

Hundimientos diferenciales como factor de daños estructurales en edificaciones de la Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México: el paleocauce del río Tepanecas

Felipe García-Villegas*, José Asunción García-Valle** y Roberto Téllez-Cabrera***

Dirección Ejecutiva de la Unidad de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil, Alcaldía Azcapotzalco, Manuel Salazar esquina Lucio Blanco, Col. Providencia, 02440, Azcapotzalco, Ciudad de México, México.

*Autor para correspondencia (F. García-Villegas): fgarciavi00@gmail.com

** jgvalle62@hotmail.com, *** robertotel54@yahoo.com.mx

EDITORES:

Lucía Capra
Natalia Pardo Villaveces
Luigi Solari

CÓMO CITAR:

García-Villegas, F., García-Valle J. A., & Téllez-Cabrera, R. (2025). Hundimientos diferenciales como factor de daños estructurales en edificaciones de la Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México: el paleocauce del río Tepanecas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 42(3), 180–197. DOI: <https://dx.doi.org/10.22201/igc.20072902e.2025.3.1858>

Manuscrito recibido: diciembre 20, 2024
Manuscrito corregido recibido: noviembre 6, 2025
Manuscrito aceptado: noviembre 8, 2025
Publicado en línea: diciembre 1, 2025

COPYRIGHT

© 2025 Los autores.

Este es un artículo de acceso-libre publicado y distribuido por la Universidad Nacional Autónoma de México bajo los términos [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) que permite uso irrestricto, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se otorguen los créditos correspondientes al (los) autor(es) original(es).



RESUMEN

Este estudio de evaluación del riesgo de edificaciones con daños e inspección de rasgos geológicos en el terreno de la alcaldía de Azcapotzalco se realizó en el período de octubre de 2021 a septiembre de 2024, con los objetivos de delimitar las zonas vulnerables, determinar los elementos y procesos naturales que modifican desfavorablemente la respuesta del terreno ante una ocurrencia de sismo y proponer un modelo del subsuelo que explique el origen de los daños como punto de partida para planear la mitigación.

El trabajo en esta zona se enfocó en el análisis del marco geológico y geotécnico, en la descripción de formas erosivas en el terreno, en los resultados de exploraciones profundas (perforación y geofísica) realizadas en la Ciudad de México, en estudios de microzonificación, en la comparación de registros sísmicos en estaciones de la red del Valle de México y en datos del registro arqueológico.

Se encontró la presencia de hundimientos circulares y daños en las construcciones, y se formularon las condiciones de formación y desarrollo de éstos. Se delimitó una zona vulnerable que cruza el área en dirección NW-SE. Se realizó la interpretación de la geología local. Se explicaron discrepancias con el marco geotécnico. De la información analizada, se considera que el modelo geológico que explica de forma satisfactoria la presencia de la zona vulnerable ante sismos en parte de la alcaldía de Azcapotzalco es el relleno de un paleocauce que cruza la demarcación en dirección NW-SE y al que se propone nombrar “paleocauce Tepanecas”, para diferenciarlo de otros ríos históricos de la región.

Palabras clave: Azcapotzalco; hundimientos circulares; daños estructurales; riesgo; México.

ABSTRACT

This risk assessment of damaged buildings and geological features inspection on the Azcapotzalco territorial demarcation was conducted from October 2021 to September 2024. The aims were to identify vulnerable areas, understand the natural elements and processes that negatively impact the ground's response during an earthquake, and develop a subsurface model that explains the cause of the damage as a basis for mitigation planning.

The work in this area focused on analyzing the geological and geotechnical framework, describing erosional features in the terrain, the results of deep explorations (drilling and geophysics) carried out in Mexico City, microzonation studies, and comparing seismic records from stations in the Valley of Mexico network, along with data from the archaeological record.

The presence of circular sinkholes and damaged buildings was observed, and the conditions for their formation and development were identified. A vulnerable zone crossing the area in a NW-SE direction was outlined. An interpretation of the local geology was performed. Discrepancies with the geotechnical framework were explained. Based on the analyzed information, it is believed that the geological model best explaining the earthquake-vulnerable zone in part of the Azcapotzalco municipality is the filling of a paleochannel that runs in a NW-SE direction and is proposed to be called the "Tepanecas paleochannel," to differentiate it from other historical rivers in the region.

Keywords: Azcapotzalco; sinkholes; structural damage; risk; Mexico.

INTRODUCCIÓN

La alcaldía de Azcapotzalco se ubica en la porción norponiente de la Ciudad de México, limita con las alcaldías de Gustavo A. Madero al oriente, Cuauhtémoc al sureste y Miguel Hidalgo al sur, y con los municipios del Estado de México, Naucalpan de Juárez al poniente y Tlalnepantla de Baz al norte (Figura 1). Se asienta en un relieve predominantemente plano, con una altitud media de 2240 m s.n.m., tiene una extensión de 33.66 km², la cual se considera completamente urbanizada y posee una población de 432205 habitantes.

Sus primeros pobladores se asentaron entre 1000 y 1250 d.C. en los dominios del centro político chichimeca de Tenayuca (Castañeda de la Paz, 2015).

En el período de 2021 a 2024, en esta alcaldía, el área de protección civil realizó revisiones en edificaciones de uso público y privado con la finalidad de determinar la existencia de daños y calificar su riesgo. Los daños calificados como riesgo alto (el criterio de calificación se detalla más adelante) aparecieron luego del sismo del 19 de septiembre de 2017, con magnitud 7.1.

El Gobierno de la Ciudad de México y las compañías constructoras a su cargo, en septiembre de 2024, realizaban una intervención de refuerzo de las cimentaciones o renivelaciones de edificios, en tres unidades habitacionales, donde también se realizaron algunos estudios geofísicos, pero sin exploración directa.

Al buscar una explicación de la causa de estos daños, surgieron algunos cuestionamientos, tales como: ¿es posible determinar las

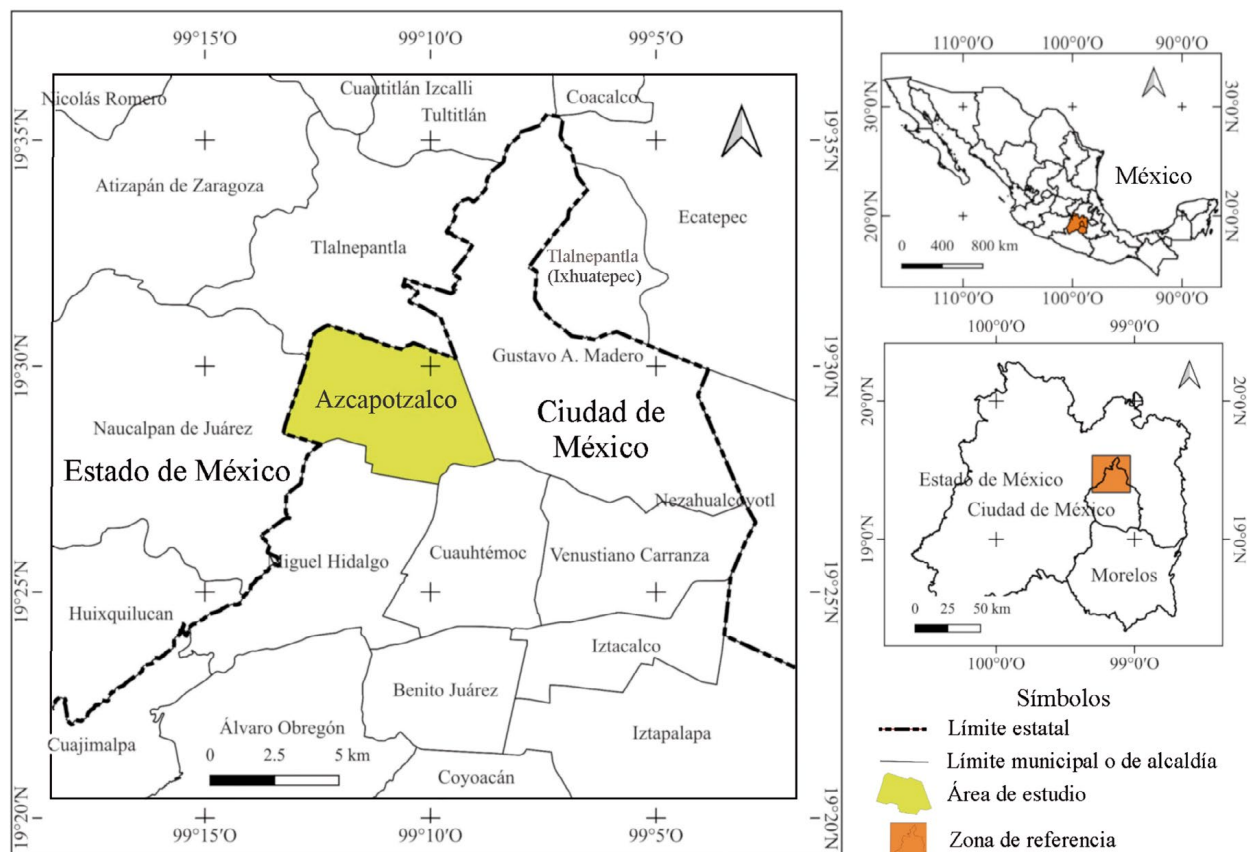


Figura 1. Localización de la alcaldía Azcapotzalco.

condiciones del terreno capaces de incrementar el riesgo ante la ocurrencia de un sismo?

Como posibles hipótesis del origen de los daños, pueden mencionarse: el fenómeno sísmico como factor principal, la presencia de fallas activas, actividad antrópica o rasgos de erosión, como hundimientos y grietas.

Así, los objetivos principales de este trabajo fueron determinar las zonas de riesgo, validar o en su caso, proponer el modelo del subsuelo y determinar los procesos que modifican desfavorablemente la respuesta del terreno a un sismo.

MÉTODO DE TRABAJO

Para esta investigación, se consideran los sitios de interés encontrados en las inspecciones oculares rápidas de edificaciones con daños, realizadas por la Dirección Ejecutiva de la Unidad de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la alcaldía de Azcapotzalco. De manera paralela, se realizaron observaciones de carácter geológico.

La base cartográfica se integró con información digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2024) y se procesó con el *software* libre QGIS. También, se recopiló la información disponible en la literatura sobre los temas de morfología, geología, geotecnia, exploraciones profundas del subsuelo, sismicidad y del registro arqueológico. A partir de lo anterior, se interpretó la geología local y se efectuó el análisis e integración de dicha información para proponer un modelo geológico capaz de explicar el fenómeno que origina los daños.

RESULTADOS

Trabajos de campo

Verificación de daños en edificaciones

La inspección ocular se basa en las recomendaciones del formato de captura de datos para la evaluación estructural (Figura 2) del Sistema Nacional de Protección Civil (Díaz-Pérez *et al.*, 2021). La evaluación de daños considera la identificación del tipo de daño, su magnitud y el elemento en el que se presenta. Los daños de mayor riesgo consisten en grietas y fracturas en muros, losas, columnas y bardas, deformaciones en estructuras de acero, pandeo de las losas, hundimiento y desplome, mientras que los daños secundarios se presentan en acabados, fachadas, vidrios de ventanas o puertas, instalaciones y plafones.

De acuerdo con lo anterior, se califica el riesgo como:

- **Bajo** (daño ligero), cuando la estructura es segura y habitable.
- **Medio** (daño medio), cuando la estructura muestra indicios de comportamiento anómalo, es habitable con reserva.
- **Alto** (daño severo o colapso), cuando la estructura es insegura o con colapso, inhabitable.

Para este análisis, se consideraron exclusivamente los hallazgos de daños en edificaciones que se calificaron con un grado de riesgo medio a alto, descartando las causas colaterales (vicios ocultos, falta de mantenimiento, fallas en las instalaciones, entre otras), excepto condiciones atribuibles al terreno.

