretación de microzonaciones sísmicas que se realicen posteriormente. Se obtiene la cartografía del contraste de impedancia y del periodo dominante, donde se identifican valores de  $I_c$  por encima de 3,0 y de  $T$  superiores a 1,0s. Los valores citados, sugieren áreas susceptibles a amplificar las ondas sísmicas y constituye información relevante para la planeación urbana, y justificarían la aplicación de medidas para la reducción de la vulnerabilidad estructural.

## PALABRAS CLAVES

Ciudad de Toluca; Respuesta sísmica; Planeación urbana; Componente físico; Escenarios urbanos; México

CARTOGRAPHIC APPROACH TO LOCAL SEISMIC RESPONSE IN TOLUCA CITY, MEXICO: A CONTRIBUTION TO DISASTER RISK REDUCTION

## ABSTRACT

The management of urban areas requires cartographic products that reflect social, economic, environmental and physical components. This article is a contribution to the current knowledge of the physical component of Toluca city, Mexico. The article analyzes the seismic response of soils and rocks that make up the city's subsoil, and cartographic products were introduced informing the management of the urban perimeter. The methodology is based on the interpretation of surface geological conditions, with emphasis on the variables with the greatest influence on the local seismic response. Based on the geotechnical characteristics of the geological materials of the site, the impedance contrast ( $I_c$ ) and the dominant period of the terrain ( $T$ ) are estimated. In the results, the geological conditions are summarized in four typical sections, these constitute an essential input for the interpretation of future seismic microzonations. Likewise, the mapping of the impedance contrast and the dominant period is obtained, where  $I_c$  values above 3.0 and  $T$  above 1.0s are identified. The values mentioned, suggest areas susceptible to amplifying seismic waves and constitute relevant information for urban planning, and would justify the application of measures to reduce structural vulnerability.

## KEYWORDS

Toluca City; Seismic response; Urban Planning; Physical component; Urban scenarios; México

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

\*Autor de correspondencia: aordazh@uaemex.mx

## DOI:

<http://doi.org/10.55467/reder.v6i2.97>

## RECIBIDO

9 de mayo de 2022

## ACEPTADO

12 de junio de 2022

## PUBLICADO

1 de julio de 2022

## Formato cita

### Recomendada (APA):

Ordaz Hernández, A. (2022). Aproximación Cartográfica a la Respuesta Sísmica Local en la Ciudad de Toluca, México: Una Contribución a la Reducción de Riesgos de Desastres. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 6(2), 60-71. <http://doi.org/10.55467/reder.v6i2.97>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

*Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)*

Diseño: Lupe Bezzina

## INTRODUCCIÓN

Los espacios urbanos concentran un importante volumen de elementos expuestos. En ellos se sitúan los principales centros comerciales, escuelas, espacios residenciales, donde las comunidades realizan sus actividades cotidianas. La infraestructura emplazada tiene diferentes niveles de vulnerabilidad estructural en función de la tipología constructiva, edad, nivel de mantenimiento de los edificios, entre otros. En este contexto, y de acuerdo a la ubicación geográfica puede favorecerse la materialización del riesgo sísmico. Cardona (2001) indica que, desde la propia definición de riesgo sísmico, este debe ser analizado desde un punto de vista multidisciplinar, esta afirmación precisa la complejidad de su gestión.

El área geográfica del continente americano, con su relieve, islas, configuración de costas, actividad volcánica y sismicidad, son el resultado de complejos procesos tectónicos, explicados a través de la tectónica de placas (Álvarez et al., 2019). Donde, los paisajes continúan su evolución, como es el caso de la separación de Baja California de México, proceso que se ha desarrollado especialmente en los últimos 20 millones de años (Tarbuck y Lutgens, 2005).

La sismicidad en México ha provocado importantes impactos sociales y económicos. Según el catálogo del Servicio Sismológico Nacional de México (SSN, 2021), del 1980 a 2020 se reportaron 155 terremotos con magnitudes entre 6,0 y 8,2 en la escala de Richter. Donde, los más devastadores ocurrieron el 19 de septiembre de 1985 (8,1 grados) y el 19 de septiembre de 2017 (7,1 grados). El terremoto de 1985 provocó más de 30 000 heridos, 6 000 decesos, el colapso de 30 000 viviendas y daños a otras 60 000. Mientras el evento del 2017, provocó la pérdida de 491 vidas humanas y un impacto económico de aproximadamente 61 mil 143 millones de pesos (CENAPRED, 2020).

Un antecedente relevante, para el presente trabajo, se deriva de las afectaciones provocadas por el terremoto de 7,1 grados en la escala de Richter del 19 de septiembre de 2017, que causó daños leves en algunos edificios de la ciudad de Toluca, por ejemplo: Edificio de la Normal de Maestros No.1 de Toluca, Palacio de Gobierno, Museo de la Santa Inquisición, Edificio de Rectoría de la Universidad Autónoma del Estado de México, entre otros. Un segundo elemento a destacar, es la alta concentración de población, donde según el conteo censal del año 2015, la población total en el Municipio de Toluca es de 910 608 habitantes, donde el 93% reside en la zona urbana. Ambos antecedentes justifican la necesidad de analizar la respuesta sísmica de los suelos y rocas que conforman el subsuelo de la ciudad de Toluca y derivar productos cartográficos que permitan gestionar la planeación urbana en aras de la resiliencia.

## METODOLOGÍA

### Caracterización del área de estudio

El municipio de Toluca cubre 425 km<sup>2</sup> del Estado de México, con un área urbana de 285 km<sup>2</sup>. El trabajo se enfoca en la zona urbana, definida como ciudad de Toluca en el presente artículo, con centro en las coordenadas geográficas los 19° 17'29" de latitud norte, 99° 39'38" de longitud oeste (ver Figura 1).

