



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CLASIFICACIÓN DEL
FRACTURAMIENTO DEL SUELO EN LA ALCALDÍA IZTAPALAPA.**

INFORME ACADÉMICO POR ACTIVIDAD PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIATURA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

CARLOS FELIPE ALCÁNTARA DURÁN

ASESOR

GEOG. ANTULIO ZARAGOZA ÁLVAREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicado a mis padres, hermanos y abuelos

Agradecimientos

A la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Filosofía y Letras, así como al Colegio de Geografía por brindarme tan gratos años de conocimiento.

A la Alcaldía Iztapalapa, por permitirme en estos 10 años conocer a su población, tradiciones, pueblos y colonias, pero sobre todo, por la oportunidad de lograr desarrollarme como profesionista en el servicio público.

A mi asesor el Lic. Antulio Zaragoza Álvarez por acompañarme en este proceso de titulación. También a mis sinodales, la Dra. Roció Marisol Alanís Anaya, el Dr. José Luis Palacio Prieto, el Mtro. Jorge Enríquez Hernández y al Mtro. Frank Gustavo García Rodríguez por el tiempo dedicado a revisar el presente informe y hacerme a bien, los comentarios y apreciaciones para fortalecer el trabajo escrito.

En especial al grupo de trabajo del Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos (CERG) que siempre me han abierto las puertas para proponer, luchar y perseverar durante años. En este sentido, agradecer a Raúl, Daniel (†), Walter y Félix, por las experiencias y vivencias, día a día consolidando el conocimiento científico en la administración pública.

Por su valioso tiempo y conocimiento compartido durante muchos años, agradezco a la Dra. Dora Carreón, la Dra. Penélope López y al Dr. Mariano Cerca del Centro de Geociencias de la UNAM.

A mis compañeros del Colegio de Geografía, los “raspas”, sin ellos, el desarrollo colectivo sería totalmente distinto. Por todos esos años de lucha, convivencia, trabajo y buena vibra, mi agradecimiento.

Finalmente, a la mujer que me motiva a mejorar todos los días, siempre, Karina.

Índice

Introducción	5
Antecedentes	5
Planteamiento del problema	6
Justificación.....	6
Objetivos	6
Marco teórico metodológico	6
Subsistencia.....	6
Fracturamiento del suelo	8
Capítulo 1. Marco geológico.....	11
1.1 Aspectos generales	11
1.1.2 Geología general.....	15
1.1.3 Geología Local	17
1.2 Unidades morfológicas.....	19
1.2.1 Sierra de Santa Catarina	19
1.2.2 Peñón del Marqués	21
1.2.3 Cerro de la Estrella “Huizachtepetl”	21
1.2.4. Planicie lacustre.....	21
Capítulo 2. Breve historia del crecimiento urbano del siglo XX en la Alcaldía Iztapalapa	23
2.1 Crecimiento urbano a principios del Siglo XX. Primeros registros de hundimiento en la Ciudad de México.....	23
2.2 Crecimiento urbano e industrial en la segunda mitad del siglo XX. Inicio de hundimiento al oriente de la ciudad.....	27
2.3 La escasez de agua potable en la Ciudad de México.....	31
2.3.1 Formas de obtención y abastecimiento de agua potable.....	31
2.3.2 La calidad del agua potable	35
2.4 La Alcaldía Iztapalapa en la actualidad: la problemática de subsidencia y fracturamiento	35
2.5 Afectaciones por los sismos del mes de septiembre del 2017	41
Capítulo 3 Escala de Intensidad del Fracturamiento	44
3.1 Propuesta metodológica	44
3.2 Escala de Intensidad del Fracturamiento	47
3.3 Brigadas en campo	49
3.4 Resultados	50
3.5 Programa “Acupuntura Urbana”	53
Conclusiones	55
Referencias bibliográficas	57

