



Cartografía de la respuesta sísmica local: una contribución a la gestión del riesgo en la zona metropolitana del Valle de Toluca

Fernándeo Sánchez Carmona¹; Alexis Ordaz Hernández²; José Emilio Baró Suárez³; Miguel Ángel Balderas Plata⁴

Recibido: 11 de noviembre del 2021 / Enviado a evaluar: 29 de noviembre del 2021 / Aceptado: 9 de diciembre del 2022

Resumen. La creación de herramientas que faciliten la gestión de los riesgos en los territorios, se ha convertido en una tarea esencial. La investigación, da el primer paso en el conocimiento de la respuesta sísmica local en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. El objetivo consistió en cartografiar la disposición espacial de los suelos y rocas, y analizar su posible respuesta sísmica local. La metodología, incluye: (1) Crear el modelo 3D que represente la disposición espacial de los materiales geológicos, (2) Clasificar desde la óptica de la susceptibilidad sísmica cada tipo litológico y representarlo espacialmente y (3) Zonificar el periodo dominante del suelo mediante ecuaciones empíricas. El trabajo se diseñó sobre herramientas SIG y se soporta sobre 231 puntos de documentación (perforaciones y descripciones de afloramientos). La cartografía resultante revela tipos litológicos de diferentes características, derivando en cuatro niveles de susceptibilidad sísmica y cinco rangos de periodos dominantes.

Palabras clave: Gestión del riesgo; respuesta sísmica; zona metropolitana.

[en] Cartography of the local seismic response: a contribution to risk management in the metropolitan area of Valle de Toluca

Abstract. The creation of tools that facilitates the management of risks in the territories has become an essential task. The research takes the first step in the knowledge of the local seismic response in the Metropolitan Area of Toluca Valley. The objective was to map the spatial arrangement of soils and rocks and analyze their possible local seismic response. The methodology includes: (1) Create the 3D model that represents the spatial arrangement of geological materials, (2) Classify from the perspective of

¹ Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México.
E-mail: fer.sanchez.yo@gmail.com

² Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México.
E-mail: aordazh@uaemex.mx

³ Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México.
E-mail: jebaros@uaemex.mx

⁴ Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México.
E-mail: mabalderasp@uaemex.mx

seismic susceptibility each lithological type and represent it spatially and (3) Zone the dominant period of the soil through empirical equations. The work was designed on GIS tools and is supported on 231 documentation points (perforations and descriptions of outcrops). The resulting cartography reveals lithological types of different characteristics, resulting in four levels of seismic susceptibility and five ranges of dominant periods.

Keywords: Risk management; seismic response; Metropolitan area.

[fr] Cartographie de la réponse sismique locale : une contribution à la gestion des risques dans la zone métropolitaine de Valle de Toluca

Résumé. La création d'outils qui facilitent la gestion des risques dans les territoires est devenue une tâche essentielle. La recherche fait la première étape dans la connaissance de la réponse sismique locale dans la région métropolitaine de la vallée de Toluca. L'objectif était de cartographier la disposition spatiale des sols et des roches et d'analyser leur réponse sismique locale potentielle. La méthodologie comprend : (1) Créer le modèle 3D qui représente la disposition spatiale des matériaux géologiques, (2) Classer dans l'optique de la susceptibilité sismique chaque type lithologique et le représenter spatialement et (3) Zonage de la période dominante du sol au moyens des équations empiriques. Le travail a été conçu sur des outils SIG et est supporté sur 231 points de documentation (perforations et descriptions d'affleurements). La cartographie qui en résulte révèle des types lithologiques de caractéristiques différentes, résultant en quatre niveaux de susceptibilité sismique et cinq gammes de périodes dominantes.

Mots-clés: Gestion des risques; réponse sismique ; Zone métropolitaine.

Cómo citar. Sánchez, F., Ordaz, A., Baró, J.E. y Balderas, M.A. (2022). Cartografía de la respuesta sísmica local: una contribución a la gestión del riesgo en la zona metropolitana del Valle de Toluca. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 42(2), 509-531.

Sumario. 1. Introducción. 2. Marco teórico. 3. Metodología. 3.1. Zona de estudio. 3.2. Materiales y métodos. 3.3. Disposición espacial de los suelos y rocas sobre los que se emplaza la ZMVT, mediante un modelo 3D. 3.4. Clasificación de los tipos litológicos desde la óptica de la susceptibilidad sísmica y su representación espacial. 3.5. Estimación del periodo dominante del suelo (T). 4. Resultados. 4.1. Cartografía y caracterización de los suelos y rocas sobre los que se emplaza la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. 4.2. Tipos litológicos y clasificación desde la óptica de la susceptibilidad sísmica. 4.3. Zonificación del periodo dominante del suelo. 5. Conclusiones. 6. Referencias bibliográficas.

1. Introducción

Los impactos ocasionados por los sismos se concentran en escenarios geográficos donde coinciden espacialmente características tectónicas favorables para la liberación de energía y elementos expuestos con diferentes niveles de vulnerabilidad (Aparicio, 2017; Ordaz et al., 2020). Los estudios del siglo XX (Beresnev & Kuo-Liang Wen, 1995; Chávez-García & Cuenca, 1998; Musson, 2012; entre otros), han revelado la fuerte influencia que las condiciones geológicas locales tienen sobre la respuesta sísmica en la superficie del suelo cuando ocurre un terremoto. El conjunto de modificaciones que la señal sísmica sufre en los materiales cercanos a la superficie es conocido como efecto de sitio y su principal manifestación, desde el punto de vista de los daños a las estructuras civiles, es la amplificación del movimiento del suelo. Los

saldos de muerte y destrucción que dejaron algunos de los terremotos más dañinos, como el de Michoacán 1985 que impactó fuertemente a la Ciudad de México y el de Kobe en Japón 1995; pueden atribuirse preponderadamente a los efectos de sitio producidos por los materiales sedimentarios blandos (González-Huizar, 2019).

Durante el sismo del 19 de septiembre del 2017 de 7.1 grados en la escala de Richter, y con epicentro a 12 km al sureste de Axochiapan (Estado de Morelos); se reportaron para la Zona metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) daños moderados en su infraestructura. La casusa, de los daños estuvo muy relacionada con amplificaciones locales de las ondas sísmicas, provocadas por la presencia de depósitos de suelos de baja densidad. Por ejemplo, la localidad de Infonavit San Francisco en Metepec, sufrió fuertes fracturas consecuencia de estar emplazada sobre potentes depósitos no consolidados de suelo; la revisión detallada del pozo con fines hidrogeológicos PL-202, arrojó que el perfil estratigráfico en este sitio está compuesto en los primeros 5,0 metros por gravas mal graduadas mezcladas con arenas y arcillas, a partir de esta profundidad y hasta superar los 38,0 metros de profundidad continua un fuerte espesor de arenas mal graduadas y arenas con pocos finos. Atendiendo a los antecedentes enunciados se deduce que, para zonas densamente pobladas, sujetas a peligro sísmico de moderado a alto, como es el caso de la ZMVT, resultaría de gran interés contar con estudios que revelen la susceptibilidad sísmica de los materiales más superficiales. Precisamente, esta investigación tiene como objetivo cartografiar la disposición espacial de los diferentes suelos y rocas que sirven de base a la ZMVT, y analizar su posible respuesta sísmica local. La cartografía obtenida en este trabajo resultaría la primera de su tipo para la ciudad de Toluca. En este caso, representaría una herramienta esencial en la gestión local del riesgo sísmico, durante la planeación urbana, en la actualización del Reglamento de Construcciones y del Atlas de Riesgos Municipal. La realización del trabajo se justifica plenamente, si se considera que, en la ZMVT habitan aproximadamente 1,9 millones de habitantes (COESPO, 2019). Además, concentra una importante infraestructura urbana en materia de vialidades, transporte, atención hospitalaria, centros educativos y culturales, entre otros.

2. Marco teórico

La respuesta sísmica local o efecto de sitio son consecuencia de las diferentes respuestas dinámicas de los suelos, tanto en amplitud como en el contenido frecuencial de registros en superficie en comparación con las señales en terreno firme (Napolitano et al., 2018). En países con amenaza sísmica alta o intermedia, como es el caso de México, es de vital importancia estimar los efectos de amplificación o atenuación sísmica, generados por los estratos de suelo que componen el perfil estratigráfico (Salinas-Jasso et al., 2019). Los sismos de San Francisco 1906 y 1989, Michoacán en 1985 y Kobe 1995, son ejemplos donde se demuestra la influencia de materiales sedimentarios blandos en la respuesta sísmica local (Khazai et al., 2014).