El perímetro urbano de la ciudad de Toluca se enclava en el Valle de Toluca, una llanura rodeada de montañas volcánicas a 2 650 metros sobre el nivel del mar, constituyendo una de las ciudades más altas de América. Desde el punto de vista administrativo, se compone de 263 localidades, de las cuales 87 corresponden a colonias, 58 a barrios, 53 a condominios, 39 a fraccionamientos. Desde el año 2000, la población del Municipio de Toluca ha presentado tendencias constantes de crecimiento con una tasa media anual de 1.57 %, donde se ha incrementado la población, de 666 596 a 910 608 habitantes (Gobierno Municipal de Toluca, 2021).

Recientemente se realizó el estudio de la vulnerabilidad ante sismos del fondo habitacional, empleando una metodología cualitativa (Ordaz et al., 2020). El trabajo identificó que 866 manzanas presentan muy alta vulnerabilidad, donde habitan 95 428 personas. Las manzanas señaladas, son generalmente de uso habitacional, y existe predominio 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.

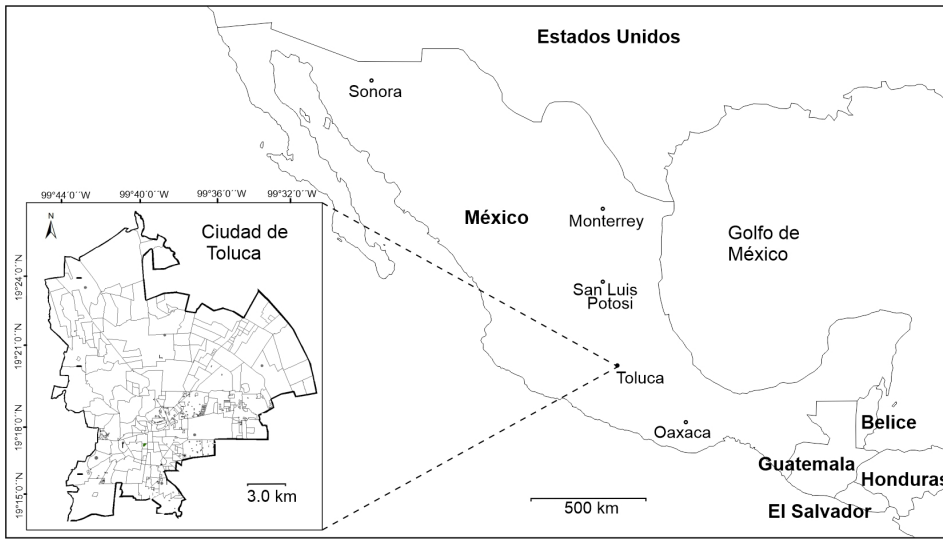


Figura 1. Ubicación Geográfica de la ciudad de Toluca, México  
Fuente: Autor, 2022.

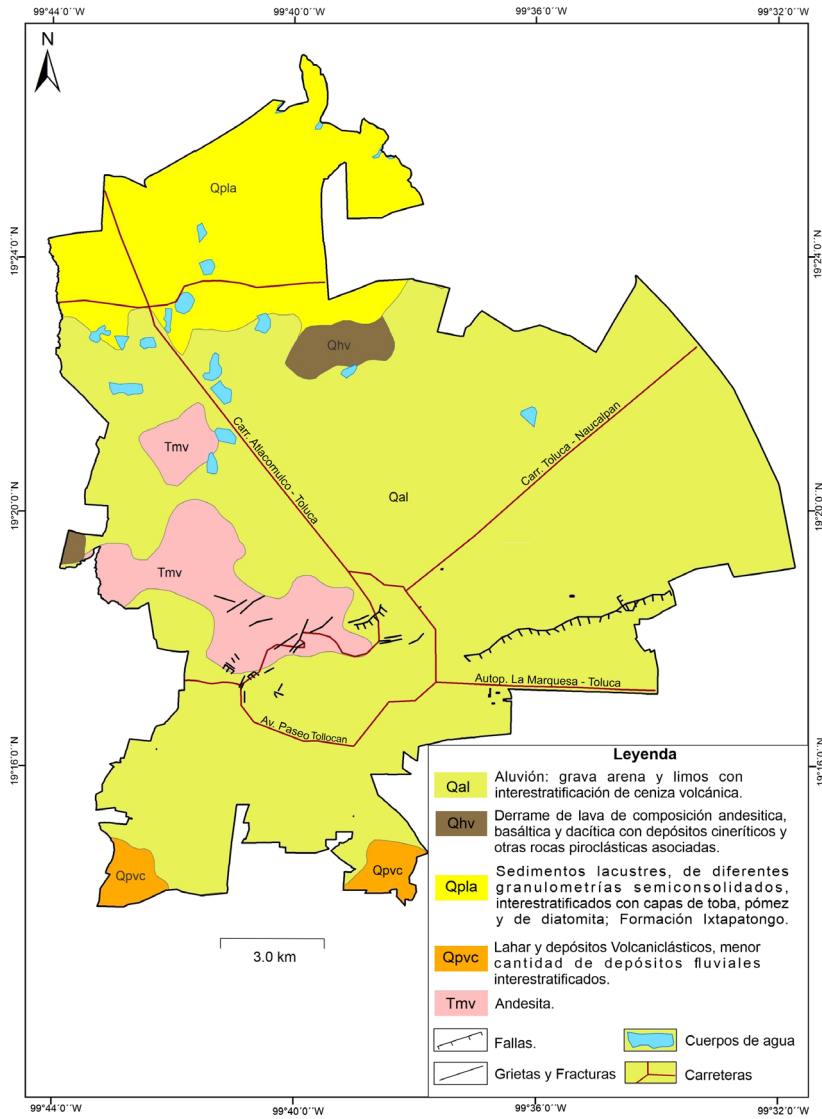


Figura 2. Geología superficial y rasgos estructurales  
Fuente: Autor, 2022, modificado de IFOMEGEM (1994). Se incluyen la disposición espacial de fallas y fracturas de Ángeles-Moreno et al. (2021).