Introducción

Antecedentes

A partir del proceso de urbanización de la Ciudad de México a mediados del siglo XX, inició el fenómeno de subsidencia o hundimiento regional en la Ciudad de México, por el incremento de la demanda de servicios básicos, principalmente el agua, acelerada por la carga estática de las construcciones y dinámica del tránsito vehicular. Mediante la sobreexplotación de los mantos acuíferos, se ha contribuido al proceso de subsidencia de las planicies lacustres. Este proceso se presenta de manera irregular y genera fracturamiento del subsuelo y afectación a la infraestructura urbana (Alcaldía Iztapalapa, 2008). Artículos relacionados con la subsidencia del terreno (Strozzi et al., 2001; Cabral-Cano et al., 2008; López-Quiroz et al., 2009) indican que la ciudad presenta tasas que rebasan los 370 mm/año de subsidencia en el oriente (Cabral-Cano et al., 2008). Algunos estudios (López-Quiroz et al., 2009) muestran un ligero aumento de la tasa de subsidencia anual, entre los 38.7 cm/año en el periodo que comprende el año 2003-2007. Los problemas de subsidencia han sido reportados particularmente en el territorio de la Alcaldía de Iztapalapa, que corresponde al área que se estudia en este trabajo.

Auvinet y colaboradores (2014) reportan la ocurrencia del fenómeno de hundimiento en la Ciudad de México, siendo en la zona de transición abrupta entre materiales de suelos firmes a suelos blandos donde se genera el agrietamiento (grietas tipo II). Así mismo, se han generado mapas de susceptibilidad a peligros geomorfológicos en Iztapalapa (García et al. 2020), donde incluye al fracturamiento clasificándolo por densidad de lineamiento (densidad por km²). Carreón (2011) ha clasificado el fracturamiento de la alcaldía Iztapalapa de acuerdo al proceso geológico que le da origen y a su profundidad. García (2015) elaboró la cartografía de peligros geomorfológicos en Iztapalapa, zonificando la ocurrencia (máxima, frecuente y mínima) de diversos fenómenos (hundimientos, inundaciones, grietas y desprendimiento de rocas). Por su parte Romero (2020) identificó con base en información del Atlas de Riesgos y Vulnerabilidades de la Alcaldía Iztapalapa del 2011, las zonas por peligro de hundimiento y agrietamiento.

Adicionalmente, los sismos son factores que modifican el proceso de subsidencia y fracturamiento del terreno. El sismo del 19 de septiembre de 2017 (magnitud 7.1° a 12 km al SE de Axochiapan, Morelos) colapso edificaciones, viviendas y afectó vialidades en la Ciudad de México (SSN, 2017). Dichos inmuebles afectados, se presentaron principalmente en zonas donde las ondas sísmicas de duración corta (menos de dos segundos) actuaron como agentes para la variación en los desplazamientos del terreno en las zonas asociadas a fracturamiento y deformación del terreno. A partir del sismo, se han presentado en boletines informativos datos sobre variaciones del desplazamiento del terreno en la Ciudad de México (Carreón et al., 2017), sin embargo, estos no proveen información sobre el grado de afectación en viviendas o su correlación con las zonas de fracturamiento en las zonas de desplazamientos del terreno a partir del sismo.

El presente informe se generó a partir de la necesidad en la Dirección General de Obras y Desarrollo Urbanos de la Alcaldía Iztapalapa de llevar a cabo un programa de intervención y mejoramiento de las vialidades afectadas por el fenómeno de fracturamiento del suelo. La metodología para clasificar el fracturamiento fue propuesta y aplicada en todo el territorio de la alcaldía en 2018, teniendo como información inicial, la obtenida por el grupo de trabajo del Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos (CERG), ahora Subdirección del Centro de

Evaluación de Riesgos (SCER). La subdirección desarrolla conocimiento científico desde el año 2007, en un trabajo entre el gobierno y la academia.

Planteamiento del problema

El fracturamiento es un problema en la Alcaldía Iztapalapa de manera regional producto de la subsidencia que sufre la Ciudad de México. Durante más de 10 años se han estudiado estas grietas tratando de identificarlas y caracterizar el origen del fenómeno de manera local, como llevando un registro físico en un Sistema de Información Geográfica (SIG). A partir del sismo del 19 de septiembre del 2017, el inventario dejó de tener una utilidad ante la magnitud de daños por el evento sísmico, por lo tanto, se necesitaba implementar una clasificación del fracturamiento del suelo con base en parámetros de fácil reconocimiento, asignando un color de acuerdo a la magnitud de cada grieta, para ubicar las zonas de mayor peligro.