Resultados de las verificaciones a edificaciones (riesgo alto o medio de habitación)

En la Tabla 1 se describen brevemente los casos representativos de las unidades habitacionales y de los edificios públicos con afectaciones. En la Figura 3 se muestra la ubicación de los sitios relacionados en la tabla mencionada, y en las Figuras 4 y 5 se ilustra la mayor parte

de ellos. Entre ellos se encuentran (mostrados con sus siglas en la Figura 3) la Escuela Secundaria Técnica 15 (S15), con daños en muros y hundimientos en patios; el Deportivo 20 de Noviembre (D20), el Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica Azcapotzalco 1 (CON, Figura 4b) y el Centro de Atención Múltiple 4 (CA4), con daños en muros y bardas; el entorno del acceso sureste a la estación del Metro Vallejo (MVA, Figura 5a) con hundimientos y daños en muros vecinos; el parque Alameda Norte (ALN, Figuras 6a y 6b), el Deportivo Azcapotzalco (DAZ), las avenidas Ceylán (VCE) y de Las Granjas (VGR) y la calzada Azcapotzalco-La Villa (VAV, Figura 7b), con hundimientos que afectan la vialidad.

Casos destacados

Hay tres casos que presentan daños severos identificados desde 2017, en los que han intervenido distintas entidades gubernamentales mediante estudios y acciones de reparación. Aquí, además de las fracturas que afectan a elementos estructurales, es frecuente el desplome, es decir, la diferencia en la verticalidad de una construcción.

Unidad Habitacional Xochináhuac. Se ubica en la parte noroeste de la alcaldía (UXO en la Figura 3). En esta unidad habitacional se presentan hundimientos en los patios interiores y exteriores, así como desplomes y separación de módulos de escaleras (Figura 5b). En este período (2021 a 2024), el Instituto para la Seguridad de las Construcciones elaboró dictámenes estructurales de cuatro conjuntos y, de éstos, en la zona noreste se está interviniendo la cimentación (Figura 5c) de dos edificios que mostraban los desplomes más fuertes.

La Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México (SGIRPCCM) gestionó un estudio con georradar y otro con tomografía eléctrica (CIBERNA, 2023). Los reportes técnicos indican que los radargramas (que profundizan cerca de 5 m a partir de la superficie, figura 5d) muestran hipérbolas sin relación entre ellas que se asocian con objetos puntuales en material de relleno, luego zonas difusas, con pérdida de energía, asociadas con humedad. Con base en esas evidencias, concluyen que no se detectaron anomalías asociadas a cavidades u oquedades. Por otro lado, los resultados del método eléctrico (hasta una profundidad de 29 m) indicaron la presencia de dos unidades, U1 con resistividades de 30 a 100 ohm·m, asociada con material de relleno con espesor máximo de 8 m y U2 con resistividades de 4 a 30 ohm·m, asociada con capas de limo, arcilla y arena. Con base en estos datos, se interpretó la presencia de un nivel freático a una profundidad de alrededor de 6,5 m. De lo anterior, puede considerarse que la investigación del radar quedó corta y que, de la U2 identificada con el método eléctrico, no hay evidencia geológica.

Unidad Habitacional Matlacóatl. Se encuentra en la porción norte de la alcaldía (UMA, Figura 3). En el período actual, en cuatro de los edificios persisten daños, como desplomes que se evidencian en separaciones mayores de 12 cm entre el cuerpo de escaleras y los accesos a los departamentos (Figuras 5e y 5f), así como grietas en los perímetros de los edificios. También, hay desplomes de la barda perimetral de colindancia al oeste con el parque Alameda Norte, la cual en varios tramos ha colapsado (Figura 6a) y hundimientos evidentes en el parque, junto a la barda mencionada (Figura 6b).

En apoyo al Comité para la Reconstrucción de la Ciudad de México, la SGIRPCCM (2024) realizó un estudio con el método de tomografía eléctrica, con líneas orientadas E-W, tanto en la unidad habitacional (hasta 11 m de profundidad, Figura 6c) como en la Alameda Norte (hasta 34 m de profundidad), de lo que resultó la determinación de dos unidades (interpretadas sin perforación): en la zona habitacional, U1 con resistividades de 0.2 a 14 ohm·m, asociada

INFORMACIÓN GENERAL		Fecha:	Coordenadas: (_____ N, _____ O, _____ msnm)
Nombre del inmueble:			
Calle y número:		Colonia:	Código postal:
Pueblo o ciudad:		Municipio/Alcaldía:	Estado:
Referencias: (entre calles "A" y "B", un sitio notable, etc.)			
Contacto: nombre, cargo, correo-e:			Teléfono: +()
Uso: ☐ Vivienda ☐ Oficinas ☐ Comercio ☐ Escuela ☐ Otro: _____ ☐ Desocupada	☐ Hospital ☐ Iglesia ☐ Reunión (cine/estadio/salón) ☐ Industrial (fábrica/bodega)	Número total de niveles, n = _____ Número de sótanos: _____ Pisos para estacionamiento: _____ Número ocupantes: _____ ☐ Elevador ☐ Escalera de emergencia	Año de: de construcción: _____ de daño severo: _____ de rehabilitación: _____ Dimensiones: Frente X = _____ m Fondo Y = _____ m
Características hidráulicas: ☐ Alcantarilla pluvial, distancia: _____ m ☐ Cabeza de atarjea / termina tubería ☐ Vaso regulador (presa) dist: _____ m (no hay pozos de ventilación calle arriba)			
Otras características: Mantenimiento: _____ ☐ Zona de seguridad ☐ Sistema contra incendio Cisterna/tinacos: _____ m ³			
SISTEMA ESTRUCTURAL			
La dirección X es paralela a la fachada, indicar X, Y en el croquis			
X, Y ☐ Marcos de acero ☐ Marcos de concreto ☐ Columnas y losa plana (sin vigas) ☐ Uso de contravientos	en X, Y ☐ Muros de concreto ☐ Muros de carga de mampostería ☐ Marcos y muros diafragma ☐ Muros de adobe o bahareque ☐ Muros de madera, lámina, otros	Muros de mampostería ☐ Confinada (castillos) ☐ Refuerzo interior ☐ Simple (sin refuerzo) ☐ Con refuerzo horizontal	Sistema de piso ☐ Losa maciza ☐ Losa reticular ☐ Vigüeta y bovedilla ☐ No se sabe
Sistema de techo ☐ Igual al de piso ☐ Lámina ☐ Teja ☐ Otro: _____	Cimentación ☐ Zapatas aisladas ☐ Zapatas corridas ☐ Cimiento de piedra ☐ Losa de cimentación	Datos geométricos Altura PB = _____ cm Altura tipo = _____ cm Núm. Col X = _____ Núm. Col Y = _____ CV = ContraVenteo, MD = Muro diafragma	Secciones Columna prom: ☐ I ☐ H ☐ b = _____ h = _____ cm Trabe prom: ☐ I ☐ H ☐ b = _____ h = _____ cm Concr. $\Sigma L_x =$ _____ m $\Sigma L_y =$ _____ m t = _____ cm Mamp. $\Sigma L_x =$ _____ m $\Sigma L_y =$ _____ m t = _____ cm t = espesor sin recubrimiento, ΣL = long total
VULNERABILIDAD Irregular en Elevación ☐ Planta baja de mayor altura ☐ Muros no llegan a la cimentación ☐ Planta baja flexible ☐ Columna corta Irregular en Planta ☐ Asimetría por muros, cubos, cargas ☐ Grandes aberturas, entrantes/salientes ☐ Geometría irregular en planta "L", "T", "H"...			
Posición del edificio en la manzana: ☐ Esquina ☐ Medio ☐ Aislado Posición cubos escalera/elevadores: ☐ Esquina ☐ Borde ☐ Centro ☐ Grandes masas o aumento en pisos superiores ☐ Reducción brusa de pisos superiores Separación edificio vecino: _____ cm			
EVALUACIÓN DE DAÑOS			
Geotécnicos: ☐ Grietas en el terreno ☐ Hundimientos: _____ cm ☐ Inclinación del edificio: _____ % Losas: ☐ Colapso ☐ Grietas máx: _____ mm ☐ Flecha máx: _____ cm Conexiones: ☐ Falla	Columnas ☐ Colapso ☐ Grietas cortante ☐ Grietas flexión ☐ Aplastamiento ☐ Pandeo barras ☐ Pandeo placas ☐ Falla soldadura Trabes ☐ Colapso ☐ Grietas cortante ☐ Grietas flexión ☐ Aplastamiento ☐ Pandeo barras ☐ Pandeo placas ☐ Falla soldadura Muro Concreto ☐ Colapso ☐ Grietas cortante ☐ Grietas flexión ☐ Aplastamiento ☐ Pandeo barras ☐ Pandeo placas ☐ Falla soldadura Mampost. ☐ Colapso ☐ Grietas cortante ☐ Grietas flexión ☐ Aplastamiento ☐ Pandeo barras ☐ Pandeo placas ☐ Falla soldadura	Entrepiso crítico (más débil y/o más dañado): No. de columnas (o muros) daño severo = _____ (colapso, aplastamiento, pandeo, grietas > 2 mm) Total de columnas (muros) en el entrepiso = _____ NIVEL DE DAÑO DE LA ESTRUCTURA ☐ Colapso total ☐ Colapso parcial ☐ Daño severo ☐ Daño medio ☐ Daño ligero	Otros daños: ☐ Vidrios ☐ Acabados ☐ Plafones ☐ Fachadas ☐ Bardas y pretilas ☐ Cubos (escalera/elevador) ☐ Instalaciones
CROQUIS DEL INMUEBLE			
Planos: ☐ Arquitectónico ☐ Estructural ☐ Mem. Calc. ☐ Constanta Seg. Estr.			
(Marcar el Norte) 			

Figura 2. Formato de captura de datos para la evaluación estructural del Sistema Nacional de Protección Civil (Díaz-Pérez et al., 2021)

Tabla 1. Unidades habitacionales y edificios públicos con daños (riesgo alto o medio) en la alcaldía Azcapotzalco.

Localidad	Uso	Tipo de daño	Calificación del riesgo	Observaciones
Unidad Manuel Rivera Anaya (UMR).	Habitacional. 5 niveles. Muros de mampostería y losas de concreto.	Hundimientos diferenciales, desplomo aparente, grietas en muros.	Medio	Más de 5 edificios con problemas.
Unidad Xochináhuac (UXO).	Habitacional. Módulos de 5 y 3 niveles. Muros de relleno y losas de concreto.	Hundimientos en patios, desplomo aparente, separación de escaleras, grietas en muros.	Alto	Daños en 4 edificios de 4 módulos. Intervención de refuerzo de la cimentación en proceso.
Unidad Ecológica Novedades Impacto (UEN).	Habitacional. 5 niveles. Muros de mampostería y losas de concreto.	Hundimientos, desplomo aparente, deformación en marcos de puertas.	Alto	Dos edificios con daños. Un edificio con desplomo de 1.6%. Figura 4c.
Primaria Jesús Sotelo Inclán (PJS).	Escolar. Mampostería y losas de concreto.	Daños severos en un edificio.	Alto	Se demolió y se repuso la construcción del edificio.
Secundaria Técnica 98 SN (S98).	Escolar. Estructura de acero, mampostería y losas de concreto.	Desplomo aparente, deformación de estructura, fracturas en muros.	Alto	Edificio inhabilitado. Figura 4e.
Unidad Habitacional Matlacóatl (UMA).	Habitacional. 6 niveles. Muros de relleno y losas de concreto.	Hundimientos, desplomo, separación de escaleras, grietas.	Alto	Renivelación de edificios por la constructora original, 4 reincidieron.
Internado primaria No. 2, Ejército Mexicano (PEM).	Escolar.	Hundimientos, daños severos en un edificio.	Alto	Se demolió. Figura 4f.
Centro Capacitación para el Trabajo Industrial 1 (CEC).	Escolar. Almacén y Oficina administrativa con daños.	Hundimientos, fracturas en muros, bardas y deformación en losas.	Alto	Notificado a autoridades del plantel.
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESI).	Escolar. Daños muros de laboratorios y escaleras de edificio de aulas.	Hundimientos diferenciales, grietas en muros y escaleras.	Alto	Notificado a autoridades del plantel. Figura 4d.
Centro de Estudios Científicos y Tecnológico. 8 (CE8).	Escolar. Daños en edificio de talleres y laboratorios.	Hundimientos, daños severos en elementos estructurales.	Alto	Demolición programada a agosto de 2024.
Unidad Habitacional El Jagüey-Pantaco (UPA).	Habitacional. 4 niveles. Mampostería y losas de concreto.	Hundimientos, desplomo, fracturas severas en muros y elementos estructurales.	Alto	3 edificios con daños. Un edificio desalojado, en intervención.
Unidad Habitacional Cuitláhuac (UCU).	Habitacional. 4 niveles. Mampostería y losas de concreto.	Hundimientos, fisuras y grietas. Separación de banquetas.	Medio	Dos edificios con problemas. Figura 4g.
Unidad Jardines de Ceylán (UJC).	Habitacional. 4 niveles. Mampostería y losas.	Hundimientos y fisuras.	Medio	Sin daño estructural.
Conjuntos Tres Lagos y Plurifamiliar Privado Marhnos (CTL).	Calle Naranjo, acceso a ambos conjuntos.	Hundimientos hacia el eje de la calle. Origen posible, colapso del drenaje.	Alto (para los peatones)	Daños en banquetas, separación de bardas y del anclaje de los árboles.

con arcillas saturadas, y U2 con resistividades de 15 a 55 ohm-m, asociada con limo arenoso, arcilla, arena y ceniza en proporciones variables; en la Alameda, la U1 muestra resistividades de 0.4 a 30 ohm-m, asociada con arena, arcilla, limo, limo arenoso, gravilla y ceniza saturados, y la U2 con tres subunidades, con resistividades de 31 a 510 ohm.m y asociadas con materiales similares a la unidad anterior pero con menor contenido de agua.