Al contexto de vulnerabilidad expuesto, se agregan las condiciones estratigráficas locales, sobre las que se asienta la infraestructura (ver Figura 2). En este sentido, la revisión de 43 columnas estratigráficas elaboradas por Expósito (2012), demuestran la existencia de potentes espesores de suelos pocos consolidados de hasta 100 metros. Esta información, es confirmada posteriormente por Auvinet et al. (2015) en la zonación geotécnica para el Valle de Toluca, donde reportan la presencia de depósitos lacustres, aluviales lacustres, aluviales, rocas y suelos firmes. Los materiales sedimentarios de baja densidad provocan amplificaciones locales de las ondas sísmicas (Salinas-Jasso et al., 2019), y son responsables de fenómenos inducidos como la licuefacción, especialmente en condiciones de saturación.

La caracterización del área de estudio hasta aquí realizada, desde el punto de vista social, de vulnerabilidad estructural y de condiciones geológicas; sumado al contexto geotectónico de México que ha generado históricamente terremotos de alta energía (Pérez-Gavilán et al., 2018), refuerzan la necesidad del análisis de la respuesta sísmica local. En esta investigación, y como un aporte esencial en la reducción de riesgos de desastres, se pretende generar los siguientes productos: (1) Cortes estratigráficos representativos para la ciudad de Toluca, (2) Cartografía del contraste de impedancia y (3) Cartografía de la susceptibilidad a la amplificación sísmica según los valores de periodos dominantes. En el próximo apartado se describirá el procedimiento seguido para la obtención de los tres productos enunciados.

### **Materiales y métodos**

Desde el punto de vista teórico, la investigación se enmarca en la geografía física, la cual se incluye dentro de las ciencias ambientales. La geografía física tiene un rol relevante en la sociedad, contribuye significativamente al conocimiento de la funcionalidad de los componentes de la corteza terrestre y a la relación de los humanos con ella (López-Bermúdez, 2002). Alejandro Von Humboldt, demostró la diversidad de fenómenos que se podrían estudiar desde la perspectiva física, mediante la interpretación de la dinámica de los procesos que actúan en la superficie terrestre (Humboldt, 1845).

En concordancia con lo expuesto, el objetivo del presente artículo, se sitúa perfectamente dentro de la geografía de los riesgos (componente de la Geografía física), formando una importante contribución a los estudios de riesgos sísmicos en sus primeras fases.

#### *Situaciones geológicas superficiales para el subsuelo de la ciudad de Toluca*

El tipo de material geológico (suelo o roca), su espesor y características geotécnicas, definen en gran medida la respuesta sísmica local en un escenario geográfico (Jasso, 2003 y Zambrana, 2019). En este primer apartado metodológico, se pretendió establecer las situaciones geológicas representativas, que conforman el subsuelo de la ciudad de Toluca. Para cada una de las situaciones (cortes estratigráficos), se realizó una descripción litológica, geotécnica e hidrogeológica. La precisión, en la obtención de este producto, robustece la interpretación de la cartografía obtenida en este trabajo, y la de futuros estudios de microzonificación sísmica (Romina et al., 2003). Como principales fuentes de información, se emplearon las descripciones de 43 pozos con fines hidrogeológicos y 74 pozos geotécnicos (ver Figura 3), obtenidos de Expósito (2012) y Sánchez (2020) respectivamente. También se consideraron descripciones contenidas en el Informe Riesgos geotécnicos en las principales zonas urbanas del Estado de México (Auvinet et al., 2015); y en menor medida (considerando el factor de escala) la memoria descriptiva de la carta geológica para el Estado de México 1: 250 000 (IFOMEGEN, 1994).

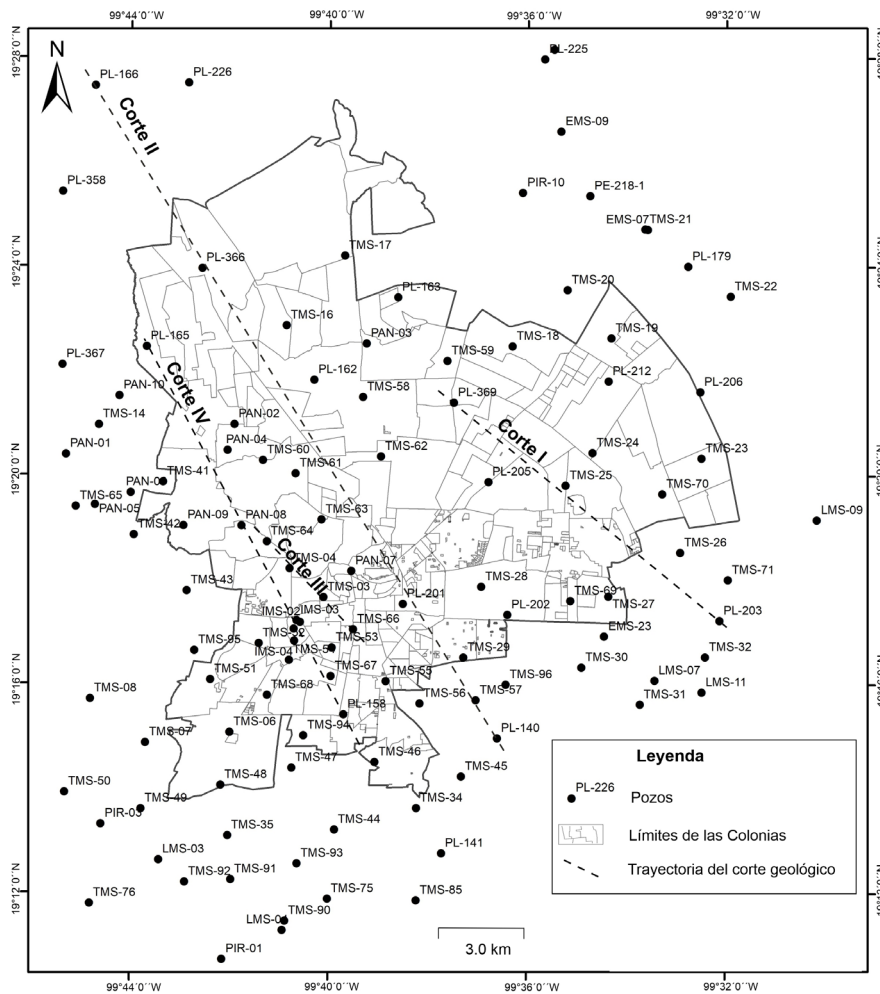


Figura 3. Sondeos geotécnicos e hidrogeológicos que se han realizado en el siglo XX y lo transcurrido del siglo XXI; que proporcionaron información para el análisis de las situaciones geológicas superficiales  
Fuente: Autor, 2022.