Este fenómeno conocido como efecto de sitio, es característico de suelos blandos, donde las ondas sísmicas son retenidas, y como resultado experimentan una

amplificación del movimiento en superficie. Un ejemplo, en la Ciudad de México, lo constituyen los suelos arcillosos y limosos con alto contenido de agua, depositados en antiguas lagunas (Cárdenas-Soto & Chávez-García, 2003). El terremoto de 1985, de magnitud 8,1 y epicentro cercano a la desembocadura del río Balsas, en la costa del Estado de Michoacán (México), provocó daños importantes en la Ciudad de México ubicada aproximadamente a 300 km del epicentro. Las causas de la amplificación local de la señal sísmica, de este evento, ha sido estudiada en detalle en Ferraes (1988); Flores-Estrella et al., (2007) y Singh et al., (2019); entre otros. Donde, se concluye que la Ciudad de México se desarrolla sobre una zona lacustre que, al secarse formó distintos estratos en el subsuelo con alto contenido de agua, estos sedimentos poco consolidados y blandos provocan que las ondas sísmicas sufran un incremento notable. Un tercer ejemplo, que ha permitido la comprensión de la relación existente entre la modificación de la señal sísmica y la geología local, es el caso Kobe (Japón) el 17 de enero de 1995, el sismo alcanzó una magnitud de 6,9 y provocó daños especialmente en estructuras emplazadas sobre materiales sedimentarios suaves (Ghofrani, 2013).

Para investigar el efecto de sitio, se han propuesto varias clasificaciones de los suelos mediante las diferencias observadas en las amplificaciones del movimiento de la superficie provocadas por un sismo. Así mismo, se desarrollan clasificaciones fundamentadas en los tipos de roca y suelo (Trifunac & Brady, 1976), en la compactación y grosor de los depósitos sedimentarios someros o en la edad de las formaciones geológicas superficiales (Evernden et al., 1981; Topozada et al., 1988). Mientras que los enfoques más recientes proponen relaciones cuantitativas, generalmente empíricas, entre la amplificación de las ondas sísmicas en el sitio y algún parámetro físico de los materiales del suelo. Entre estas últimas relaciones se encuentran las basadas en el parámetro de relación de vacío (Hayes et al., 2017) o en módulo de corte, y las que hacen depender el efecto de sitio del valor de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) en la estratigrafía somera (Cabas et al., 2017; Ladak et al., 2021). También existen métodos experimentales cuyo objetivo es determinar la función de transferencia, o en su defecto la frecuencia fundamental, de los depósitos superficiales a partir de registros sísmicos o de ruido sísmico. Por mencionar algunos métodos experimentales se tienen: el método del cociente espectral H/V de registros de ruido sísmico (Napolitano et al., 2018), el método clásico de las razones espectrales suelo – roca, y finalmente el método de cálculo de la amplificación del movimiento del suelo en términos de la intensidad macrosísmica (Mi et al., 2019).

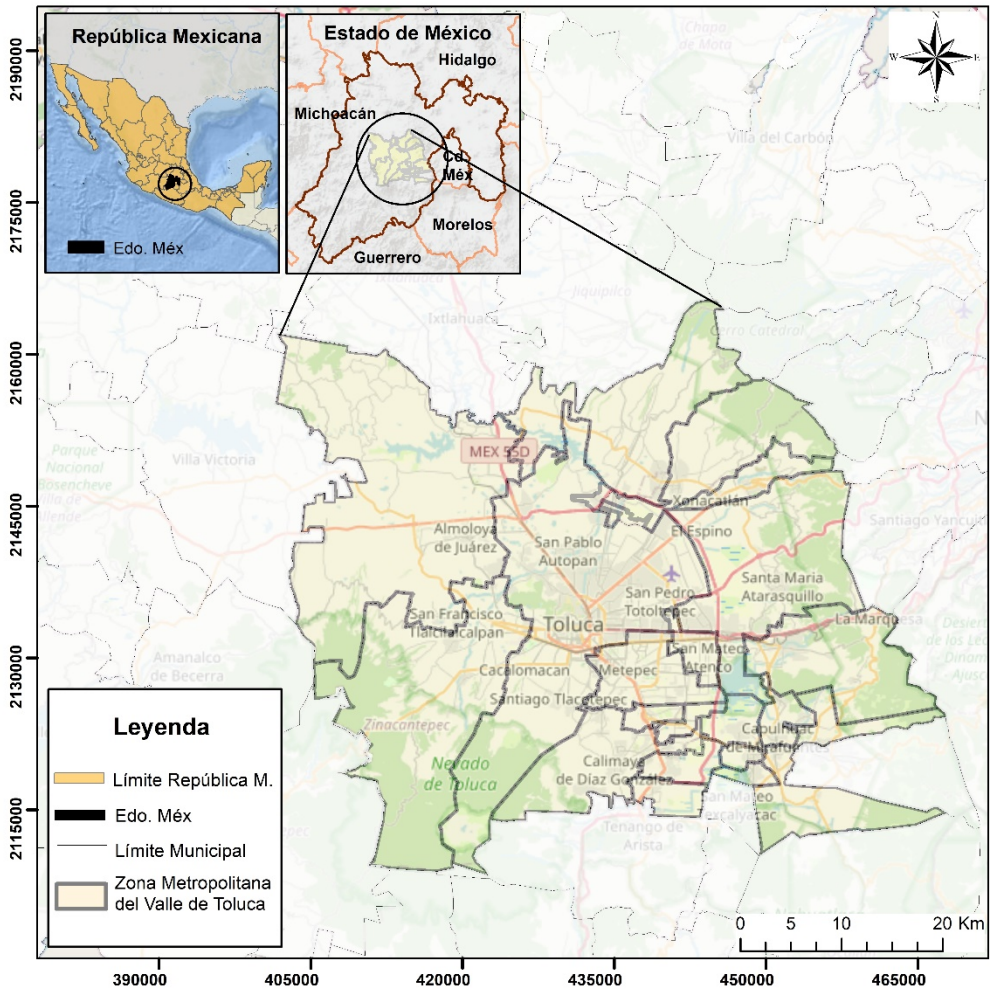
El efecto de sitio, como parte del riesgo sísmico puede desencadenar desastres, especialmente en entornos urbanos. En esta dirección Motamed et al., (2020) y Torrieri (2020), sugieren algunas medidas, con el propósito de lograr ciudades más resilientes, por ejemplo: gestionar la creación y actualización del reglamento de construcciones, regular los usos del suelo con base en la zonificaciones sísmicas, incorporar los resultados de la cartografía de la respuesta sísmica local en Atlas Estatales y Municipales de Riesgos Urbanos, promover la implementación de Programas de Ordenamiento y Reordenamiento Territorial en ciudades con la finalidad de reducir la vulnerabilidad.

3. Metodología

3.1. Zona de estudio

La ZMVT, se localiza en el Estado de México, situada al sur del Altiplano Mexicano, colinda al norte con Ixtlahuaca, al Sur con el cerro de Tenango, al Sur-Poniente con el Volcán Nevado de Toluca.

Figura 1. Localización del área de estudio: Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Fuente:



Elaboración propia.

En el Periódico Oficial de la Gaceta de Gobierno del Edo. Méx. del 19 de noviembre de 2009 se aprueba la Declaratoria de Zona Metropolitana del Valle de Toluca con 22 municipios: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Xalatlaco, Xonacatlán, Zinacantepec. Debido a la limitada información geólogo-geotécnicas disponible, para el actual estudio, no se consideran los municipios de Tenango del Valle, Texcalyacac y Xalatlaco (Figura 1).