Unidad Habitacional El Jagüey – Pantaco. Se encuentra en la porción noreste de la alcaldía (UPA, Figura 3). En esta unidad habitacional, se observaron desplomes aparentes en tres edificios, deformaciones en marcos, fracturas severas en muros (Figuras 6d y 6e) y hundimientos (Figura 7a).

Reconocimiento de hundimientos diferenciales circulares

Generalmente asociados con las áreas de daños, se encontraron en el terreno fracturas de forma curva que bosquejan y limitan formas circulares, que muestran hundimientos suaves, los cuales, cuando se

encuentran en parte de la cimentación de una edificación, pueden desestabilizarla (Figura 7a). Los diámetros encontrados en estas formas van desde 5 hasta 40 m (Figuras 7c y 7d), con hundimiento de su parte central de unos pocos centímetros y, en ocasiones, hasta 1 m hacia los bordes donde se presentan fracturas con abertura de 5 a 10 cm y hasta 30 cm, las cuales se interpretan como originadas por esfuerzos de tensión. Como primera hipótesis del origen del hundimiento, se buscó identificar trayectorias del drenaje y zonas de alimentación de agua por posibilidad de fuga.

Se verificaron tres canchas de fútbol del deportivo Azcapotzalco (DAZ, Figura 3) por la presencia de grietas que forman parte de un hundimiento circular, con diámetros de 30 a 40 m, y separación entre las paredes de las grietas de 5 a 25 cm (Figura 7e) hasta un máximo de 35 cm (Figura 7f).

Marco geomorfológico y geológico

La zona donde se asienta la alcaldía de Azcapotzalco se ubica en la parte occidental de la Cuenca de México, limitada por cadenas

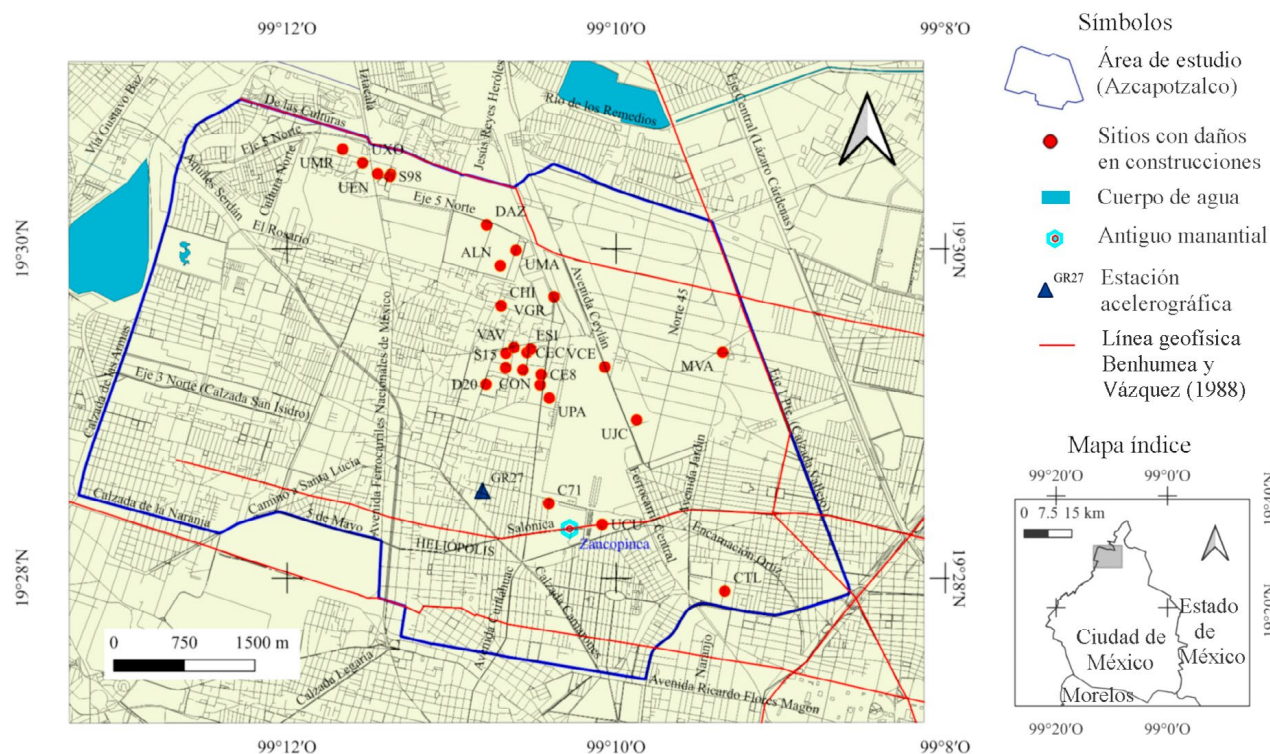


Figura 3. Localización de edificaciones con daños calificados como riesgo alto a medio (y hundimientos circulares asociados), los acrónimos corresponden con los mostrados en la tabla 1 y en el texto. También se presenta la localización de las líneas de sondeos eléctricos verticales (Benhumea y Vázquez, 1988).

montañosas, formada por actividad volcánica y tectónica (González-Torres *et al.*, 2015), con una profundidad de al menos 1500 m, la cual contiene un relleno de riolita, andesita, basalto, material clástico y piroclástico en la parte inferior y una cubierta de depósitos lacustres (Pérez-Cruz, 1988).

En la zona de Azcapotzalco, los elementos morfológicos mayores son: (1) la Sierra de Guadalupe (SG) al noreste (Figura 8), la cual está formada por domos y rocas volcánicas, cubiertos parcialmente por flujos piroclásticos, ceniza, depósitos de avalancha y lahares (García-Palomo *et al.*, 2006); tiene una forma aproximadamente circular con un diámetro mayor de 12 km, en la que destacan picos que se elevan de 400 a 700 m respecto a la superficie plana de lo que fue el antiguo lago (Lugo-Hubp, 1990); (2) la Sierra de las Cruces (SLC) al oeste, la cual está formada por estratovolcanes (García-Palomo *et al.*, 2008) y tiene una orientación NNE, con una longitud de 110 km y un ancho de 47 km, con cimas que alcanzan más de 3000 m s.n.m.; al pie de la SLC (3) se encuentran depósitos epiclásticos formados por la erosión de unidades volcánicas (lahares y depósitos piroclásticos) (Lugo-Hubp, 1990), y que constituyen el terreno de Azcapotzalco; y (4) la planicie del antiguo lago, con una elevación promedio de 2240 m s.n.m.

En Azcapotzalco, no existen afloramientos de roca debido a su completa urbanización. En la superficie del terreno (en gran parte cubierta), predomina el material de relleno, por lo que se consideró interpretar la geología local a partir de la información obtenida en los relieves que rodean la zona de estudio (Figura 9), y con base en estudios previos de exploración geofísica (Benhumea y Vázquez, 1988; Briones *et al.*, 1997) y de evaluación de peligro por deslizamiento (García-Palomo *et al.*, 2006).

En la zona norte y noreste concurren los dominios volcánicos de la SG y de la SLC (Figura 8). Las unidades geológicas pertenecientes al dominio de la SG se localizan a poco más de 2 km al norte y noreste de Azcapotzalco, y consisten en dacita, riolita y rocas de

composición intermedia (Campa-Uranga, 1965), formando flujos de lava, depósitos piroclásticos y lahares, y con edades radiométricas (K-Ar) en dacita de 14 a 16 Ma (Mioceno medio, Lozano-Barraza, 1968; Jacobo-Albarrán, 1985). Las unidades geológicas del dominio de la SLC afloran al noroeste y se dividen en tres unidades principales (Briones *et al.*, 1997): la unidad inferior, generalmente de color rojo por oxidación, es bien consolidada y consiste en una andesita porfídica de hornblenda y biotita (Tabla 2); la unidad intermedia corresponde a una toba cristalina andesítica y una toba lítico-cristalina andesítica, medianamente consolidada y pseudoestratificada, en colores gris a rojo pálido, amarillo claro y pardo; la unidad superior es una toba vítreo-cristalina andesítica de grano grueso, palagonizada, de color amarillo a pardo, poco consolidada y pseudoestratificada (Figura 10). Estas unidades pertenecen a la porción más joven del conjunto de la SLC, al que se atribuye una edad del Plioceno al Pleistoceno (0.68 a 3.71 Ma, García-Palomo *et al.*, 2008).

Para la zona noroeste de la Ciudad de México, se cuenta con 19 sondeos eléctricos verticales en la entonces delegación Azcapotzalco y en el municipio de Tlalnepantla, Estado de México, en cinco líneas (Benhumea y Vázquez, 1988, Figura 3) con orientación: tres E-W, una NW-SE y una NE-SW, sobre vialidades importantes, y con una longitud total de 31 km. Se incluye una porción del plano de iso-resistividades aparentes para un arreglo AB/2= 70 m (Figura 11). El estudio permite delimitar el suelo lacustre e indica que las zonas noroeste y oeste estaban surcadas por dos ríos que provenían de Tlalnepantla y de Chapultepec, respectivamente, los cuales drenaban agua dulce al lago de Texcoco.

Las unidades más recientes consisten en depósitos lacustres cuya distribución en la zona de estudio se interpreta siguiendo la zonación geotécnica (que se presenta más adelante). La secuencia se constituye de rellenos y suelos de color pardo claro (cubiertos por la urbanización) y depósitos de aluvión acarreados por corrientes



Figura 4. Daños en edificaciones: (a) Unidad Habitacional Manuel Rivera Anaya (UMR), separación de la parte superior entre dos edificios. (b) Centro de Capacitación para el Trabajo Industrial 1 (CEC), grietas en muro y barda, deformación en ventanas. (c) Unidad Ecológica Novedades Impacto (UEN), desplomo en uno de los edificios. (d) Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESI), grietas en muros y columnas. (e) Escuela Secundaria Técnica 98 (S98), a la izquierda, edificio inhabilitado por desplomo y deformación. (f) Internado Primaria 2 Ejercito Mexicano (PEM), edificio demolido por daño estructural. (g) Unidad Habitacional Cuitláhuac (UCU), fractura en muro.