### Estimación del contraste de impedancia

Las vibraciones percibidas durante un terremoto en un escenario geográfico, depende de su distancia al epicentro, características de la fuente sísmica y de la atenuación de las ondas durante su trayectoria. Empleando los parámetros citados se puede estimar el movimiento sísmico para un sitio en roca, utilizando las ecuaciones de predicción de movimiento del terreno. Sin embargo, la situación descrita cambia de forma significativa, en caso de sitios conformados por capas de suelos de diferentes densidades y geometría irregular (espesor y continuidad lateral), desencadenando amplificaciones locales de las ondas sísmicas debido al contraste de impedancia (Boore, 2004; Chávez-García et al., 2014 y Palomino, 2016). Expresándose el contraste de impedancia ( $I_c$ ) como:

$$I_c = \frac{\rho_b \cdot V_b}{\rho_s \cdot V_s} \quad \text{con } V_b > V_s$$

Donde,  $\rho$  es la densidad y  $V$  es la velocidad de las ondas de corte. El subíndice  $b$  se refiere al sustrato rocoso y subíndice  $s$  representa al nivel no consolidado. La estimación del contraste de impedancia ( $I_c$ ) se realizó en las 117 columnas estratigráficas distribuidas dentro de la ciudad de Toluca y muy cerca de su perímetro (ver Figura 3), los valores obtenidos fueron interpolados usando el método de interpolación Inverso de la distancia (IDW).

La cartografía del contraste de impedancia, permite pronosticar sitios proclives al atrapamiento de las ondas sísmicas; que a su vez provocarían amplificación de las frecuencias características desencadenando importantes daños a la infraestructura. Teóricamente se explica, mediante el

desplazamiento de ondas sísmicas que transitan de un medio con velocidad de propagación rápida (roca) a uno con velocidad más baja (suelo) aumentando su amplitud (Chávez-García et al., 2014).

#### Susceptibilidad a la amplificación sísmica según los valores de periodos dominantes

El parámetro periodo dominante (T) se correlaciona con el grado de oscilación de los suelos en caso de un sismo, pudiéndose inferir que, a mayores valores de periodos dominantes, mayor será la amplificación provocada por las ondas de corte (Ordaz et al., 2012).

Para los cálculos de periodos dominantes (T), se analizaron las 117 columnas estratigráficas (ver Figura 3), donde solo se consideraron aquellas que reflejaban información a más de 15 metros de profundidad, y que, con apoyo de los cortes geológicos representativos (ver Figura 4), ofrecieran certidumbre de su comportamiento hasta al menos 30 m. En este caso de estudio, se empleó la relación propuesta por Bard (1985):

$$T = \frac{4H_s}{V_s}$$

Donde  $H_s$  representa el espesor de los sedimentos y  $V_s$  la velocidad de las ondas de corte. Para el presente trabajo, se consideraron los valores de  $V_s$  estimados por Sánchez (2020), donde emplea las ecuaciones empíricas de Dikmen (2009), y en los casos donde no existía información geotécnica se tomaron los valores sugeridos por FEMA (2003) para tipos litológicos similares a los estudiados en este caso de estudio.

## RESULTADOS

### Análisis de las condiciones geológicas superficiales para la ciudad de Toluca

La Figura 4 muestra las cuatro situaciones geológicas (litológicas), que representan de forma simplificada la geología superficial de la ciudad de Toluca. Los cortes obtenidos, son el resultado de las interpretaciones de un volumen importante de sondeos geotécnicos e hidrogeológicos (ver Figura 3).