3.2. Materiales y métodos

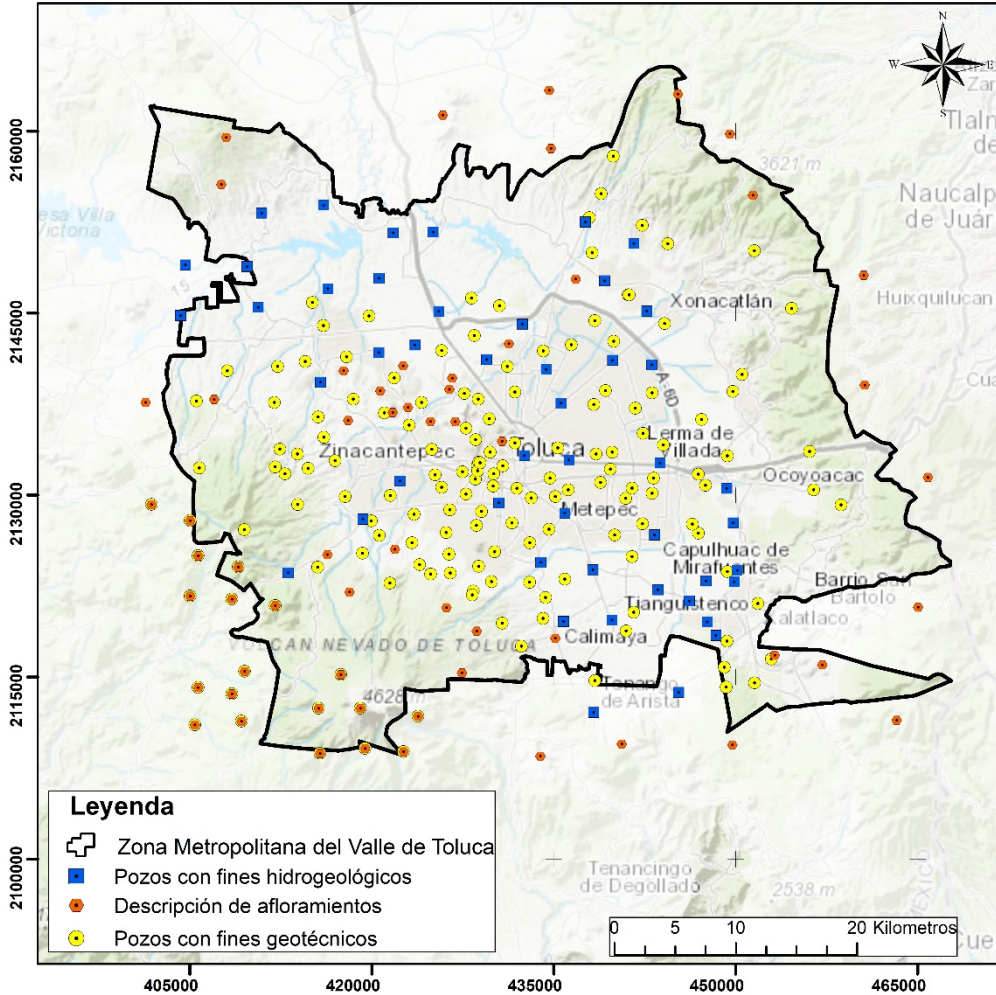
Para el desarrollo urbano sustentable de zonas metropolitanas, es de especial relevancia contar con cartografía que represente los sitios, donde se pronosticarían amplificaciones de las ondas sísmicas en caso de un sismo de moderada a alta magnitud. En este sentido, el objetivo se pretende alcanzar transitando por el desarrollo de los siguientes objetivos específicos: (1) Crear el modelo 3D que represente la disposición oficial de los suelos y rocas sobre los que se emplaza la ZMVT, (2) Clasificar desde la óptica de la susceptibilidad sísmica cada tipo litológico y representarlo espacialmente, (3) Zonificar el periodo dominante de los suelos mediante ecuaciones empíricas que contemplen las características geotécnicas in situ.

Es importante contextualizar que, de acuerdo con los antecedentes consultados, la actual investigación es la primera de su tipo para la ZMVT. Y se justifica, a partir de los daños estructurales ocasionado por el terremoto de 7,1 grados en la escala de Richter del 17 de septiembre del 2017.

3.3. Disposición espacial de los suelos y rocas sobre los que se emplaza la ZMVT, mediante un modelo 3D

La disposición espacial de los tipos litológicos (suelos y rocas) se sustentó en información extraída de archivos de la Comisión Nacional del Agua y del Laboratorio de Materiales “Ingeniero Javier Barros Sierra” de la Universidad Autónoma del Estado de México. Para el primer caso, se accedió a información de 49 pozos con fines de investigaciones hidrogeológicos y profundidades promedio de 150 metros. Mientras que del laboratorio universitario se obtuvo información de 137 pozos realizados con fines geotécnicos para la investigación de las condiciones de cimentación de la ZMVT, estos últimos pozos tienen profundidades que oscilan entre los 10 y 35 m. Adicionalmente, y para la corrección del modelo automatizado obtenido, se realizaron 45 descripciones de afloramientos (Figura 2).

Figura 2. Ubicación espacial de los puntos que aportan información para la elaboración del modelo 3D, que representaría la disposición espacial de los suelos y rocas sobre los que se emplaza la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.



Fuente: Elaboración propia.

La información estratigráfica extraída de cada uno de los pozos fue insertada en una base de datos, que incluyó los siguientes atributos: (a) código de la perforación, (b) coordenadas, (c) altura sobre el nivel medio del mar, (d) tipo de material geológico, (e) profundidad del piso y el techo de cada tipo de material geológico y (f) profundidad total de la perforación. Posteriormente, con el empleo del software Rock

Works (Registration Number RW17AST30157), se elabora el modelo en tercera dimensión, donde se lograría una aproximación a la disposición espacial de los diferentes tipos litológicos sobre los que se construyó y continúa en crecimiento la ZMVT.

3.4. Clasificación de los tipos litológicos desde la óptica de la susceptibilidad sísmica y su representación espacial

Conocidos los espesores y la extensión de cada tipo litológico, se realiza entonces el primer acercamiento a la clasificación desde la óptica de la susceptibilidad sísmica de los materiales geológicos. Según Chávez-García et al., (2018) las oscilaciones del subsuelo como consecuencia de un sismo dependerán de los parámetros asociados a la fuente sísmica y de la atenuación de la energía sísmica hasta su arribo al sitio de interés. De acuerdo con Chávez-García & Montalva, (2014) y colectivos de autores, es posible pronosticar el movimiento sísmico en un punto utilizando las ecuaciones de predicción de movimiento del terreno (leyes de atenuación), que en estudios de riesgo sísmico se conoce como movimiento de referencia, o movimiento estimado para un sitio en roca dura.

Sin embargo, si el sitio de estudio no se encuentra sobre roca dura, ese movimiento de referencia experimentará una amplificación local generada por heterogeneidades geológicas, por ejemplo, presencia de capas de suelos de baja densidad y saturadas, que en ocasiones pueden alcanzar espesores superiores a los 30 m, o pueden intercalarse con materiales geológicos más consolidados.

Trabajos recientes vinculados a la temática (Khan et al., 2021; Shafique et al., 2018; Touhami et al., 2021; Wen et al., 2018) indican que las propiedades del terreno más empleadas en el análisis del efecto de sitio con base en datos de geología superficial, serían las propiedades geotécnicas, espesores de capas, aflorabilidad de los materiales y el comportamiento de ondas de corte (V_s). De acuerdo con la experiencia acumulada en los trabajos citados anteriormente y en función del nivel de conocimiento del subsuelo de la ZMVT, para el análisis de la susceptibilidad sísmica se emplearán:

Tabla 1. Correlaciones empíricas propuestas por Dikmen (2009) basadas en el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar para obtener las velocidades de ondas de corte (V_s).

Tipos de Suelo		
Arenas	Arcilla	Todos los suelos
$V_s = 73 N^{0.33}$	$V_s = 44 N^{0.48}$	$V_s = 58 N^{0.39}$

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Clasificación de suelos y rocas de acuerdo con Building Seismic Safety Council del 2003 (FEMA, 2003). Donde los suelos E y F corresponderían a los más susceptibles a amplificar ondas sísmicas.

Tipo de Suelo	Clasificación Roca/Suelo	V_{S30}
A	Roca dura	>1500
B	Roca	760-1500
C	Suelo muy denso o roca suave	360-760
D	Suelo duro	180-360
E	Suelo Suave	<180
F	Suelos especiales que requieren evaluación específica de sitio	

Fuente: Elaboración propia.