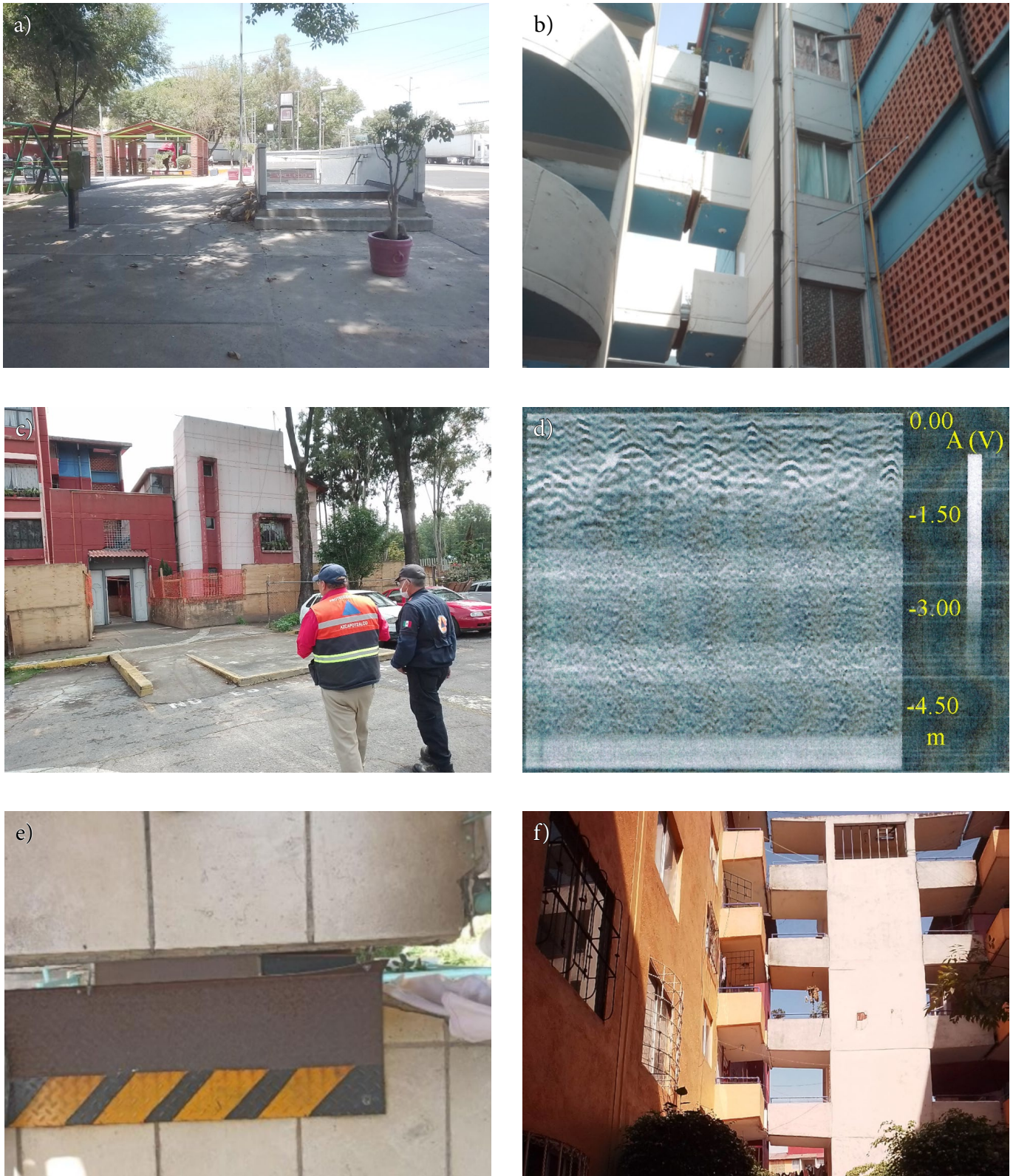


Figura 5. Daños en construcciones e intervenciones: (a) Entorno de la estación Metro Vallejo (MVA), hundimiento y destrucción del piso. (b) Unidad Habitacional Xochinahuac (UXO), separación entre edificio de departamentos y módulo de escaleras. (c) UXO, intervención de la cimentación para mitigar el desplomo. (d) UXO, radargrama, hipérbolas sin relación entre ellas asociadas con material de relleno. (e) Unidad Habitacional Matlacóatl (UMA), separación entre escaleras y departamentos (vista hacia abajo). (f) UMA, desplomo de edificio y separación del módulo de escaleras.

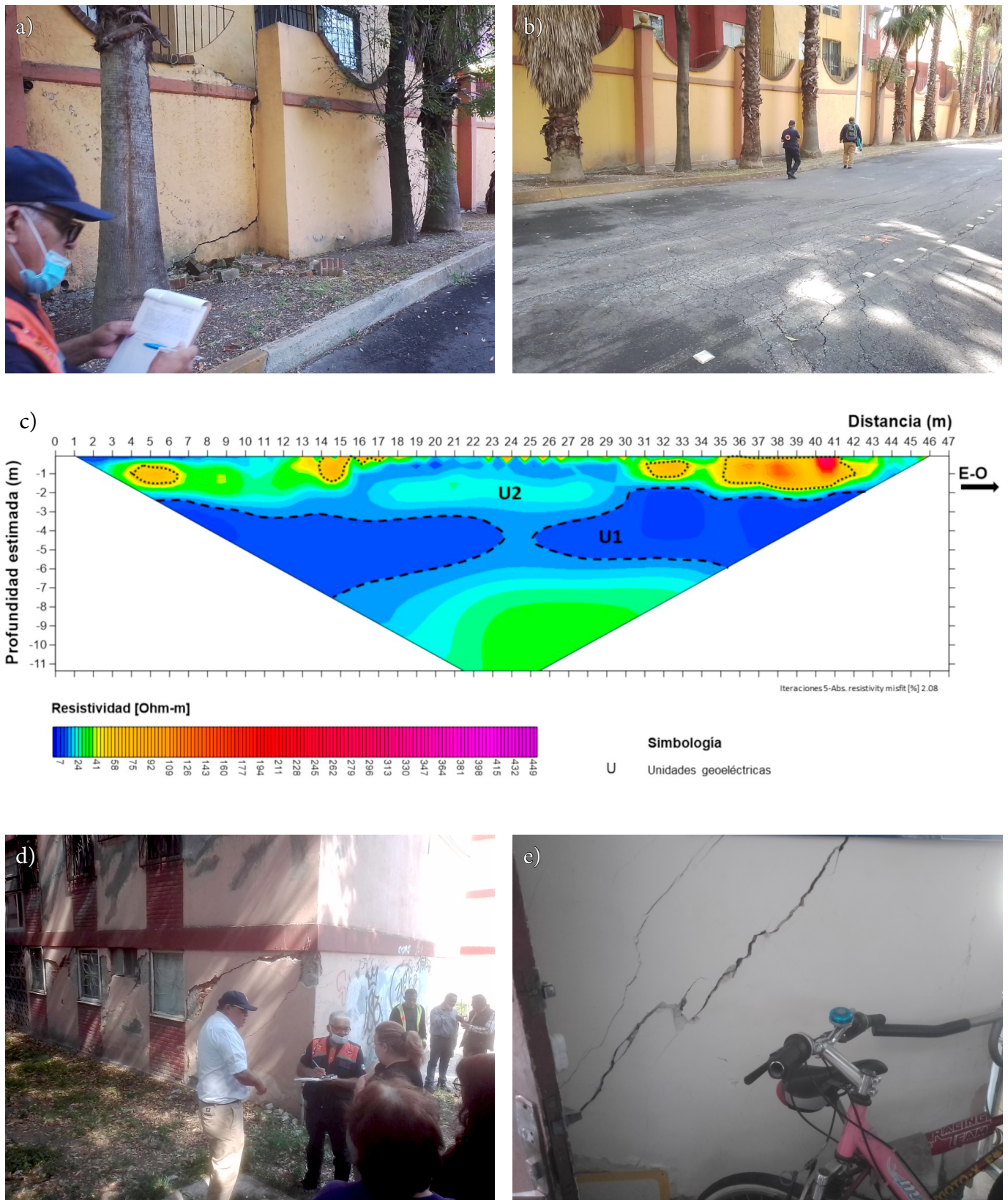


Figura 6. Daños en construcciones e intervenciones: (a) barda de la Alameda Norte (ALN) de colindancia con la Unidad Habitacional Matlácoatl, tramo colapsado. (b) hundimiento junto a la barda de la ALN. (c) ALN, tomografía eléctrica obtenida en dirección perpendicular a la barda. (d) Unidad Habitacional Pantaco (UPA), fracturas en muros y columnas. (e) UPA, fractura en un muro.



Figura 7. Hundimientos circulares y fracturas asociadas: “(a) Unidad Habitacional Pantaco (UPA), hundimiento y grieta de tensión en edificio. (b) Calzada Azcapotzalco-La Villa (VAV) y cerrada, hundimiento en la zona de daños en Centro de Capacitación para el Trabajo Industrial 1 (CEC) y Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESI). (c) Internado Primaria 2 Ejercito Mexicano (PEM), hundimiento en avenida interior. (d) hundimiento en Alameda Norte (ALM). (e) Deportivo Azcapotzalco (DAZ), grieta en el perímetro de un hundimiento incipiente. (f) ALN, porción de una grieta de forma curva y espesor de 25 a 35 cm.”

que bajaban en la cuesta oriental de la SLC. En la actualidad no existe ninguna corriente de agua superficial en esta alcaldía; los ríos que bajan de la parte oeste y noroeste son el río de los Remedios, que rodea la esquina noroeste de la alcaldía (canalizado), y el río Tlalnepantla (Figura 9), aproximadamente a 2.5 km al norte (ahora

encauzado bajo la superficie), y que se unen antes de llegar al drenaje profundo de la ciudad. La distribución del aluvión se interpreta en la zona de escurrimiento de estos ríos. Sobre la trayectoria del río Tlalnepantla, poco tiempo después de ser entubado, la exploración geofísica con sondeos eléctricos verticales (Figura 9) determinó un

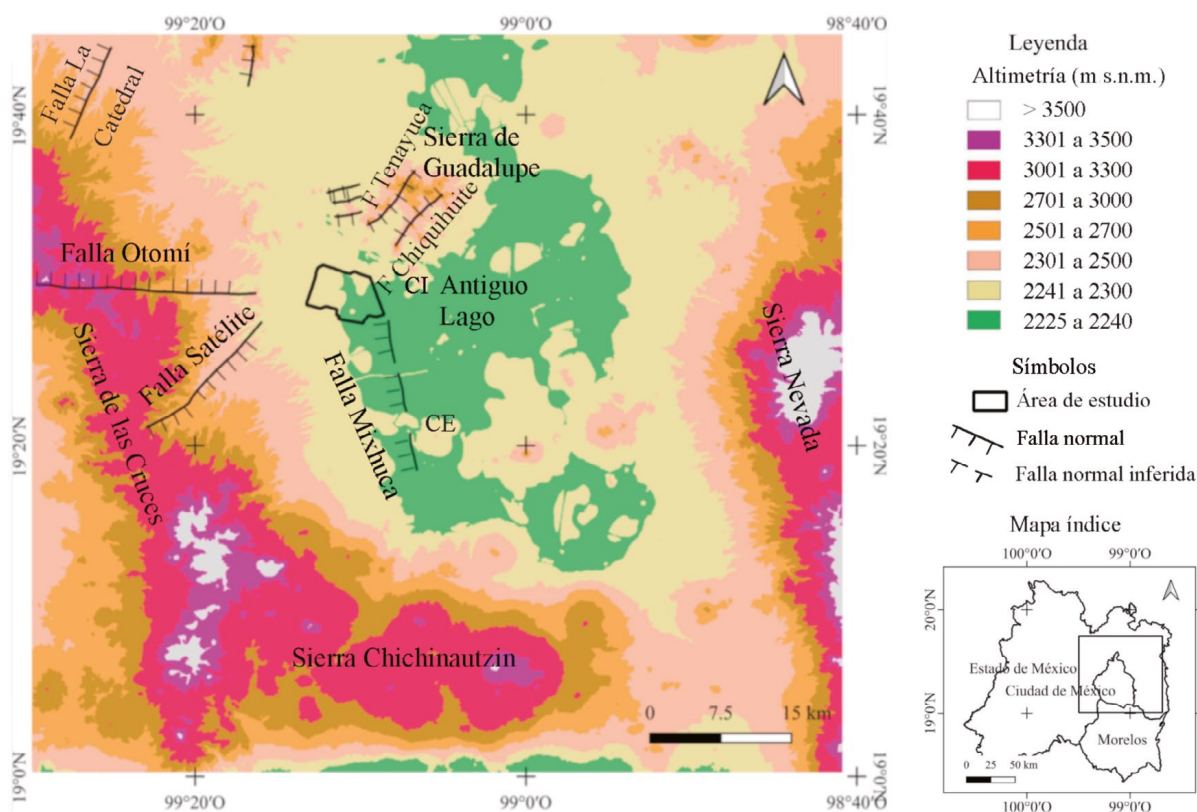


Figura 8. Mapa de elevación del área de la Cuenca de México. Muestra los principales elementos geomorfológicos y las fallas principales (Pérez-Cruz, 1988; García-Palomo *et al.*, 2006 y 2008). CI: cerro Santa Isabel y CE: cerro de la Estrella.

espesor de 9 a 15 m para el depósito aluvial, con resistividad de 3 a 8 ohm-m (Briones *et al.*, 1997). En la geología local (Figura 9), también se interpreta la presencia de depósitos aluviales posiblemente originados por una corriente que cruzaba la zona de estudio en dirección NW-SE para llegar al antiguo lago. Los argumentos a favor de la presencia de este cuerpo se discuten más adelante.