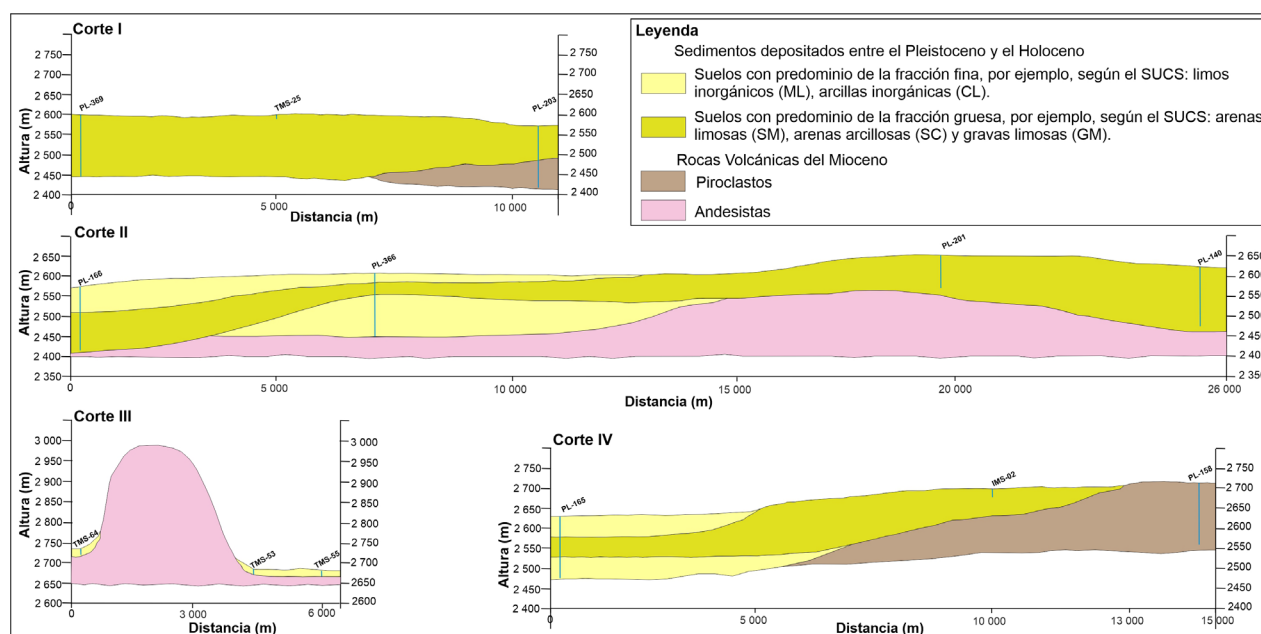


Figura 4. Cortes geológicos representativos de las condiciones geológicas con incidencia en la respuesta sísmica local de la ciudad de Toluca  
Fuente: Autor, 2022.

#### Sedimentos depositados entre el Pleistoceno-Holoceno

Conformados por suelos con predominio de la fracción fina de génesis aluvial y/o lacustre, afloran prácticamente en toda la zona oeste de la ciudad, exceptuando algunas zonas positivas del relieve (Corte III). Las perforaciones con fines hidrogeológicos, permitieron comprobar espesores

que oscilan desde los 5,0 a 50,0 m, la variabilidad en la potencia de los depósitos se justifica, debido a los procesos de formación donde intervienen eventos fluviales de diferentes energías y direcciones. De acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), los ensayos de laboratorio clasifican estos materiales como, limos inorgánicos (ML) y arcillas inorgánicas (CL). Los valores de densidades oscilan entre 1,7 y 1,8 g/cm<sup>3</sup>, y las ondas transversales experimentan velocidades (vs) entre 160 y 180 m/s.

Mientras que los suelos con predominio de la fracción gruesa, son el producto de procesos de sedimentarios lacustres y aluviales (origen similar a la fracción fina), y afloran en casi la totalidad de la zona este del perímetro de la ciudad (Corte I). Clasifican según el SUCS como arenas limosas (SM), arenas arcillosas (SM) y gravas limosas (GM), pudiendo alcanzar espesores entre 10,0 m y más de 150,0 m. Los valores de densidades oscilan entre 1,75 y 1,9 g/cm<sup>3</sup> y las velocidades de ondas transversales (vs) se comportarían entre 200 y 220 m/s.

#### Rocas volcánicas del Mioceno

El área de estudio se ubica, dentro de los complejos dómicos circundantes al volcán Nevado de Toluca, con rocas de composición andesítica a dacítica (García-Palomo, 1998). Para el caso particular de la ciudad de Toluca, se comprueba la presencia de rocas andesíticas subyaciendo los sedimentos aluviales y palustres del Pleistoceno-Holoceno; y aflorando en algunas elevaciones, como es el caso del cerro la Teresona (Corte III en la Figura 4). Las andesitas descritas en este caso de estudio, desde el punto de vista geotécnico, clasifican como rocas extremadamente duras, con una resistencia a la compresión axial superior a los 250 Mpa. Para rocas similares FEMA (2003) sugiere velocidades de ondas transversales mayores a los 1500 m/s.

Generalmente, en la base de las geoformas compuestas por rocas andesíticas, se observan afloramientos de rocas tipo pómez, tobas y lapilli, clasificadas en este trabajo como material piroclástico, con características geotécnicas, extremadamente diferentes. De acuerdo a los valores esperables de resistencia a la compresión simple (5.0 a 25.0 Mpa) clasificarían como roca blanda (González de Vallejo, 2002), bajando la velocidad de ondas transversales (en comparación con las rocas andesíticas) al rango entre 760 a 1500 m/s (FEMA, 2003). En la base de los cerros Coatepec y la Teresona (zona sur de la ciudad) se pueden visualizar los cortes de material piroclástico (ver Figura 5).



Figura 5. A) Afloramiento de material piroclástico en la base del Cerro Coatepec, y B): detalle de la heterogeneidad en composición y textura del material piroclástico, Cerro La Teresona

Fuente: Autor, 2022.

#### Cartografía del contraste de impedancia

El contraste de impedancia, es una de las principales características del corte geológico que permite el entendimiento de los efectos locales por sismos. Aplicando los principios de conservación del flujo de energía, una onda sísmica que se desplaza de un medio con velocidad de propagación alta (ejemplo roca granítica) a uno con bajas velocidades (ejemplo arenas) debe aumentar su amplitud.

La Figura 6, muestra la cartografía referida al contraste de impedancia para la ciudad de Toluca, sustentada en información geotécnica y geológica descrita en el apartado metodología. Los valores de contraste de impedancia oscilan entre 1,0 y 7,0. Aproximadamente el 90% del perímetro de la ciudad de Toluca coincide espacialmente con valores entre los 3,1 y 5,0 de contraste de impedancia, donde se pueden diferenciar dos comportamientos. El primero, comprende el rango entre 3,1 y 4,0, que de acuerdo a la información de los pozos PL-140, PL-201 y PL-366, se deduce un patrón de comportamiento, donde el techo de la roca (andesita) se ubica entre los 50,0 y 100,0

m; sobreyacidas por suelos con predominio de la fracción fina y/o gruesa (corte II de la figura 4). Mientras que el rango entre 4,1 y 5,0 (color amarillo en la figura 6) sugiere una relación espacial directa con cortes estratigráficos donde, al menos, los primeros 150 m están representados por suelos con predominio de la fracción fina y/o gruesa. También, se pueden esperar contrastes de impedancia entre 4,1 y 5,0 para zonas donde existan combinaciones de espesores de suelos con predominio de la fracción fina y/o gruesa; incluyendo estratos de material piroclástico. El corte I de la Figura 4, es un modelo (corte típico) de la situación estratigráfica que provocaría rangos de contrastes de impedancia entre 4,1 y 5,0 frente a sismos de moderada a alta magnitud.