(1) Propiedades geotécnicas, se hará uso de los resultados de ensayos de penetración estándar, la densidad, contenido de agua e índice plástico. Uno de los aspectos novedosos de esta investigación radica en aglutinar para un mismo fin un volumen importante de datos geotécnicos, derivados de aproximadamente 933 muestras de suelos extraídas de 137 pozos, correspondientes a estudios geotécnicos de los edificios más importantes de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT). El comportamiento de los datos geotécnicos citados y su comparación con suelos que han experimentado amplificaciones muy notables en sismos históricos tanto dentro del perímetro de estudio, como en la Ciudad de México u otras ciudades de Centro América, permite por analogías ingeniero geológicas adjudicar un nivel de susceptibilidad sísmica. Evidentemente, esta sería una primera aproximación a la clasificación desde el punto de vista sísmico, de los materiales geológicos que subyacen la ZMVT.

(2) Comportamiento de las velocidades de ondas de corte (V_s). Estas serán estimadas mediante las ecuaciones empíricas de Dikmen (2009), (Tabla 1). La aproximación, al comportamiento del desplazamiento de las V_s en las capas superficiales, especialmente en los primeros 30 m (V_{S30}), aporta un segundo criterio, donde generalmente suelos o rocas muy meteorizadas con valores de V_s inferiores a los 200 m/s corresponden a materiales de baja densidad que provocan amplificaciones importantes de las ondas sísmicas en el sitio (F. J. Chávez-García, 2009) y (Cua & Heaton, 2007). Los valores obtenidos por las ecuaciones de Dikmen y como vía de comprobación, se compararon con los propuestos por Building Seismic Safety Council BSSC del 2003 disponible en FEMA (2003) (Tabla2).

3.5. Estimación del periodo dominante del suelo (T)

Las afectaciones más severas sobre las construcciones ocurren cuando el periodo de vibración de los edificios coincide con el periodo dominante de los depósitos del suelo (T), este fenómeno es conocido como resonancia (Domínguez Caicedo, 2014; Gonzalez Herrera et al., 2020; Preciado et al., 2017) entre otros. Como parte de los objetivos de este trabajo, se obtendrá la primera cartografía para la ZMVT del parámetro T. Lo anterior abre la posibilidad, en estudios posteriores, para realizar análisis puntuales de la posible ocurrencia de la resonancia, donde se analicen aspectos como la altura y los diseños arquitectónicos.

De forma general, el periodo dominante de los depósitos del suelo (T), se correlaciona con el grado de oscilación de los suelos durante un terremoto, pudiéndose inferir, que a mayores valores de T en un material ya sea suelo o roca, mayor será la amplificación sísmica provocada por las ondas S.

En este caso se utilizó la relación $T = (4H/V_s)$, propuesta por Bard, (1995) donde H es el espesor de los sedimentos y V_s , la velocidad de ondas transversales. El volumen considerable de datos (Figura 2) permitió efectuar los cálculos de periodos dominantes en cada punto de sondeo (perforación) e interpolar estos valores para obtener el mapa de valores de T. Para la aplicación de la ecuación de Bard, fue necesario calcular V_{s30} por sondeo, para obtener un valor ponderado de la velocidad de ondas transversales en coherencia con los espesores de los diferentes estratos en los primeros 30 m. de cada perforación, en este caso se utilizó la ecuación propuesta por Macau et al., (2008)

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}}$$

Donde h_i y V_i son la potencia y la velocidad de las ondas transversales en cada una de las capas i , respectivamente. N es el número de capas consideradas en los primeros treinta metros de cada sondeo.

4. Resultados

4.1. Cartografía y caracterización de los suelos y rocas sobre los que se emplaza la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

La construcción del modelo 3D sobre los que se encuentran emplazada la ZMVT (Figura 3), reveló la presencia de 7 tipos litológicos:

(1) Arcillas, con espesores que oscilan entre 2,0 y 14,0 m, afloran principalmente en la cabecera municipal de Calimaya al Este del Nevado de Toluca, también tiene amplia presencia en la Sierra de las Cruces. La superficie aproximada de aflorabilidad es de 61 km². Los informes de laboratorio de mecánica de suelos consultados indican

que según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) clasifican como arcillas inorgánicas de baja plasticidad (CL).

(2) Limos, según muestran los datos de las perforaciones, sus espesores oscilan entre 15,0 a los 26,0 m y afloran en aproximadamente 380,7 Km², principalmente al NE, en las localidades de Tepexoyuca y Santiaguito del municipio de Ocoyoacac. Es el segundo tipo de suelo con la mayor aflorabilidad en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, con presencia en los municipios de Almoloya de Juárez, Toluca, Temoaya y Zinacantepec. Según el SUCS, se clasifican como limos inorgánicos (ML) y suelos limosos o arenosos finos (MH).

(3) Arenas, sus espesores promedios van de los 3,0 a 32,0 metros, se encuentra en toda la zona la zona centro de la ZMVT, sin embargo, solo aflora al NE del área de estudio, cubriendo parte del municipio de Toluca en la localidad de La Constitución Totoltepec. La revisión detallada de las pruebas de laboratorio, arrojaron la presencia de cuatro variedades de arenas de acuerdo con el SUCS: arenas bien graduadas (SW), arenas mal graduadas (SP); arenas arcillosas (SC) y arenas limosas (SM).

(4) Gravas, es el tipo litológico predominante en el Valle de la ZMVT, se caracteriza por espesores promedios entre los 5,0 a 13,0 m, sin embargo, para el caso del municipio de Calimaya se comprobaron espesores que superan los 27,0 metros de profundidad. La superficie total de aflorabilidad es aproximadamente de 672,3 km², con fundamento en los informes de laboratorio de mecánica de suelos estas gravas clasifican por el SUCS como gravas mal graduadas (GP).

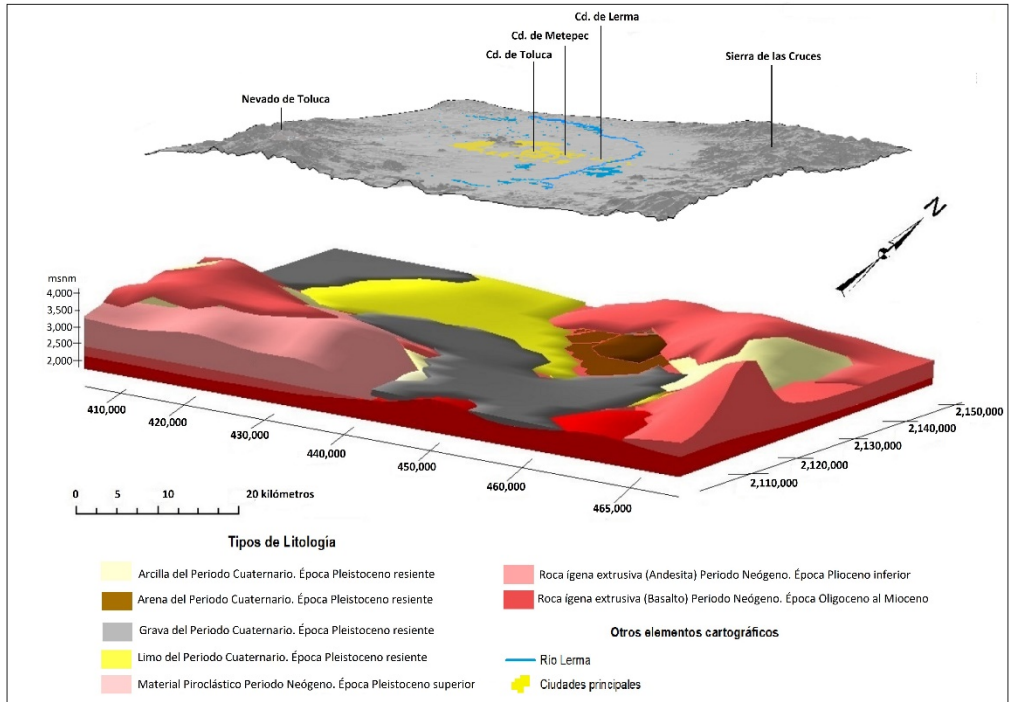
(5) Material piroclástico, presenta espesores superiores a 30,0 m, está presente en la mayor parte del Valle de Toluca, principalmente en el flanco Norte del Nevado de Toluca, la superficie aproximada de aflorabilidad es de 426,9 km². Con base en 7 pozos con fines geotécnicos y 12 pozos con fines hidrogeológicos, se lograron identificar rocas tipo pómez, tobas y lapilli.