Marco geotécnico

Zonificación geotécnica

La primera zonificación geotécnica de la Ciudad de México fue realizada por Marsal y Mazari (1959) con base en observaciones de las características estratigráficas y mecánicas del subsuelo en el área urbana, y consiste en tres zonas (Figura 12, Gobierno de la Ciudad de México, 2023): la zona I (Lomas), con una mayor altitud relativa, principalmente constituida por rocas de composición andesítica y basáltica; la zona II (Transición), que conforma una franja que separa a la anterior de los depósitos claramente lacustres; y la zona III (Lacustre), formada por depósitos de arcilla altamente compresible, con intercalación de capas de arena y limo. La mayor parte del área de interés se encuentra en la zona de transición.

Unidades geotécnicas en el subsuelo de la Ciudad de México

Con base en la observación de los cortes estratigráficos de la parte central de la Ciudad de México, se ha construido el modelo geotécnico del subsuelo (Castillo, 1978; Murillo, 1978; Zeevaert, 1983), que incluye las siguientes unidades, a partir de la superficie: la Costra Superficial (CS), la Serie Arcillosa Superior (SAS), la Capa Dura (CD), la Serie Arcillosa Inferior (SAI) y los Depósitos Profundos (DP). La CS se compone principalmente de rellenos, con un espesor de 3 o 4 m; la SAS incluye capas arcillosas muy compresibles y saturadas (Zeevaert,

1983; Santoyo *et al.*, 2005), con un espesor aproximado de 29 m; la CD, situada debajo de la anterior, formada por limo-arenoso compacto, con un espesor de 3 m; la SAI, con arenas y gravas en intercalación con limo y arcilla arenosa, y un espesor promedio de 45 m; y, más abajo, los DP de gravas y arenas, regularmente cementadas. De acuerdo con Rangel-Núñez (2024), “El modelo estratigráfico original supone que los Depósitos Profundos son el basamento de todas las unidades deformables que se tienen por arriba y, por tanto, si la cimentación de un edificio se apoya en ellos, se pueden evitar los problemas de capacidad de carga, amplificación dinámica, agrietamiento y asentamientos absolutos y diferenciales a corto y largo plazo. Sin embargo, esta idea podría ser incorrecta”.

Unidades geotécnicas en la zona superficial de Azcapotzalco

En este marco, como la zona de interés está próxima a la superficie del terreno, se presenta parte del plano del contacto entre la SAS y la CD en la zona poniente de la Ciudad de México (Figura 13) de Auvinet *et al.* (2017), elaborado con base en la información geoestadística de sondeos mencionada por estos autores, donde consideran que la SAS desaparece hacia el norte y el oeste, mientras que la cima de la CD empieza a reconocerse a una profundidad de 14 m en la porción central de la alcaldía y profundiza en dirección sureste hasta alcanzar 26 m de profundidad. Estos autores señalan que “en la zona de transición, se dificulta la caracterización de la CD debido a la heterogeneidad de los materiales, destacando la intercalación de lentes duros y material de origen aluvial dentro de la FAS, con espesores similares a los de la CD”. Aquí se refieren a la SAS como la Formación Arcillosa Superior (FAS). Lo anterior significa que la presencia de las unidades SAS, CD y sus contactos son inciertos en la mitad oeste del territorio de la demarcación.

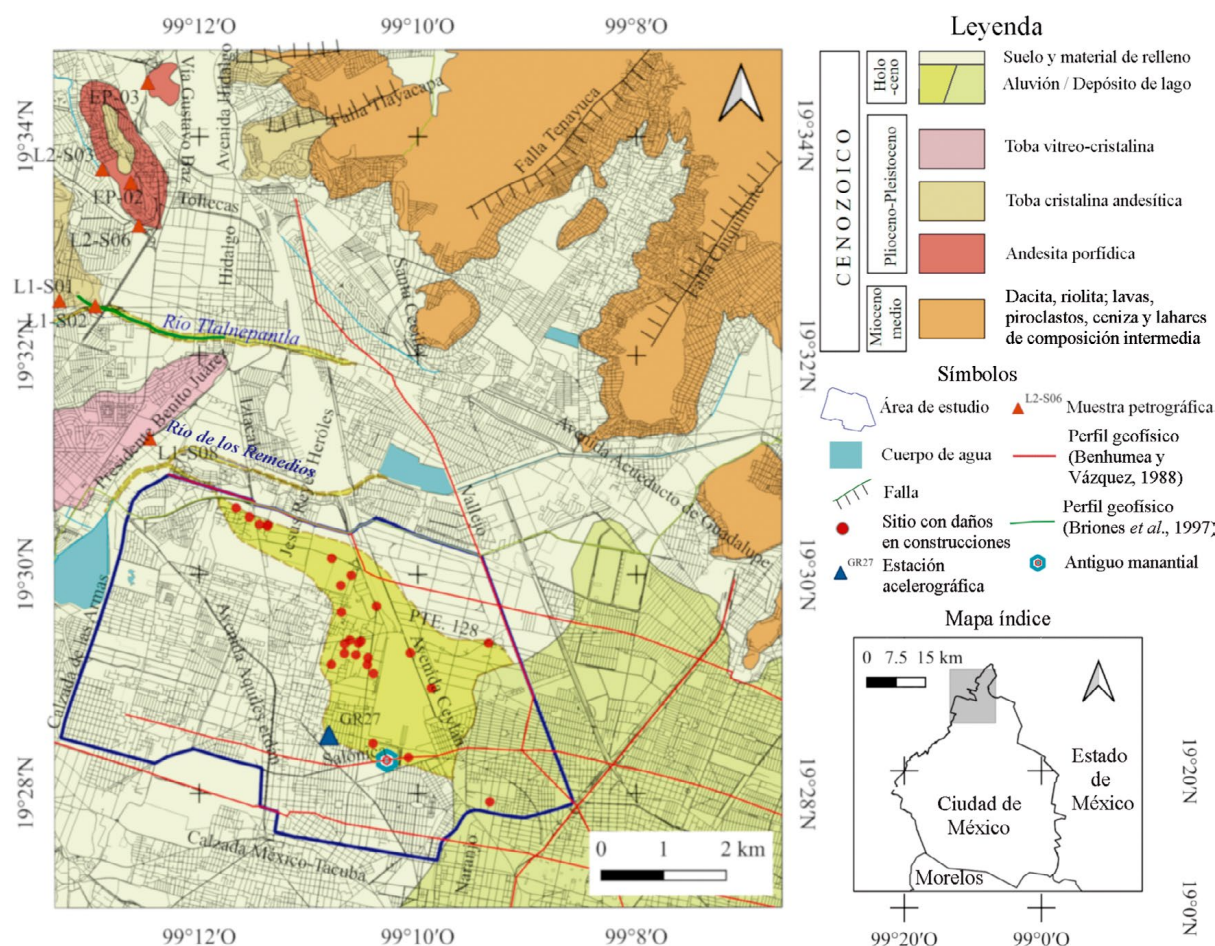


Figura 9. Geología del área de Azcapotzalco. La porción noroccidental interpretada con base en Briones *et al.* (1997) y la porción nororiental interpretada de García-Palomo *et al.* (2006). También muestra la localización de perfiles de exploración geofísica (Benhumea y Vázquez, 1988; Briones *et al.*, 1997).

Tabla 2. Estudios petrográficos de muestras colectadas en la zona de Tlalnepantla, Estado de México, contigua a Azcapotzalco (Quezadas, A.G. y Ruvalcaba, M.A. en Briones *et al.*, 1997).

Muestra	Localización	Afloramiento	Clasificación	Origen
L1-S01	476780 E, 2160779 N. San Andrés Atenco, Tlalnepantla, Edo. de México.	Color gris a rojo pálido, medianamente consolidada. Seudoestratificada.	Toba lítico cristalina andesítica de grano grueso.	Ígnea piroclástica, probablemente depositada en un ambiente lacustre.
L1-S02	477352 E, 2160688 N. San Andrés Atenco, Tlalnepantla, Edo. de México.	Color amarillo oscuro a pardo, mediana- mente consolidada. Seudoestratificada, piroclástica.	Toba cristalina andesítica de grano fino, palagonizada.	Ígneo piroclástico.
L1-S08	478220 E, 2158459 N. Av. Presidente Juárez, Tlalnepantla, Edo. de México.	Color amarillo a pardo, poco consolidada. Seudoestratificada, piroclástica.	Toba vítreo-cristalina andesí- tica de grano grueso, palago- nizada.	Ígneo piroclástico de grano grueso.
L2-S03	477465 E, 2162996 N. Cerro Tequexquinahuac, Tlalnepantla, Edo. de México.	Color rosa a violeta, compacta. Porfídica	Andesita porfídica hematizada.	Ígnea extrusivo.
L2-S06	478050 E, 2162045 N. Cerro Tequexquinahuac, Tlalnepantla, Edo. de México.	Color rojo pálido, compacta. Porfídica	Andesita porfídica hematizada.	Ígnea extrusivo.
EP-02	477925 E, 2162770 N. Cerro Tequexquinahuac, Tlalnepantla, Edo. de México.	Color pardo claro, semicompacta, delez- nable. Piroclástica fina.	Toba cristalina andesítica.	Ígneo piroclástico.
EP-03	478195 E, 2164456 N. Cerro El Kilo, Tlalnepantla, Edo. de México.	Color rojo, compacta. Porfídica.	Andesita porfídica de horn- blenda y biotita, hematizada.	Ígnea extrusivo.



Figura 10. Sitio donde se colectó la muestra L1-S08, toba vítreo-cristalina andesítica de grano grueso (Briones *et al.*, 1997).

Hundimiento regional en Azcapotzalco

Con respecto al fenómeno del hundimiento regional de la Ciudad de México, Auvinet *et al.* (2017) interpretan que la velocidad máxima en Azcapotzalco es de 3 cm/año, mientras que la velocidad máxima de hundimiento es mayor de 40 cm/año, aclarando que ya no se encuentra en el antiguo centro; ahora corresponde a zonas del sur y oriente del valle.

Microzonación sísmica en Azcapotzalco

Para Azcapotzalco, Lermo y Sánchez-Sesma (2020) determinaron tres zonas (Figura 14). La Zona I, con períodos menores de 0.6 s y espesor de suelo de hasta 10 m, forma una banda irregular que cruza del noroeste hasta el centro de la alcaldía; la Zona II, con período de hasta 0.8 s y 15 m de espesor de suelo, rodea a la banda anterior; y la Zona III, que agrupa períodos de hasta 1.2 s y espesor de suelo de hasta 23 m, se localiza principalmente en la parte suroeste y sureste de la demarcación. Estos autores señalan que “es necesario continuar las mediciones de ruido sísmico en alcaldías que tienen poca información”.