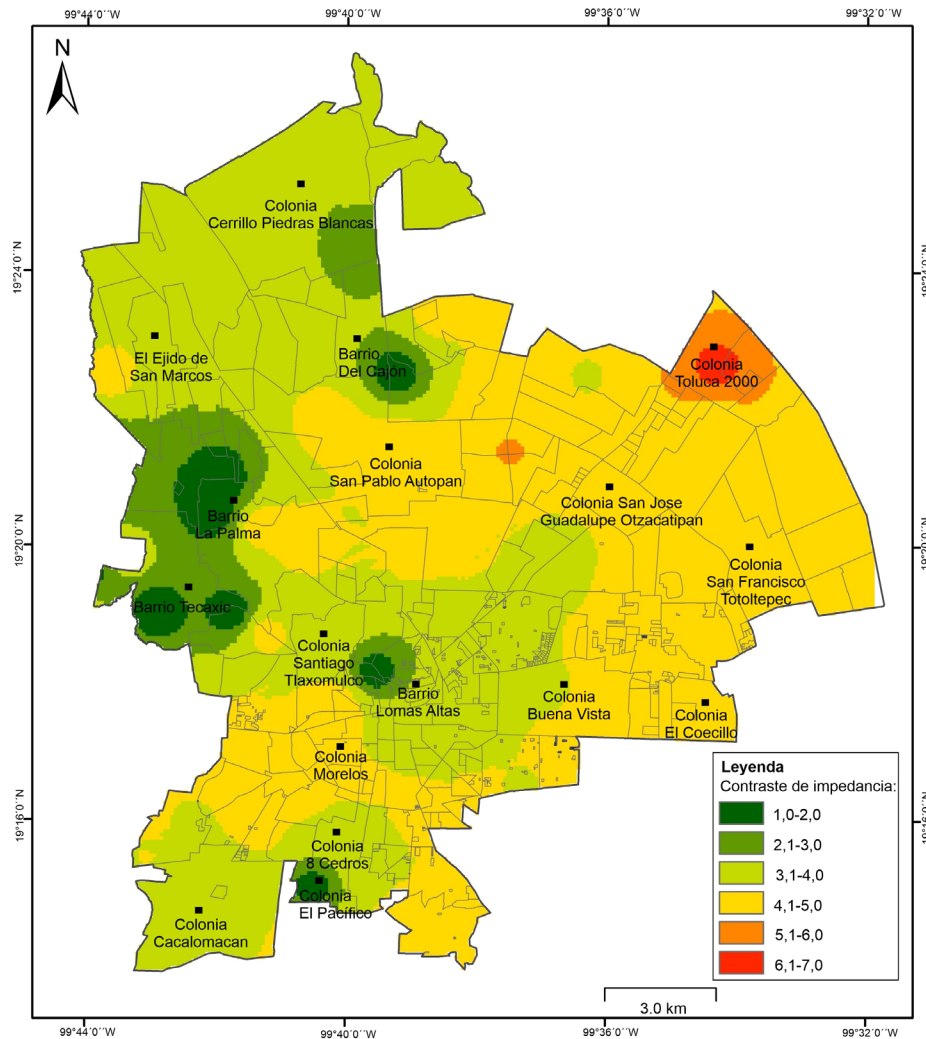


Figura 6. Mapa de contraste de impedancia del terreno sobre el que se emplaza la ciudad de Toluca  
Fuente: Autor, 2022.

### Cartografía de la susceptibilidad a la amplificación sísmica según los valores de periodos dominantes

La zonificación del periodo dominante (T), constituye una herramienta robusta para comprender los efectos locales por sismos. Durante un terremoto, los principales daños se producen principalmente por el fenómeno de resonancia, es decir, el edificio y el suelo oscilan de forma sincronizada (tienen periodos similares). De lo anterior, se deduce la importancia de contar con la cartografía de T para el proceso la planeación urbana y ejecución de obras. De esta investigación, se define el corte I como un claro ejemplo, de corte estratigráfico típico, probablemente responsable en el contexto urbano de generar periodos dominantes del terreno por encima de 2,0 s (ver Figura 7), por su asociación con materiales de baja densidad que pueden superar los 150 m de espesor. Las oscilaciones o cambios de periodos desde 2,0 s hasta 4,0 s (valor máximo estimado para el perímetro urbano) se deben a cambios en la profundidad del techo de la roca andesítica, o las variaciones de la velocidad de desplazamiento esperado de las ondas transversales de los materiales no consolidados que sobreyacen el techo de la roca.



De forma contraria, las zonas de la ciudad pronosticadas con valores de T por debajo de 2.0 s (tonalidades de color verde en la Figura 7), corresponden a situaciones geólogo-geotécnicas, donde los espesores de los materiales no consolidados se reducen de forma considerable, o afloran las rocas andesíticas. Respecto a esta última situación, el ejemplo más claro, en la ciudad de Toluca, lo constituye el corte III de la Figura 4.