(6) Roca ígnea extrusiva, Andesita. Tiene presencia en toda la Sierra de las Cruces y en el Nevado de Toluca, la superficie de aflorabilidad es de 455,7 km².

(7) Roca ígnea extrusiva, Basalto, este tipo de roca volcánica está presente en la mayor parte de la ZMVT, sin embargo, solo aflora en el SE del área de estudio con una superficie aproximada de aflorabilidad de 119,4 km².

El modelo 3D obtenido, se comparó con otras cartografías ya existentes, por ejemplo la cartografía geológico-ambiental de los volcanes de la zona centro de Toluca con énfasis en controles estructurales y su influencia en las características hidrogeológicas del área (López, 2019); y la Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca (Aceves-Quesada et al., 2014), donde se observa similitud, principalmente en la modelación de rocas ígneas extrusivas y la superficie de aflorabilidad de las mismas.

Figura 3. Modelo 3D del comportamiento espacial de los tipos litológicos sobre los que se emplaza la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

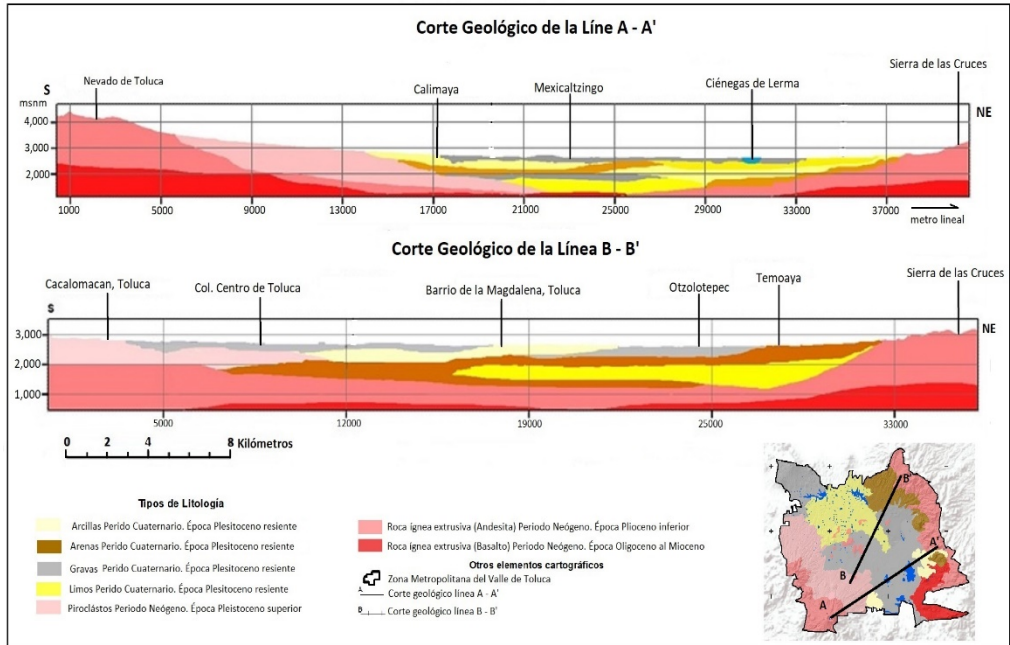


Fuente: Elaboración propia.

Definida la geometría de los diferentes tipos litológicos, bajo el sistema automatizado del software Rockwork, entonces se construyeron dos perfiles estratigráficos del área de estudio (Figura 4). Los perfiles permitirían interpretar los resultados de futuros trabajos de microzonaciones sísmicas, bajo el rigor de las condiciones estratigráficas locales. Y de forma inmediata, se coloca a la ZMVT en la posibilidad de hacer un grupo de importante de pronósticos, sobre los incrementos de las intensidades macrosísmicas de acuerdo con la geología local (TC4-ISSMGE, 1999). Los perfiles o cortes estratigráficos para este caso de estudio generalizan los rasgos característicos de la geometría de los depósitos geológicos que tendría influencia en la respuesta sísmica de la ZMVT.

El perfil estratigráfico A-A', intercepta localidades desde el Nevado de Toluca a Lerma, donde las gravas se encuentra presente en todo el Valle de Toluca, con espesor promedio 13,0 m. Resalta el potente espesor (140 m) que alcanzan las intercalaciones de arcillas, limos y arenas en la zona de las Ciénegas de Lerma.

Figura 4. Perfiles estratigráficos típicos para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.



Fuente: Elaboración propia.

Otro sitio de interés interceptado por el corte se ubica en Calimaya donde las intercalaciones de arenas y arcillas alcanzan los 30,0 m de espesor, este último sitio fue validado por sondeos geoelectrónicos (SPIGAA, 2019). Por su parte, el perfil B-B', indica que la mayor parte del centro de Toluca (Capital del Estado de México), está emplazada en espesores de aproximadamente 20,0 m de gravas y arenas, subyacente por material piroclástico y rocas ígneas extrusivas como andesita y basalto está información fue comprobada a partir de 27 pozos. Sin embargo, desde el Barrio la Magdalena en la Ciudad de Toluca, se identifican potentes espesores (superan los 80,0 m) de materiales no consolidados representados por arenas, arcillas y limos que se extienden en dirección NW hasta el municipio de Temoaya.

En este apartado se logra la caracterización detallada de los principales tipos litológicos que subyacen la ZMVT, con la intención de sistematizar por primera vez la información contenida en 287 pozos realizados en diferentes fechas, y con diferentes fines. En especial, el producto generado esclarece la geometría de los diferentes depósitos, mientras que en el próximo apartado se clasificarán los diferentes tipos litológicos en función de sus características físicas y su posible respuesta sísmica.

4.2. Tipos litológicos y clasificación desde la óptica de la susceptibilidad sísmica

Los depósitos no consolidados son clasificados según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos con sustento en sus propiedades geotécnicas en: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media (CL), Limos inorgánicos y arenas muy finas (ML), Arenas bien graduadas (SW), Arenas arcillosas (SC), Limos inorgánicos (MH), Arenas limosas (SM), Arenas mal graduadas (SP) y Gravavas mal graduadas (GP). Mientras, que los depósitos consolidados, de acuerdo con sus rasgos petrográficos se dividen en: Material piroclástico, Andesitas y Basaltos.

Tabla 3. Principales característica y nivel de susceptibilidad sísmica de los depósitos consolidados.

Tipo de Roca	V_s^{**} m/s	Resistencia a la compresión simple (Mpa)	γ (g/cm ³)	Susceptibilidad Sísmica
Material piroclástico	760-1500	5.0-25 (Roca blanda)	2,10	Baja
Roca volcánica, Andesita	>1500	>250 (roca extremadamente dura)	2,77	Muy Baja
Roca volcánica, Basalto	>1500	>250 (Roca extremadamente dura)	2,74	Muy baja

Donde:

- V_s^{**} , indica las velocidades de ondas transversales propuestas por (FEMA, 2003) para tipos litológicos similares a los estudiados en este caso de estudio.
- **Resistencia a la compresión simple**, valores propuestos por (Brown, 1981)
- γ , representa la densidad natural, al ser procesadas aproximadamente 73 muestras para cada tipo de roca.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, considerando, (1) el comportamiento de algunas propiedades geotécnicas, (2) los estimados de velocidades de desplazamiento de las ondas transversales (V_s) y (3) las variaciones de intensidad macrosísmica experimentadas por tipos litológicos análogos en terremotos históricos; se asignan cuatro niveles de susceptibilidad sísmica: Alta, Media, baja y muy baja (Tablas 3 y 4).

Tabla 4. Principales característica y nivel de susceptibilidad sísmica de los depósitos no consolidados.

Descripción	Símbolo del Grupo	V _s * (m/s)	V _s ** (m/s)	H (%)	N	IP (%)	Y (g/cm ³)	Susceptibilidad Sísmica
Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media.	CL	161,42	<180	27,4	15	17,27	1,79	Alta
Limos inorgánicos y arenas muy finas.	ML	166,51	<180	32,5	16	5,8	1,71	Alta
Arenas bien graduadas.	SW	216,61	<180	37,3	27	-	1,69	Alta
Arenas arcillosas.	SC	202,45	<180	25,1	22	15,1	1,76	Alta
Limos inorgánicos.	MH	176,19	<180	93,8	18	31,95	1,45	Alta
Arenas limosas	SM	205,44	<180	26	23	-	1,60	Alta
Descripción	Símbolo del Grupo	V _s * (m/s)	V _s ** (m/s)	H (%)	N	IP (%)	Y (g/cm ³)	Susceptibilidad Sísmica
Arenas mal graduadas.	SP	235,97	360-760	19,7	35	-	1,05	Media
Gravas mal graduadas.	GP	229,09	360-760	9,9	32	-	1,86	Media

Donde:

- V_s*, indica las velocidades de ondas transversales estimadas en este trabajo con el empleo de las ecuaciones empíricas de Dikmen (2009).