Aceleraciones del terreno

Por otra parte, Iglesias (1989) analizó los efectos del sismo de 1985 e identificó zonas de mayor amplificación de la intensidad y la influencia de la dirección de llegada de las ondas (este-oeste). Para el sismo de Acapulco del 24 de abril de 1989, con magnitud 6.5, observó una amplificación en dirección opuesta (norte-sur) y, con base en las aceleraciones registradas, propuso ampliar la unidad geotécnica asociada a los sedimentos lacustres en Tláhuac, Xochimilco y en la porción oriental de la alcaldía Azcapotzalco (Figura 15).

De acuerdo con Iglesias (2017), para el sismo de 1985, se registró la aceleración máxima (168 cm/s^2) en la estación sismológica del edificio de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; durante el sismo de 2017, se superó dicho valor en varias estaciones de la red sísmica, como Culhuacán (225 cm/s^2), Jardín Coyoacán (220 cm/s^2) y Tláhuac (190 cm/s^2), mientras que otras estaciones próximas al

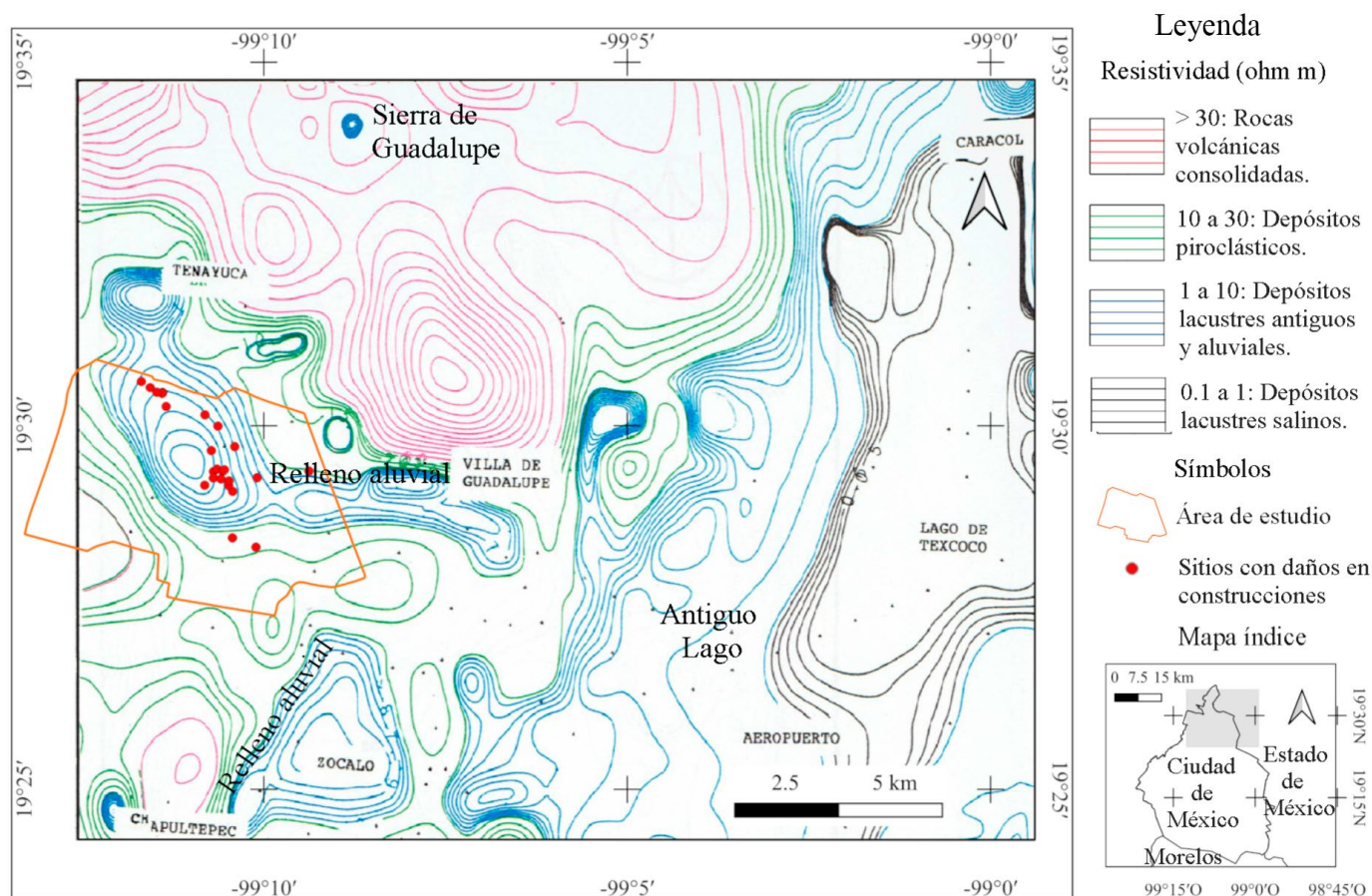


Figura 11. Isoresistividades aparentes para $AB/2 = 70 \text{ m}$ (porción NW del plano de Benhumea y Vázquez, 1988), mostrando el relleno aluvial que interpretan en su estudio.

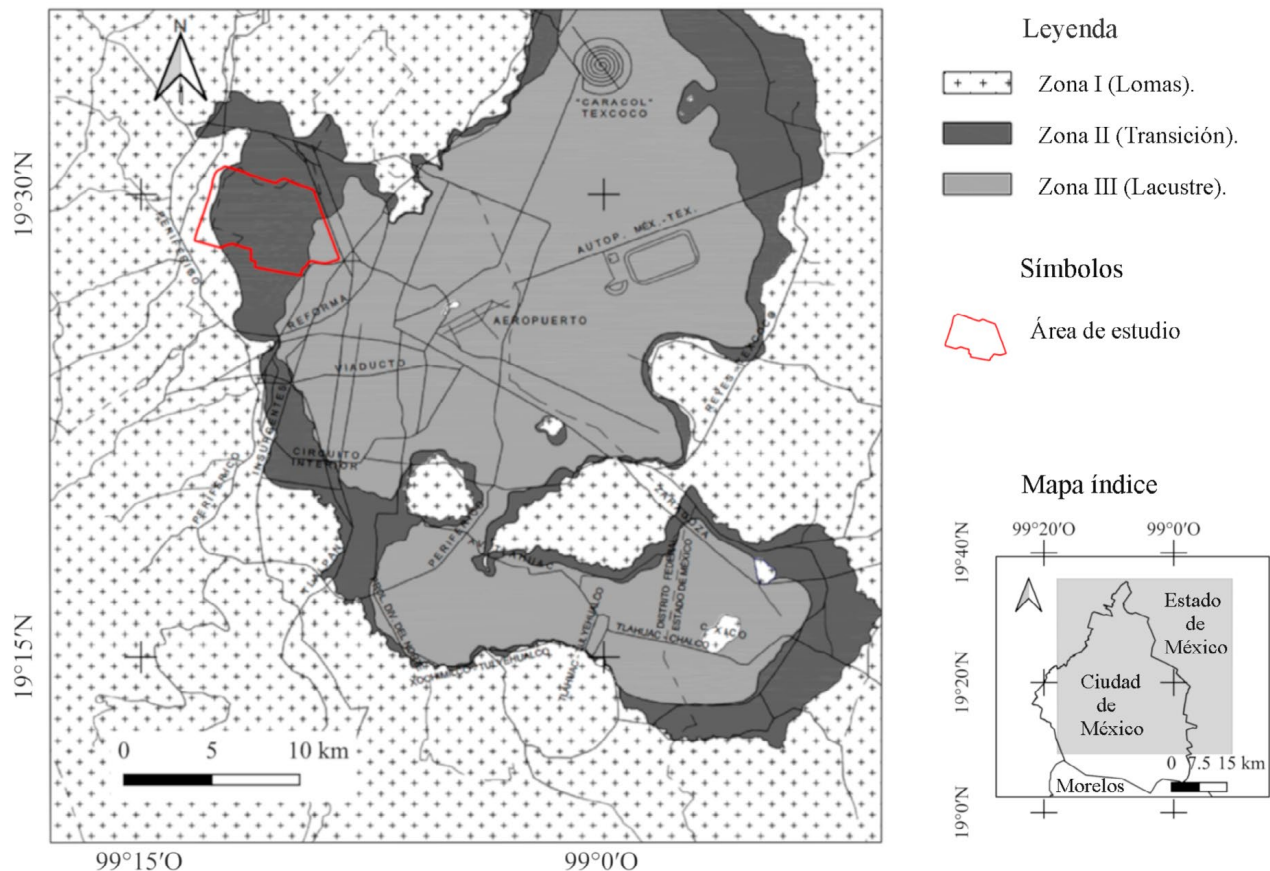


Figura 12. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

borde de la zona de lago (III) registraron aceleraciones considerables, como Alameda (117 cm/s^2) y Roma (114 cm/s^2), o hacia el noroeste, en las estaciones Azcapotzalco (120 cm/s^2) y Lindavista (123 cm/s^2), lo que respalda la nueva zona de lago propuesta por este autor en 1989.

Registro arqueológico

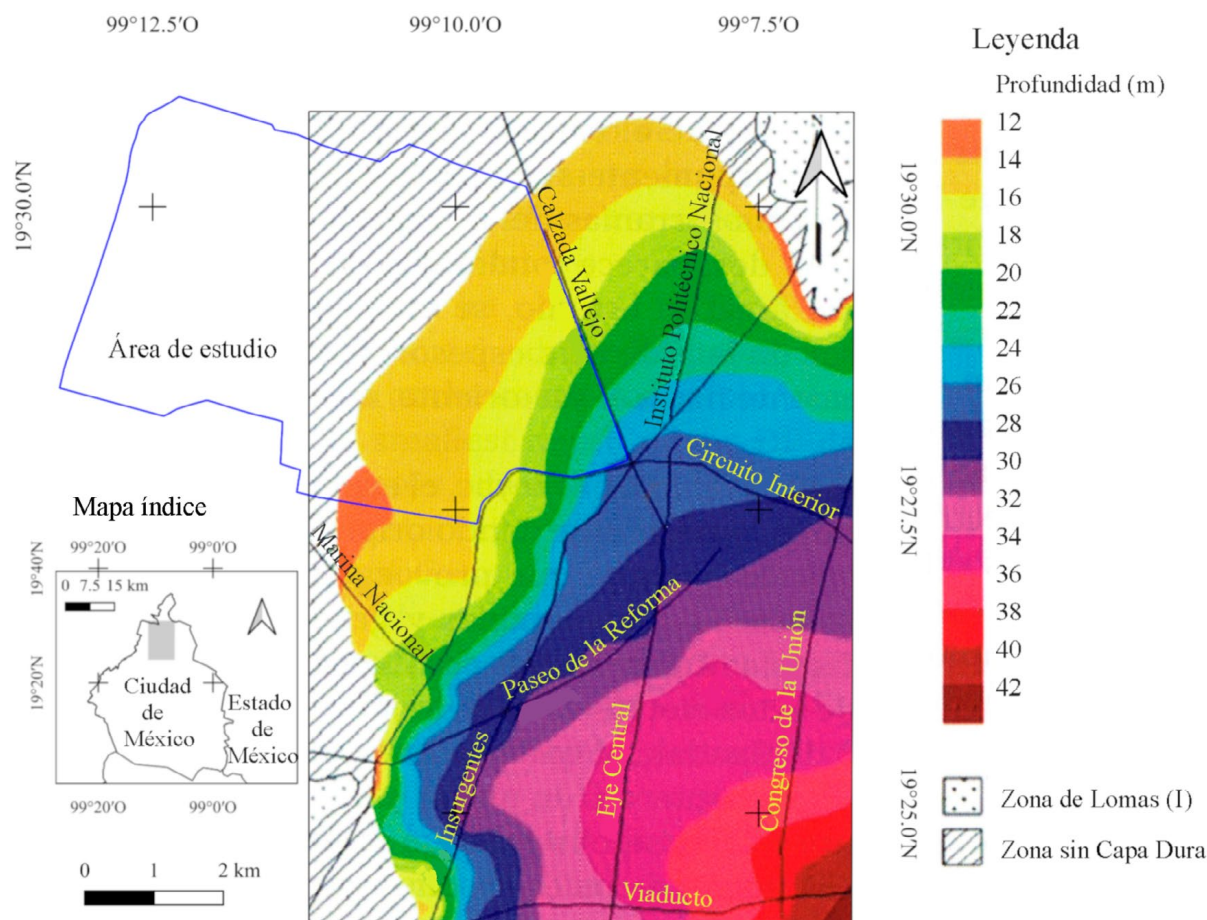
Para interpretar las condiciones de presencia de agua en el pasado, pueden tomarse en cuenta los registros arqueológicos. Una gran albarrada fue construida entre el cerro de Santa Isabel, en la sierra de Guadalupe y, al sur, el cerro de la Estrella (Figura 8), luego de una inundación que causó daños severos en Tenochtitlán en 1449. Esta estructura tenía una longitud aproximada de 16 km (Molina y Rosas, 2022) y separaba y protegía las aguas dulces del poniente de las aguas saladas en el oriente. Recanalizaciones del cauce del río de los Remedios, como la realizada en 1550, en dirección sur-norte, provocaron la desaparición del río Azcapotzalco (González-Gómez, 2022). La existencia del manantial de Zancopinca en la zona sureste de Azcapotzalco, que alimentaba a Tlatelolco por un canal antes de la llegada de los españoles y que fue reconstruido en 1595 (González-Gómez, 2022). Urdapilleta-Pérez (2009) describió el caño de piedra en Tlatelolco y menciona acerca del manantial que “en los años setenta del siglo pasado, el brocal fue desmantelado ... A su alrededor se construyó la Unidad Habitacional Cuiciláhuac”; la ubicación del manantial se presenta en el “Plano topográfico con la distancia de tres leguas por cada rumbo de la Ciudad de México” de Domingo Trespalcacios y Escandón, de 1753, en SGIRPCCM (2022), Figura 16.