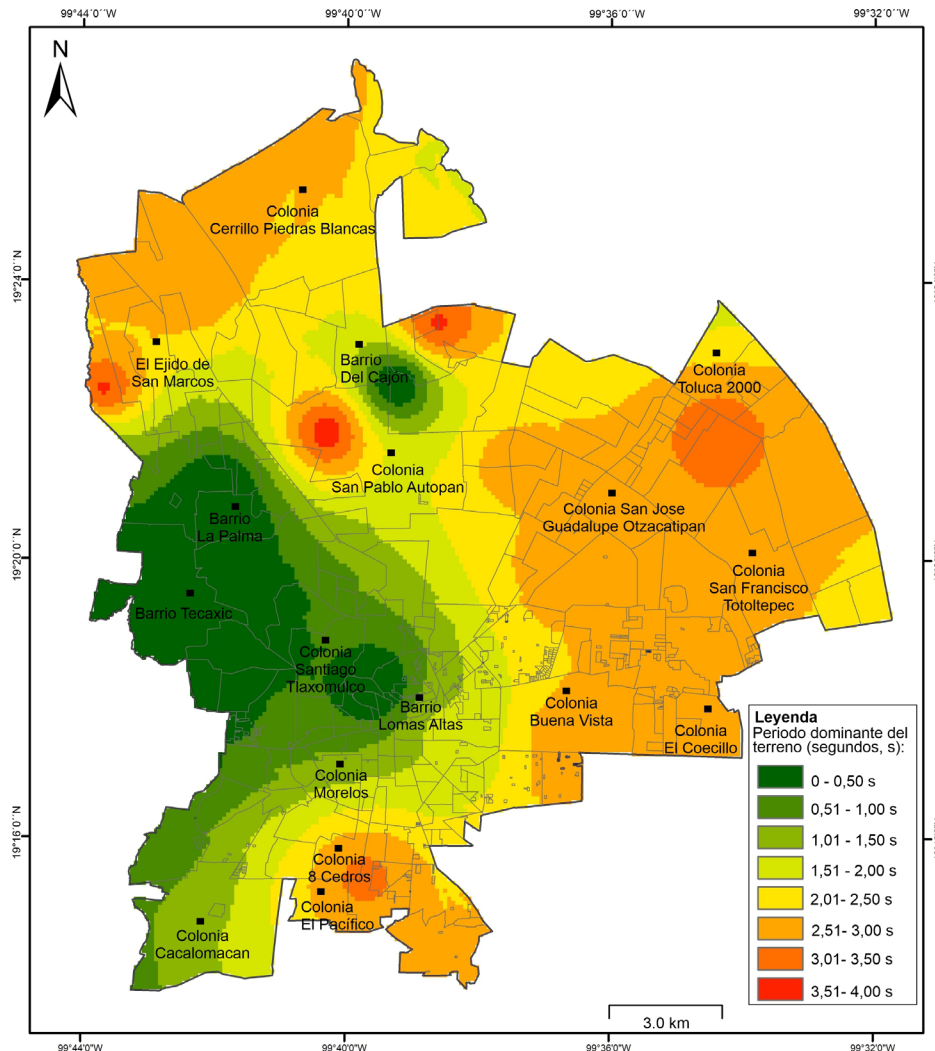


Figura 7. Zonificación del periodo dominante de los suelos y rocas. Ciudad de Toluca  
Fuente: Autor, 2022.

## DISCUSIÓN

Se estima que actualmente el 50% de la población mundial habita en zonas urbanas, y para el 2050 ascendería aproximadamente al 70%, este contexto sugiere la mejora continua de los procesos de planeación urbana (Sandoval & Sarmiento, 2020). Los resultados que se presentan en este artículo, intentan realizar una contribución cartográfica, aplicable a la anticipación de escenarios futuros para la ciudad de Toluca, México.

La cartografía mostrada, desde el punto de vista práctico, sugiere los sitios donde se deben realizar estudios instrumentales de microzonación, en el caso que se deseen emplazar nuevos edificios. Esto justificándolo a partir de áreas enmarcadas con valores de contraste de impedancias por encima de 3,0 y valores de periodo dominante del suelo superiores a 1,0 s (ver figuras 6 y 7). Los anterior, responde a la necesidad de nuevos crecimientos urbanos; pero en los casos de zonas ya construidas, pueden justificarse medidas de reducción de vulnerabilidad estructural, realizando previamente campañas de divulgación y capacitación en las comunidades; y sugiriendo al gobierno local la necesidad de canalizar recursos para este fin.

Es el primer trabajo cartográfico de este tipo para el perímetro de la ciudad de Toluca, aspecto que no permite comparar los resultados con estudios previos. Sin embargo, la zonación del periodo

dominante de terreno (T), mostrada en la Figura 7 puede ser empleada para el diagnóstico de la resonancia, o en su caso evitar su efecto para el diseño de futuros edificios. La resonancia, ocurre cuando los periodos de oscilación de las edificaciones son muy cercanos al periodo de oscilación del terreno sobre el que se cimienta. Hidalgo-García (2011) describe el efecto de la resonancia, como parte esencial de los daños durante los sismos, y menciona como ejemplos, los terremotos de Caracas 1967, Ciudad de México 1985, Loma Prieta 1989, Northridge 1984 y Kobe 1995.

## CONCLUSIONES

El trabajo analiza desde el punto de vista físico un espacio geográfico enclavado en una zona de moderada a alta sismicidad. Dentro de las variables físicas, el estudio se enfocó en analizar aquellas con mayor incidencia en la respuesta sísmica local dentro del perímetro urbano de la ciudad de Toluca, donde se demuestra la viabilidad del uso de información estratigráfica y geotécnica, para alcanzar la aproximación cartográfica de la respuesta sísmica local. La información más relevante empleada en el trabajo fue: tipo de material geológico, espesor y distribución espacial, densidad y velocidad de ondas transversales.

Las condiciones geológicas superficiales para la ciudad de Toluca, fueron resumidas en cuatro cortes típicos, elemento que permite sistematizar la información. Y en su caso, resulta un insumo esencial para la interpretación de estudios futuros de microzonación sísmica.

La cartografía de contraste de impedancia y del periodo dominante, son un reflejo de las condiciones geólogo-geotécnicas del escenario geográfico estudiado, y son productos cartográficos esenciales para la planeación urbana, donde, los valores de contraste de impedancias por encima de 3,0 y de periodo dominante del suelo superiores a 1,0 s, se pueden relacionar, para el caso de la ciudad de Toluca, con áreas susceptibles a la amplificación de ondas sísmicas frente a sismos de moderada a alta magnitud. Además, las citadas áreas, y bajo la perspectiva de las construcciones ya existentes, sugieren la adopción de medidas para la reducción de la vulnerabilidad estructural.