- V_s**, indica las velocidades de ondas transversales propuestas por (FEMA, 2003) para tipos litológicos similares a los estudiados en este caso de estudio.

- H, contenido de agua promedio al ser procesadas aproximadamente 435 muestras para cada tipo de suelo.

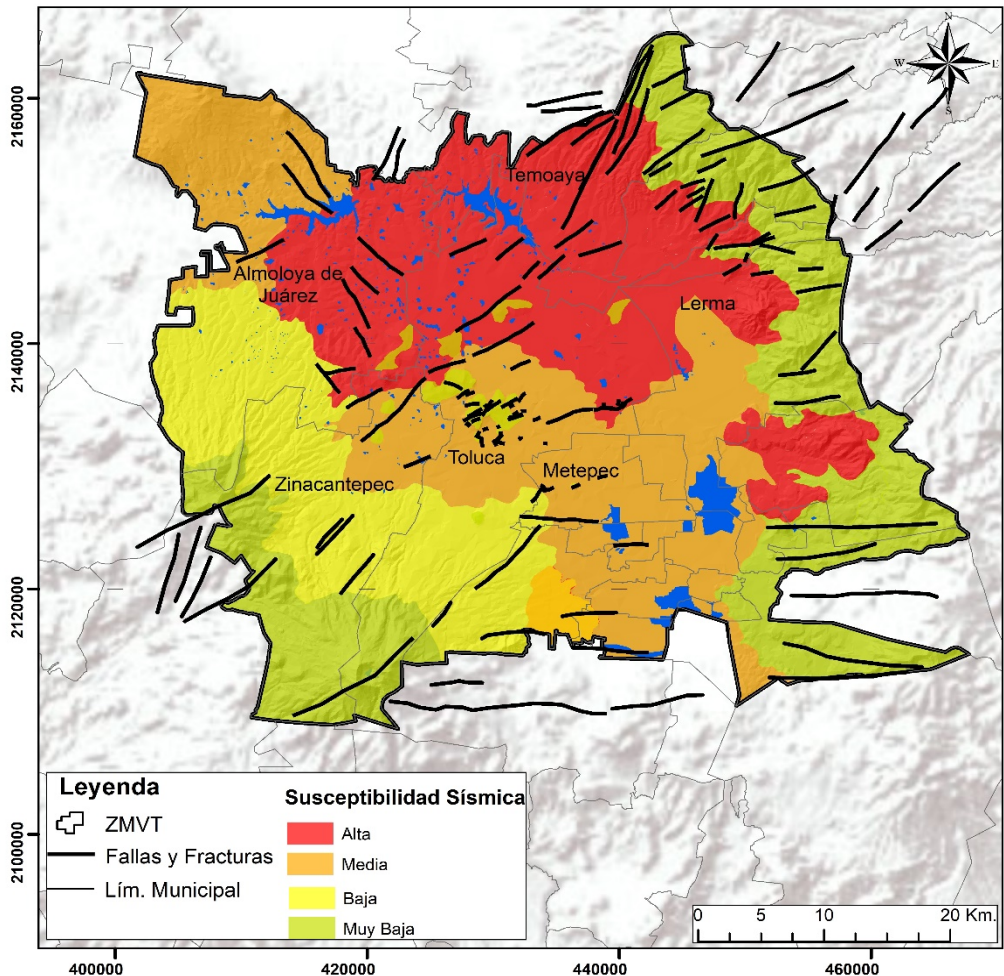
- N, número de golpes promedio del ensayo de penetración estándar (NSPT), estimado a partir de 573 sondeos donde se aplicó la prueba.

- IP, Índice de plasticidad promedio al ser procesadas aproximadamente 815 muestras para cada tipo de suelo.

- Y, representa la densidad natural, al ser procesadas aproximadamente 815 muestras para cada tipo de suelo.

La información presentada, sirvió de base para elaborar el mapa de susceptibilidad sísmica de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, entendiéndose el concepto de susceptibilidad, como la predisposición de los tipos litológicos a amplificar las ondas sísmicas tanto en amplitud como en el contenido frecuencial (Figura 5). A la cartografía presentada se le superpuso las fracturas y fallas, cartografiadas por Norini et al. (2006); García-Palomo et al. (2008); Bastida (2009) e IGCEM (2021); considerando que, la ruptura de fallas en superficie es uno de los fenómenos inducidos por sismos que pueden afectar a las vialidades, oleoductos, gaseoductos, edificios, entre otros.

Figura 5. Mapa de Susceptibilidad sísmica para la ZMVT.



Fuente: Las fallas y fracturas fueron cartografiadas por Norini et al., (2006); García-Palomo et al., (2008); Bastida, (2009); García-Palomo et al., (2008); IGCEM, (2021); Norini et al., (2006).

4.3. Zonificación del periodo dominante del suelo.

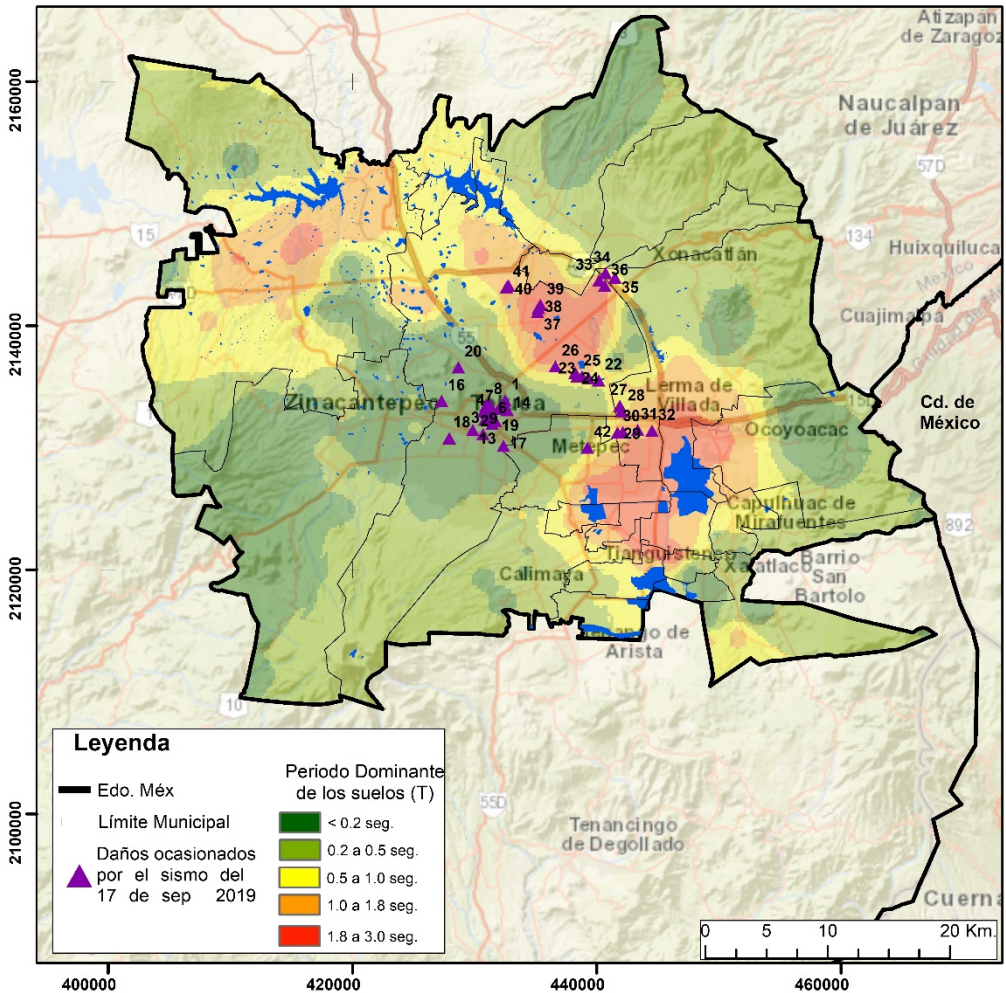
Con el conocimiento de los espesores que alcanzan los diferentes tipos litológicos y con el estimado de las velocidades de ondas transversales (Tablas 3 y 4), se estimó el periodo dominante en cada punto de sondeo. En este caso de estudio, se utilizó la ecuación $T=(4H/V_s)$, propuesta por Bard (1995). Los valores obtenidos fueron interpolados con el método geoestadístico de Kriging y se determinaron 5 rangos de periodos dominantes (Figura 6). La clase número 5, con rangos de 1,82 a 3,0 segundos en color rojo, representa los rangos de periodo dominantes más altos. El área correspondiente a este rango de T tiene un 43% de correspondencia con la Zona de Alta Susceptibilidad Sísmica (Figura 5), elemento que robustece y valida los resultados de este trabajo.