DISCUSIÓN

En la inspección rápida de unidades habitacionales y edificios públicos con afectaciones, se encontraron un poco más de 20 sitios con daños calificados con un riesgo de uso medio a alto; los daños crecieron gradualmente y se acentuaron en eventos sísmicos. Sus ubicaciones determinan las zonas de riesgo (Figura 3), su distribución inicia en la zona norte y parece describir una curva abierta, que continúa en dirección al sureste, luego sigue hacia el sur y finaliza en la parte sureste de la alcaldía.

De acuerdo con el relieve de esta región, las partes elevadas más cercanas se encuentran al noroeste (Figura 8), donde está presente una toba vítreo-cristalina medianamente consolidada y alterada, la cual debió ser la principal área fuente del material que forma el terreno de la demarcación, mientras que las áreas de menor altura se ubican al sureste, en la zona del antiguo lago. Al norte de esta zona concurren los dominios volcánicos de la SG y la SLC (Figura 8), donde la proyección de su contacto tendría una orientación NW-SE y pudo haber formado un valle original antes del relleno en la zona de interés. Aun cuando no hay evidencias de fallas en la superficie, se infiere la presencia de tres sistemas de fallas en el subsuelo con orientación N-S, N-E y E-W reconocidos en la región como resultado de un régimen tectónico extensional (Gómez.Tuena *et al.*, 2005; Arce *et al.*, 2019).

Desde el punto de vista geotécnico, la mayor parte de la superficie de la zona de estudio se encuentra en la Zona II (Transición, Figura 12), sin embargo, la configuración que marcan los sitios de edificaciones con daños (una forma una curva abierta con orientación general NW-SE) cruza la parte central de la zona anterior y rompe la

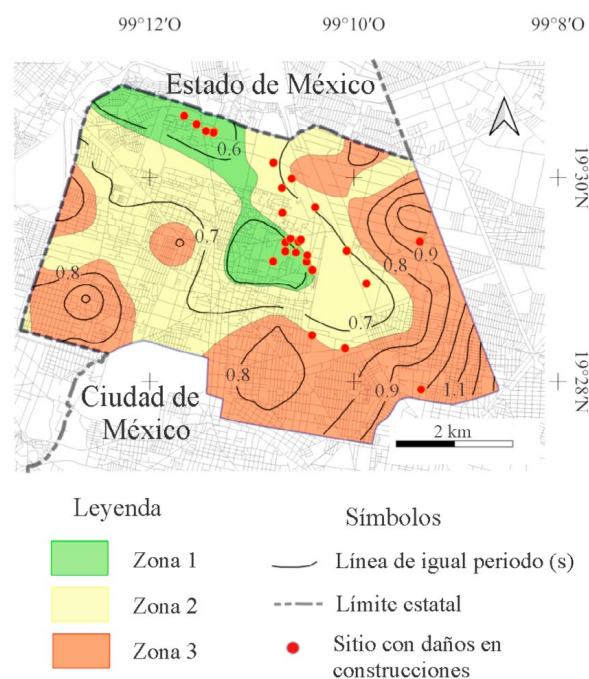


continuidad de ésta. Lo anterior indica que el terreno no cumple con el comportamiento previsto en el esquema de zonación geotécnica de la Ciudad de México en la zona de sitios con daños, en la alcaldía Azcapotzalco.

Por otro lado, el estudio de microzonación de Lermo y Sánchez-Sesma (2020) divide a Azcapotzalco en tres zonas (Figura 14), y la mayor parte de los sitios de edificaciones con daños se ubican en la zona I, que correspondería a las mejores condiciones de respuesta del suelo, lo cual no está en armonía con lo observado. Esto podría deberse a que la densidad de puntos de medición todavía es baja o bien a que la vibración del suelo blando está influida por la presencia de fragmentos más gruesos y densos que la arcilla, posiblemente similares a los que componen depósitos aluviales.

En cuanto a la zona vulnerable que detectó Iglesias (1989) en la parte meridional de Azcapotzalco, con base en la aceleración de 120 cm/s^2 (estación GR27, Figura 15) durante el sismo de 2017 y con la cual considera que se debe contemplar que la mitad oriental de la demarcación debería agruparse en la zona geotécnica III (lacustre), debe tomarse en cuenta que la estación de registro se encuentra en la parte terminal de la franja de sitios de edificaciones con daños (Figura 3), y probablemente sea necesario extender la red sismológica hacia el noreste o sobre la franja de daños para acotar esta zona vulnerable.

Entre los hallazgos principales del trabajo de campo destaca la presencia de hundimientos circulares asociados con los sitios de



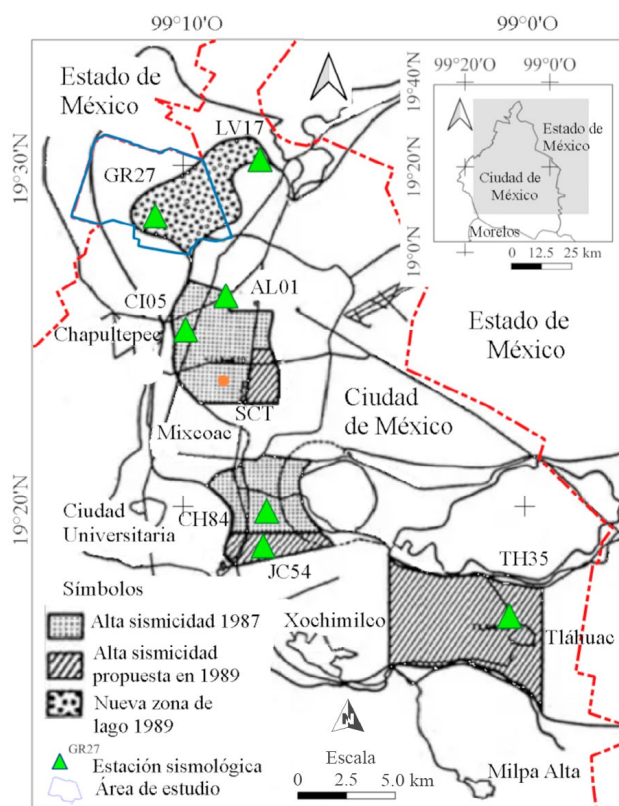


Figura 15. Propuesta de modificación al mapa de zonificación sísmica por Iglesias (1989, 2017) con base en el registro de aceleraciones (modificada). Estaciones sísmológicas: SCT, Secretaría de Comunicaciones y Transportes; CH84, Culhuacán; JC54, Jardín Coyoacán; TH35, Tláhuac; AL01, Alameda; CI05, Roma; GR27, Azcapotzalco y LV17, Lindavista.

edificios con daños. Tienen forma semejante a las dolinas; sin embargo, no hay evidencias de disolución de carbonatos en la zona.

Con base en los datos adquiridos en el presente trabajo, se propone que estos hundimientos circulares semejantes a una “cazuela” en el terreno de Azcapotzalco se producen por erosión de tipo planar, es decir, por la acción del movimiento de agua en la superficie del terreno en condiciones de baja energía, a la manera del escurrimiento en láminas. El proceso inicia con un encharcamiento circular después de una lluvia intensa; esta forma responde a la acción de un conjunto de gotas de agua sobre una superficie plana, de la misma manera que una gota de agua al caer en un área plana tiene forma circular. En un subsuelo homogéneo, la distribución del agua es a través de superficies circulares horizontales, concepto teórico base para realizar ensayos de transmisividad (Comisión Federal de Electricidad, 2022). La saturación de la capa superficial de suelo provoca el incremento de la presión de poro y la formación de grietas por tensión (Figura 17, Inicial). Las repeticiones a lo largo del tiempo de este proceso facilitan la evolución de las fracturas (Álvarez-Manilla, 2000). Por la infiltración progresiva de agua, los materiales más finos son removidos, debilitando el soporte, principalmente por acción de la gravedad en la parte central del charco; en un estado intermedio, la carga en la porción central produce grietas por tensión en la periferia del círculo (Figura 17, Intermedio); posteriormente, por semejanza con el desarrollo de hundimientos en caliza, la circulación de agua en el subsuelo promueve la remoción de material con poca cohesión (Figura 17, Avanzado), con pérdida en el volumen original del terreno. Lo anterior podría facilitarse con la existencia de capas sedimentarias



Figura 16. Porción del “Plano topográfico con la distancia de tres leguas por cada rumbo de la Ciudad de México” de Domingo Trespalacios y Escandón (1753), en Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México (2022).

de diferente tamaño de grano o cohesión. Con base en los datos de exploración profunda disponibles en esta zona (Benhumea y Vázquez, 1988), se puede inferir que la franja donde se ubican los hundimientos circulares y las edificaciones con daños se sitúa sobre el relleno aluvial del río Tlalnepantla, diferente al río Tlalnepantla actual, localizado al norte del área de estudio, y que hoy no tiene ningún río que cruce la demarcación, ya que drenaba agua dulce al lago de Texcoco (Figura 11). El área fuente que formó el terreno del área de interés se encuentra al noroeste y, como consecuencia, la dirección de las corrientes de agua y su acarreo de detritos fue de noroeste a sureste. Esto se apoya además en el registro arqueológico, como la existencia de una albarda prehispánica que separaba las aguas dulces que llegaban de las áreas altas al poniente de las aguas salobres que inundaban el lago de Texcoco, así como la existencia del manantial Zancopín (Figuras 3 y 9) en la porción meridional de la alcaldía, que alimentaba una canalización que se dirigía hacia el sureste y llegaba a Tlatelolco.

La circulación continua del agua conduce a un hundimiento por colapso, como ha sucedido en otros sitios de la ciudad. Los cambios estacionales y la vibración por tránsito pueden acelerar el proceso, pues la pérdida de humedad acompaña una compactación natural del suelo arcilloso.

CONCLUSIONES

En la alcaldía Azcapotzalco, se presentan daños en edificaciones que están asociados con formas erosivas (hundimientos circulares)

que llegan a desestabilizar sus cimentaciones y que se considera que aumentan la vulnerabilidad ante la ocurrencia de un sismo. De la localización de los sitios mencionados, se determinó que la zona vulnerable configura una franja irregular de forma curva y abierta, con una longitud aproximada de 5 km y una amplitud máxima de 1.5 km.