## REFERENCIAS

- Álvarez, J.A., Alonso, J., & Martínez, J. (2019). Evolución Tectónica de Centroamérica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 27(3), 349-355. <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/372917>
- Ángeles-Moreno, E., Cabadas-Baéz, H.V., Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M.J., Almazán-Vázquez, A.R. & Guerrero-Jacinto, Z. (2021). Características geológico-estructurales de grietas en construcciones habitacionales ante diversos riesgos geológicos, casos de la ciudad de Toluca y San Miguel Tecmatlán: implicaciones en la interacción suelo-estructura. En *Actas de la XXI Reunión Nacional de Profesores de Ingeniería Geotécnica* (pp. 35-44), RNPIG.
- 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.
- Bard, P.Y. (1985). *Victor Davidovici: Genie Parasismique, Les effets de site d'origine structurale: principaux résultats expérimentaux et théoriques*. Presses ENPC.
- Boore, D.M. (2004). Can site response be predicted?. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(sup001), 1-41. <http://doi.org/10.1080/13632460409350520>
- Cardona, O.D. (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Catalunya. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=6549>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. (2020). Portal electrónico oficial del Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/mexico-en-pie>
- Chávez-García, Francisco J, & Montalva, Gonzalo A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y proyectos*, (16), 6-30. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132014000200001>
- Dikmen, Ü. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1), 61-72. <http://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/007>
- 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 doctoral). Universidad Autónoma del Estado de México.

- Federal Emergency Management Agency, FEMA. (2003). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. Createspace Independent Publishing Platform.
- García-Palomo, A. (1998). Evolución estructural en las inmediaciones del Volcán Nevado de Toluca, Estado de México (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gobierno Municipal de Toluca (2021). *Información sociodemográfica del Municipio de Toluca de acuerdo a ITER de localidades del Censo de Población y Vivienda 2020*, INEGI. Gobierno Municipal de Toluca. <https://www2.toluca.gob.mx/wp-content/uploads/2021/08/tol-pdf-umplan-Informacion-sociodemografica-Toluca-2020-IMPLAN.pdf>
- González de Vallejo, L.I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.
- Hidalgo-García, J.D. (2011). Periodos dominantes del movimiento sísmico y su relación con los tipos de suelo en la zona de Granada (Tesis de Maestría). Universidad de Granada.
- Humboldt, A. V. (1845). *Cosmos. Ensayo de una descripción física del mundo*. Imprenta Gaspar y Roig, Madrid. <http://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000001842>
- Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México, IFOMEGEM (1994). Carta geológica del Estado de México. Escala 1: 250 000. 1 Hoja. [https://ifomegem.edomex.gob.mx/carta\\_geologica](https://ifomegem.edomex.gob.mx/carta_geologica)
- Jasso, J.E. (2003). Efecto de la geología local en la respuesta sísmica de suelos, en el Valle de Ojos Negros, Baja California (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/5376/1/1020149232.pdf>
- López Bermúdez, F. (2002). Geografía física y conservación de la naturaleza. *Papeles de Geografía*, (36), 133-146. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/46511>
- Ordaz Hernández A., Hernández Millán J.A., & Garatachia Ramírez J.C. (2020). Aproximación cartográfica a la vulnerabilidad estructural ante sismos empleando una metodología cualitativa: aplicación para la Ciudad de Toluca. *Cuadernos Geográficos*, 59(2), 178-198. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9340>
- Ordaz, A., Chuy, T.J., Hernández-Santana, J.R. & García, J.A. (2012). División geológico-geotécnica aplicada a la zonación sísmica urbana: San Cristóbal, Cuba occidental. *Cuaternario y Geomorfología*, 26(1-2), 89-104. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/18528>
- Palomino, F.N. (2016). *Estudio de Evaluación de riesgos de desastres y vulnerabilidad al cambio climático en la región PIURA*. Equipo Consultor: SIG Ingenieros, GTS GIS Team Solution y Hedy Villon Roman. [https://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/Archivos/Documentos/evar\\_piura.pdf](https://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/Archivos/Documentos/evar_piura.pdf)
- Pérez-Gavilán, J.J., Aguirre, J, & Ramírez, L. (2018). Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México. *Salud Pública de México*, 60(Supl. 1), 41-51. <https://doi.org/10.21149/9300>
- Romina, D., Grosso, V., Sagripanti, G., Villegas, M., & Villalba, D. (2003). Caracterización preliminar de la susceptibilidad sísmica en el entorno de la localidad de Sampacho, Cordoba, Argentina. *Geofísica Colombiana*, (7), 24-29. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/41974>
- Salinas-Jasso, J.A., Montalvo-Arrieta, J.C., Alva-Niño, E., de León, I.N., & Gómez-González, J.M. (2019). Seismic site effects in the central zone of Monterrey Metropolitan Area (northeast Mexico) from a geotechnical multidisciplinary assessment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(1), 483-495. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1065-9>
- Sánchez, F. (2020). Zonificación de la respuesta sísmica local, mediante análisis espacial. Caso de estudio: Zona Metropolitana del Valle de Toluca. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Sandoval, V., & Sarmiento, J.P. (2020). A Neglected Issue: Informal Settlements, Urban Development, and Disaster Risk Reduction in Latin America and the Caribbean. *Disaster Prevention and Management*, 29(5), 731-745. <https://doi.org/10.1108/DPM-04-2020-0115>
- Servicio Sismológico Nacional de México, SSN. (2021). Portal electrónico del Servicio Sismológico Nacional de México. SSN. <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Tarbutck, E.J. & Lutgens, F.K. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física* (8va Ed.). Pearson Educación.

Zambrana, X.E. (2019). Peligro Sísmico por Efecto de Sitio en el Recinto Universitario Rubén Darío de la UNAN-Managua. *Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, (32), 84-93. <https://doi.org/10.5377/farem.voi32.9233>