Empleando el modelo 3D que representa comportamiento espacial de los tipos litológicos sobre los que se emplaza la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (Figura 3), se verificó que, la clase número 5 (1,82 a 3,0 s) coincide espacialmente con espesores de suelos no consolidados que alcanzan hasta 100.0 metros de espesor. Datos extraídos de 37 pozos, indican la presencia, principalmente de arenas, arcilla y limos, que según los estudios de mecánica de suelos realizados clasifican según el SUCS en arenas arcillosas (SC), arcillas inorgánicas (CL) y limos inorgánicos (MH).

En las clases 3 y 4 (color naranja y amarillo) de 0.51 a 1.82 s, se verificó la existencia de depósitos no consolidados, con espesores entre los 30,0 y 50,0 m de intercalaciones de arenas con grava mal graduadas (SP), arenas arcillosas (SC) y arcillas inorgánicas (CL). Las clases 1 y 2 (tonalidades de verde) con periodos dominantes del suelo entre 0,21 y 0,51 s, corresponden a sitios donde el espesor de los suelos, no superan los 15,0 m, o afloran las rocas.

Sobre la cartografía del comportamiento del periodo dominante del suelo, se añadieron 42 puntos correspondientes a sitios que sufrieron daños estructurales en el sismo del 19 de septiembre de 2017, de 7,1 grados en la escala de Richter. Este último ejercicio, mostró que 24 puntos de daños guardan relación espacial con la clase número 5 y 4, con periodos dominantes del suelo (T) entre 1,01 a 3,0 s. Mientras que 2 puntos se relacionan con la clase 3 caracterizada por periodos dominantes de suelo (T) de 0,5 a 1,0 s. El resto de los daños están emplazado en valores de periodo dominante de (T) de 0,2 a 0,5 s.

Figura 6. Mapa del periodo dominante de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.
Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

La metodología seguida en esta investigación puede ser replicada en escenarios urbanos que aún no cuenten con microzonaciones sísmicas de carácter instrumental, pero, sin embargo, si cuentan con un volumen importante de información geológico-geotécnica. Los resultados hasta aquí mostrados y discutidos constituyen un primer acercamiento a la estimación de la respuesta sísmica local de los materiales geológicos que sirven de base a la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Entre las principales aplicaciones de los productos obtenidos, se pueden enumerar: (1) en los planes de desarrollo urbano con la finalidad de regular los usos de suelo e incrementar

la resiliencia de la ciudad, (2) establecer prioridades en la gestión local del riesgo, especialmente para proponer de forma anticipadas medidas de reducción de vulnerabilidades, (3) en el ordenamiento territorial, (4) en la actualización del Reglamento de Construcciones y (5) para la actualización del Atlas de Riesgos Municipal. Es importante, mencionar que los resultados obtenidos, no son aplicables a proyectos constructivos específicos, por lo que no se sustituyen los estudios de mecánica de suelos o estudios de riesgos.

5. Conclusiones

Actualmente en algunos escenarios urbanos y en particular para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), existe incertidumbre en aspectos relacionados con la respuesta sísmica local. La seguridad de las ciudades y su exposición frente a sismos depende de diversos aspectos: características de la fuente sísmica, la trayectoria de propagación de las ondas, las condiciones geológicas específicas del emplazamiento, la vulnerabilidad estructural de la infraestructura, entre otros factores.

Es por ello, que este trabajo realiza un aporte al conocimiento en uno de los aspectos antes mencionados, exactamente en analizar las condiciones de respuesta sísmica de la ZMVT. En este sentido se identificaron 7 tipos litológicos; de ellos 4 de carácter no consolidado (gravas, arenas, limos y arcillas) y 3 consolidados (Piroclastos, Andesitas y Basaltos). Así mismo, se definió la geometría de los tipos litológicos en el subsuelo, con sustento en 287 perforaciones, 23 datos de afloramientos y mediante el procesamiento de datos en el software RockWork. Se construyeron 2 perfiles que aclaran las condiciones estratigráficas más generales y permiten interpretar los resultados de futuros trabajos de microzonaciones sísmicas, bajo el rigor de las condiciones estratigráficas locales.

Se caracterizan los 7 tipos litológicos, atendiendo a las propiedades geotécnicas y dinámicas que predeterminan la susceptibilidad sísmica. La caracterización de los tipos litológicos se traduce en la cartografía de susceptibilidad sísmica, donde se definen 4 niveles: alta, media, baja y muy baja.

Finalmente, y haciendo uso de la información geotécnica, se estima el periodo dominante del suelo. En este caso, se emplearon ecuaciones empíricas de amplio uso en la literatura técnica y en la solución de otros casos de estudios. Para la ZMVT se definieron 5 clases o rangos de periodos dominantes (T): menor que 0,2 s, de 0,2 a 0,5 s, 0,5 a 1,0 s, 1,0 a 1,8 s y de 1,8 a 3,0 s. En todos los casos se caracterizó cada intervalo, en función de la estratigrafía del sitio.

El trabajo presentado, y la aplicabilidad de los productos generados, pueden servir de ejemplo a replicar, en escenarios urbanos que carezcan de microzonaciones sísmicas, sin embargo, estos sitios deberán contar con un volumen importante de información geotécnica. Los resultados obtenidos, pueden ser empleados en planes de desarrollo urbano; para establecer prioridades en la gestión local del riesgo,

especialmente para proponer de forma anticipadas medidas de reducción de vulnerabilidades; y en el ordenamiento territorial

6. Referencias bibliográficas

- Aceves-Quesada, F., Legorreta Paulín, G., & Álvarez Ruíz, Y. (2014). Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 329–342. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94331762008>
- Aparicio, A. T. (2017). Vulnerabilidad y resiliencia en conjuntos urbanos de la Ciudad de México. *Vulnerability and resilience of urban complexes in Mexico City*. Año, 19, 2017–2019.
- Bard, P. (1995). Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues. *Proceedings of 10Th European Conference on Earthquaker Engineering*, 10(January 1995), 305–323.
- Bastida, M. (2009). Crisis del agua en el Valle de Toluca. *Repercusiones socioambientales por el trasvase*. https://www.academia.edu/31808594/Crisis_del_agua_en_el_Valle_de_Toluca_Repercusiones_socioambientales_por_el_trasvase
- Beresnev, I. A., & Kuo-Liang Wen. (1995). P-wave amplification by near-surface deposits at different excitation levels. *Bulletin - Seismological Society of America*, 85(5), 1490–1494.
- Brown, E. T. (1981). *Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods*. Oxford: Pergamon press. <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:000309036>
- Cabas, A., Rodriguez-Marek, A., & Bonilla, L. (2017). Estimation of Site - Specific Kappa (κ_0) - Consistent Damping Values at KiK - Net Sites to Assess the Discrepancy between Laboratory - Based Damping Models and Observed Attenuation (of Seismic Waves) in the Field. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107, 2258–2271. <https://doi.org/10.1785/0120160370>
- Cárdenas-Soto, M., & Chávez-García, F. J. (2003). Regional Path Effects on Seismic Wave Propagation in Central Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), 973–985. <https://doi.org/10.1785/0120020083>
- Chávez-García, F. J. (2009). Ambient Noise and Site Response: From Estimation of Site Effects to Determination of the Subsoil Structure. 53–71. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9196-4_5
- Chávez-García, F. J., & Cuenca, J. (1998). Site Effects and Microzonation in Acapulco. *Earthquake Spectra*, 14(1), 75–93. <https://doi.org/10.1193/1.1585989>
- Chávez-García, F. j., Monsalve, H., Gómez, M., & Vila, J. L. (2018). Vulnerability and Site Effects in Earthquake Disasters in Armenia (Colombia). I—Site Effects. *Geosciences*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/geosciences8070254>
- Chávez-García, F. J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de Sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del Valle Parway. *Obras y Proyectos*, 6–30.