Se determinó que los hundimientos circulares en materiales clásticos presentes en el área de estudio se forman a partir de un proceso que inicia en la superficie con erosión planar, que continúa con infiltración de agua en un terreno que probablemente tiene alternancia de capas de diferente tamaño de grano (lo que explicaría que la erosión progrese a un hundimiento de forma circular).

Se considera que el conocimiento que se tiene del subsuelo en Azcapotzalco no es suficiente; la zonación geotécnica, donde predomina la Zona II (Transición), que representa cierta estabilidad en la mayor parte de la demarcación, no contempla la franja con orientación NW-SE que refleja los sitios con daños; en la mitad oeste de la alcaldía no está determinada la presencia de las unidades geotécnicas cercanas a la superficie, ni el relleno aluvial que sugieren como posibilidad en los estudios geotécnicos y de microzonificación.

Se considera que el modelo geológico que puede explicar de forma satisfactoria la presencia de daños estructurales en edificaciones de la alcaldía Azcapotzalco, su distribución y su asociación con formas erosivas (hundimientos circulares), y que representan una franja vulnerable, es la existencia de materiales geológicos originados en un paleocauce que cruza la demarcación en dirección NW-SE, al que se propone el nombre “paleocauce Tepanecas”, para diferenciarlo de otros ríos históricos de la región.

Es necesario dirigir la exploración para determinar los materiales implicados en los hundimientos, la geometría de éstos, su alcance y la existencia de flujo de agua, para definir las acciones de remediación.

Agradecimientos. Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la MD. Margarita Saldaña Hernández alcaldesa de Azcapotzalco y al Dr. José Israel Domínguez Zavala director de la Dirección Ejecutiva de la Unidad de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil perteneciente a la misma, en el periodo 2021 a 2024, por las facilidades para recabar la información de esta investigación en campo, así como al técnico Jonathan Cruz González López y al pasante de Ingeniero Civil Miguel Ángel Ramos Paulino por su apoyo en campo. También, manifestamos nuestra gratitud al Dr. Antonio Uribe Carvajal catedrático de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y al Ing. Juan Sánchez Pérez también catedrático de ésta y de posgrado en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del IPN por sus valiosos comentarios a este trabajo. Los autores agradecen los comentarios de la Dra. Dora Celia Carreón Freyre y del Dr. Felipe Escalona Alcázar, que permitieron mejorar el presente manuscrito.

Contribución de los autores. FGV. Metodología, investigación, trabajo de campo, procesamiento, análisis e interpretación de datos geológicos y geotécnicos, redacción, revisión y edición. JAGV. Metodología, investigación, trabajo de campo, procesamiento, análisis e interpretación de datos en materia de protección civil y arqueológicos y redacción. RTC. Metodología, trabajo de campo, procesamiento, análisis e interpretación de datos en materia de protección civil y redacción. Todos los autores discutieron los resultados y contribuyeron en el manuscrito.

Política de disponibilidad de datos. Los autores manifiestan que todos los datos obtenidos en las revisiones de campo en materia de protección civil están almacenados en la Dirección Ejecutiva de la Unidad de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la alcaldía Azcapotzalco y que se utilizaron con la autorización respectiva. Con respecto a la información geológica, geotécnica y arqueológica utilizada, prácticamente toda la información está disponible en internet.

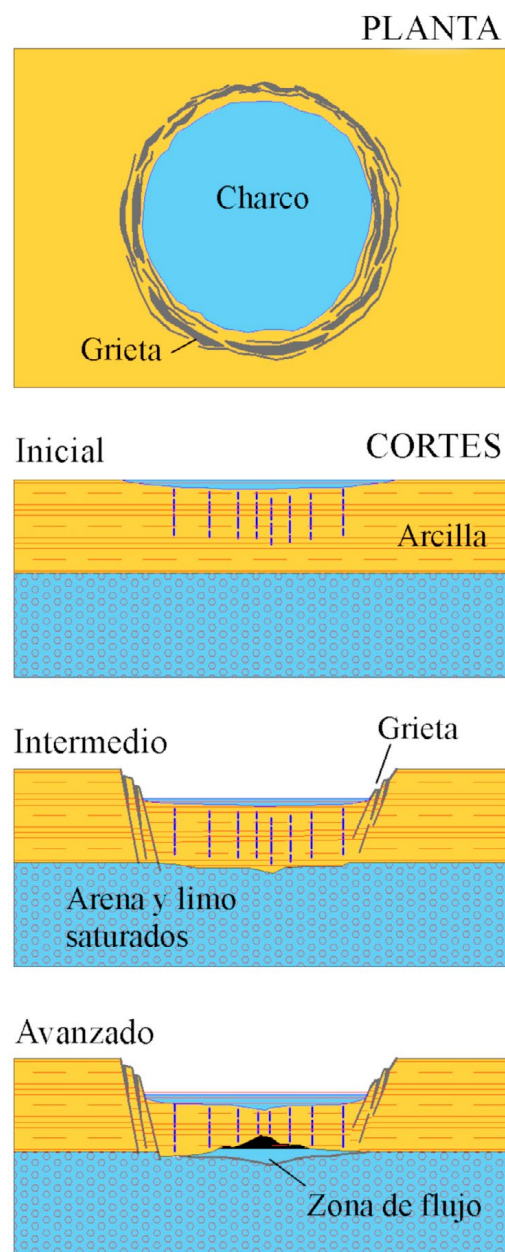


Figura 17. Esquema del proceso de formación y desarrollo de los hundimientos circulares en materiales clásticos del área de interés.

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

Financiamiento. Este trabajo no recibió financiamiento externo. El trabajo de campo y análisis en materia de protección civil, se realizaron sin recursos adicionales a los destinados para las labores de prevención en protección civil y los análisis, interpretaciones y redacción de este texto fueron solventados con recursos propios de los autores.

REFERENCIAS

Álvarez-Manilla, A. (2000). “Cleft fluid pressure” depletion as the main ground subsidence factor in oil, water and steam fields: Aplicación de la Mecánica de Rocas al Diseño y Construcción de Obras Civiles, Mineras y Petroleras. In José Luis Garrido Uribe (Ed.), *VI Reunión Nacional*

- de Mecánica de Rocas, Museo Tecnológico de la Comisión Federal de Electricidad, (19-26).
- Arce, J. L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., Benowitz, J., & Vásquez-Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*, 15(2), 320–332. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1593251>
- Auvinet, G., Méndez, E. & Juárez, M. (2017). *El Subsuelo de la Ciudad de México*, Vol. III. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Benhumea, M., & Vázquez, A. (1988). *Estudios Geofísicos del Valle de México*. Comisión Federal de Electricidad, Unidad de Estudios de Ingeniería Civil.
- Briones, J. J., García-Villegas, F., Garrido-Urbe, J. L., Garay, F., & Pérez, R. (1997). *Exploración geológico-geofísica del Proyecto Colector Poniente, entre el vaso regulador El Cristo y San Martín Tepetlixpan, municipios de Tlalnepantla y Cuautitlán Izcalli, Estado de México* (informe técnico). Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil.
- Campa-Uranga, M. F. (1965). *Breve Análisis Petrográfico de la Sierra de Guadalupe* [tesis de licenciatura]. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.
- Castañeda de la Paz, M. (2015). Azcapotzalco, Tenochtitlan y Tlacopan. Tres siglos de encuentros y desencuentros. *Arqueología Mexicana*, 136, 65–71.
- Castillo, M. R. (1978). *El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México*. Cap. 3. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- CIBERNA S.A. de C.V., 2023, *Radar de Penetración Terrestre; Tomografía de Resistividad Eléctrica* (Reportes técnicos). Tlaltécatl C1, Xochináhuac.
- Comisión Federal de Electricidad (2022). *Manejo y análisis de datos de pruebas hidráulicas en pozos para abastecimientos de agua, Procedimiento CFE-10100-71*: Subcomité de la Normalización Técnica de la Comisión Federal de Electricidad. <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/u/10100-71.pdf>, consultado 04 de noviembre de 2025.
- Díaz-Pérez, J. A., Flores-Corona, L. E., Aragón-Cárdenas, J., & López-Bátiz, O. A. (2021). *Manual del formato breve de captura de datos para evaluación estructural*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, México.
- García-Palomo, A., Carlos-Valerio, V., López-Miguel, C., Galván-García, A., & Concha-Dimas, A. (2006). Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, LVIII* (2), 195–204.
- 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.
- Gobierno de la Ciudad de México (2023). *Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Cimentaciones*. <https://www.isc.cdmx.gob.mx/directores-res/cursos-de-actualizacion-2022/normas-tecnicas-complementarias-2023>, consultado 12 de agosto de 2024.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana*, 7(3), 227–283. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2005v57n3a2>
- González-Gómez, J. A. (2022). *Nueva Cronología Histórica de Azcapotzalco*. (Sin casa editora). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30217.52321>
- González-Torres, E. A., Morán-Zenteno, D. J., Mori, L., & Martiny, B. M. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 285–297.
- Iglesias, J. (1989). Sismicidad de la Ciudad de México. *En Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*.
- Iglesias, J., (2017). Reflexiones sobre la zonificación sísmica de la Ciudad de México: *Revista Nexos*. <https://nexos.com.mx/?p=34042>, consultado 15 de agosto de 2024.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2024). *Datos vectoriales de las cartas topográficas E14A29e y E14A39b, escala 1: 20,000 zona Ciudad de México*. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- Jacobo-Albarrán, J. J. (1985). *Estudio Petrogenético de las Rocas de la Porción Central del Eje Neovolcánico* (reporte técnico). Instituto Mexicano del Petróleo.
- Lermo, J. F., & Sánchez-Sesma, F. J. (2020). *Actualización de la zonificación sísmica de la Ciudad de México y áreas aledañas-Parte Norte*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería - Gobierno de la Ciudad de México, Instituto de la Seguridad de las Construcciones de la Ciudad de México. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-nacional-autonoma-de-mexico/administracion-de-riesgos/zonificacion-sismica-cdmx/77880576>, consultado 17 de julio de 2024.
- Lozano-Barraza, L. (1968). *Geología de la Sierra de Guadalupe, México*, D. F. (tesis de licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.
- Lugo-Hubp, (1990) *Mapa geomorfológico del occidente de la cuenca de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Investigaciones Geográficas.
- Marsal, J. R., & Mazari, M. (1959). El subsuelo de la Ciudad de México. *Contribución al 1er Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones* [Reeditado (español-inglés) 1969].
- Molina, S., & Rosas, A. (2022). *Érase una vez México, 1. De las Cavernas al Virreinato* (Décima primera reimpresión). Booket.
- Murillo, R. (1978). *El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México*. Cap. 4, *Ex-Lago de Texcoco*. México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Pérez-Cruz, G. A. (1988). *Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería.
- Rangel-Núñez, J.L., 2024, ¿Qué son los depósitos profundos en la estratigrafía de la cuenca del Valle de México?. *Revista Geotecnia*, 272, 28–34.
- Santoyo, E., Ovado-Shelley, O., Mooser, F., & León-Plata, E. (2005). *Síntesis geotécnica de la cuenca del valle de México*. TGC-Geotecnia.
- Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México (SGIRPCCM), (2022). *Ciudad Resiliente: Retrospectiva y Proyección de una Ciudad* (In) *Vulnerable* (Segunda edición). https://20210202_DIGITAL.pdf, consultado 4 de septiembre de 2024.
- Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México (SGIRPCCM) (2024). *Informe de Levantamiento de Tomografía Eléctrica (Unidad Habitacional Matlacóatl y Alameda Norte)* (informe ILTE-FNA. 2024.DGAR/002). Dirección General de Análisis de Riesgos.
- Urdapilleta-Pérez, J. A. (2009). Las obras hidráulicas prehispánicas y coloniales en Tlatelolco. *Boletín de Monumentos Históricos*, Tercera Época, 16, 57–73, https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/object/articulo:9779, consultado 21 de mayo de 2024.
- Zeevaert, L., 1983, *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*. Van Nostrand Reinhold Company.