- http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132014000200001&nrm=iso
- COESPO. (2019). Proyecciones de población de los municipios del Estado de México 2019-2030. Secretaría General de Gobierno Edo Méx., 1, 44. <https://coespo.edomex.gob.mx/sites/coespo.edomex.gob.mx/files/files/2019/Nuevos/proyecciones.pdf>
- Cua, G., & Heaton, T. (2007). The Virtual Seismologist (VS) method: A Bayesian approach to earthquake early warning. *Earthquake Early Warning Systems*, 97–132. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72241-0_7
- Dikmen, Ü. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1), 61–72. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/007>
- Domínguez Caicedo, M. (2014). Períodos de vibración de las edificaciones. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 8(2), 1–13. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193932724001>
- Evernden, J. F., Kohler, W. M., & Clow, G. D. (1981). Seismic intensities of earthquakes of conterminous United States; their prediction and interpretation. In *Professional Paper*. <https://doi.org/10.3133/pp1223>
- FEMA. (2003). *Nehrp Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (Fema 450)*. Part 1, Fema 450, 338.
- Ferraes, S. G. (1988). The optimum Bayesian probability procedure and the prediction of strong earthquakes felt in Mexico city. *Pure and Applied Geophysics*, 127(4), 561–571. <https://doi.org/10.1007/BF00881744>
- Flores-Estrella, H., Yussim, S., & Lomnitz, C. (2007). Seismic response of the Mexico City Basin: A review of twenty years of research. *Natural Hazards*, 40(2), 357–372. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-0034-6>
- García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López Miguel, C., Galván García, A., Carlos Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(1), 158–178. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57225110>
- Ghofrani, H., Atkinson, G. M., & Goda, K. (2013). Implications of the 2011 M9.0 Tohoku Japan earthquake for the treatment of site effects in large earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(1), 171–203. <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9413-4>
- Gonzalez Herrera, R., Mora Chaparro, J. C., Aguirre González, J., & Aguilar Carboney, J. A. (2020). Efecto De Sitio En Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Un Determinante En Los Daños Históricos En Edificaciones. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 102, 42–64. <https://doi.org/10.18867/ris.102.511>
- González Huizar, H. (2019). La Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra: Los Grandes Terremotos en México. *División de Ciencias de La Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California, México*, 39(1), 21.
- Hayes, G. P., Meyers, E. K., Dewey, J. W., Briggs, R. W., Earle, P. S., Benz, H. M., Smoczyk, G. M., Flamme, H. E., Barnhart, W. D., Gold, R. D., & Furlong, K. P. (2017). Tectonic Summaries of Magnitude 7 and Greater Earthquakes from 2000 to 2015. *Open-File Report*, 91. <https://doi.org/10.3133/ofr20161192>

- IGCEM. (2021). Visor Atlas Cibernético del Estado de México. <http://acvisor.edomex.gob.mx/AtlasCibernetico/portal/visorAtlas.do>
- Khan, S., Waseem, M., & Jan, S. (2021). Correction to: Site response studies in Peshawar using the Nakamura technique of HVSR (*Arabian Journal of Geosciences*, (2021), 14, 3, (193), 10.1007/s12517-021-06527-3). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5), 1–2. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06708-0>
- Khazai, B., Daniell, J., Duzgun, S., Kunz-Plapp, T., & Wenzel, F. (2014). Framework for Systemic Socio-economic Vulnerability and Loss Assessment. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 31, 89–130. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8835-9_4
- Ladak, S., Molnar, S., Eeri, M., & Palmer, S. (2021). CENA Special Issue Multi-method site characterization to verify the hard rock (Site Class A) assumption at 25 seismograph stations across Eastern Canada. *Earthquake Spectra*, 37(S1), 1487–1515. <https://doi.org/10.1177/87552930211001076>
- López, M. (2019). Cartografía geológico-ambiental de los volcanes de la zona centro de Toluca con énfasis en controles estructurales y su influencia en las características hidrogeológicas del área. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/108985>
- Macau, A., Figueras, S., Susagna, M. T., & Ledesma, A. (2008). Microzonación sísmica contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas. In TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). Universitat Politècnica de Catalunya. <http://www.tesisenred.net/handle/10803/6257>
- Mi, B., Hu, Y., Xia, J., & Socco, L. V. (2019). Estimation of horizontal-to-vertical spectral ratios (ellipticity) of Rayleigh waves from multistation active-seismic records. *Geophysics*, 84(6), EN81–EN92. <https://doi.org/10.1190/GEO2018-0651.1>
- Motamed, H., Ghafory-Ashtiany, M., Amini-Hosseini, K., Mansouri, B., & Khazai, B. (2020). Earthquake risk-sensitive model for urban land use planning. *Natural Hazards*, 103(1), 87–102. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03960-7>
- Musson, R. (2012). Intensity and Intensity Scales. *New Manual of Seismological Observatory Practice 2*, January, 1–41. <https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2>
- Napolitano, F., Gervasi, A., La Rocca, M., Guerra, I., & Scarpa, R. (2018). Site Effects in the Pollino Region from the HVSR and Polarization of Seismic Noise and Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(1), 309–321. <https://doi.org/10.1785/0120170197>
- Norini, G., Groppelli, G., Lagmay, A. M. F., & Capra, L. (2006). Recent left-oblique slip faulting in the central eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: Seismic hazard and geodynamic implications. *Tectonics*, 25(4), 1–21. <https://doi.org/10.1029/2005TC001877>
- Ordaz, A., Hernández, J. A., & Garatachia, 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/http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9340>
- Preciado, A., Ramirez-Gaytan, A., Lazcano Diaz del Castillo, S., Preciado Guzmán, I., Gutierrez, N., & Santos, J. C. (2017). Vulnerabilidad de Edificios Ante Resonancia Sísmica en Guadalajara y Zapopan Por el Sismo del 11 de Mayo de 2016 Mw=4.9. <http://quijote.biblio.iteso.mx/licencias/CC-BY-NC-ND-2.5-MX.pdf>

- 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>
- Shafique, M., Hussain, M. L., Asif Khan, M., van der Meijde, M., & Khan, S. (2018). Geology as a proxy for Vs30-based seismic site characterization, a case study of northern Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(12). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3648-6>
- Singh, S. K., Plata-Martínez, R., Pérez-Campos, X., Espíndola, V. H., Arroyo, D., & Iglesias, A. (2019). Evidence of directivity during the earthquakes of 8 and 10 May 2014 (M w 6.5, 6.1) in the Guerrero, Mexico seismic gap and some implications. *Journal of Seismology*, 23(4), 683–697. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09829-y>
- TC4-ISSMGE. (1999). *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard*, Revised edition. In TC4 Committee of ISSMFE, Japanese Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Topozada, R. T., Bennett, J. H., Borchardt, G., Saul, R., & Davis, J. F. (1988). Planning scenario for a major earthquake on the Newport – Inglewood fault zone. California Dept. of Conservation – Division of Mines and Geology, 102.
- Torrieri, F. (2020). Scenario Analysis and Strategic Environmental Assessment. In G. Campeol (Ed.), *Strategic Environmental Assessment and Urban Planning: Methodological Reflections and Case Studies* (pp. 31–45). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46180-5_3
- Touhami, S., Lopez-Caballero, F., & Clouteau, D. (2021). A holistic approach of numerical analysis of the geology effects on ground motion prediction: Argostoli site test. *Journal of Seismology*, 25(1), 115–140. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09961-0>
- Trifunac, M. D., & Brady, A. G. (1976). Correlations of peak acceleration, velocity and displacement with earthquake magnitude, distance and site conditions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 4(5), 455–471. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eqe.4290040504>
- Wen, K. L., Bard, P. Y., Sánchez-Sesma, F. J., Higashi, S., Iwata, T., & Maeda, T. (2018). Special issue “Effect of surface geology on seismic motion: challenges of applying ground motion simulation to seismology and earthquake engineering.” *Earth, Planets and Space*, 70(1), 0–2. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0937-y>