Justificación

De los 1,835,486 habitantes con los que cuenta la Alcaldía Iztapalapa (INEGI, 2020), al menos el 10% de su población se encuentra afectada por este fenómeno (Alcaldía Iztapalapa, 2015) teniendo el 25km² de su superficie total impactada en su territorio, dañando la infraestructura, el equipamiento y las vialidades. Aunado a eso, las fracturas han reportado movimiento ante las vibraciones sísmicas del 19 de septiembre de 2017, generando un aumento en los problemas ya identificados, poniendo en mayor vulnerabilidad física a las viviendas que tienen incidencia a la trayectoria de una grieta. Por ello, la clasificación propuesta en el presente informe, denominada “Escala de Intensidad de Fracturamiento” dio paso a un método de mitigación geotécnica, por lo cual, cada escala está asociada a un procedimiento constructivo puntual. Este procedimiento fue desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. De esta manera, se creó el programa de “Acupuntura Urbana” para la mitigación de grietas en vialidades, que ayuda a disminuir la dinámica del fenómeno evitando rompimiento súbito en vialidades y aumentando el factor de seguridad de las viviendas afectadas.

Objetivos

General

- Aplicación de una propuesta metodológica para la clasificación del fracturamiento del suelo en Iztapalapa.

Particulares

- Explicar las condiciones geológicas que dan origen al fracturamiento del suelo en la Alcaldía Iztapalapa.
- Identificar los factores antrópicos que propiciaron un incremento del hundimiento de la Ciudad de México y aceleraron el fracturamiento del suelo a partir del siglo XX.
- Identificar correctamente la magnitud de las grietas que se encuentran en territorio de la Alcaldía Iztapalapa a partir de la “escala de Intensidad de Fracturamiento”.

Marco teórico metodológico

Subsidencia

El término subsidencia, con base al diccionario geomorfológico de Lugo-Hubp (2011), aborda dos definiciones:

1. f.1. Hundimiento progresivo del fondo de una cuenca de acumulación paralelo al proceso de depositación de sedimentos. 2. Hundimiento de una porción de la superficie terrestre por causas diversas: a) compactación de arcillas, asociado a la extracción de agua del subsuelo; b) hundimiento en un relieve kárstico, especialmente por la presencia de dolinas; c) hundimiento tectónico que ocurre en zonas activas, lo cual puede ser un proceso rápido causado por un sismo.

El segundo término, el autor lo refiere a la acción antrópica:

2. f. Asentamiento gradual o súbito (colapso) de la superficie terrestre, como consecuencia de la extracción de material del subsuelo o por disolución de rocas solubles infrayacentes, es un proceso natural inducido por el hombre. Un caso es el de la planicie lacustre urbanizada de la Cuenca de México, afectada por subsidencia (cerca de 9 m a lo largo del siglo XX).

Al ser endorreica la Cuenca de México, el proceso de subsidencia se origina por la consolidación de las arcillas (suelos blandos), derivado de la extracción de agua subterránea, como lo enuncia Lugo-Hubp (2011). La extracción de agua subterránea causa el abatimiento de la superficie piezométrica y produce subsidencia del terreno por la consolidación de las arcillas superficiales. También el hundimiento total del terreno tiene relación con el espesor de capas de arcilla del subsuelo lacustre.

Este tipo de subsidencia relacionada con el espesor de las arcillas lo explica Galloway et. al. (1999) de la siguiente manera:

En los sistemas de acuíferos aluviales, especialmente aquellos que incluyen limos semiconsolidados y capas de arcillas con grosores suficientes (decenas de metros), a largo plazo (años o décadas) el nivel de las aguas subterráneas desciende a causa del bombeo (extracción), produciendo compactación de las arcillas, que se manifiesta como hundimiento del terreno. Acompañando esta liberación de agua (por la extracción) las arcillas no recuperan su forma por la disminución del tamaño del poro, y por lo tanto, reducen su capacidad de almacenamiento de agua. Esta “compactación del agua” no puede ser reintegrada a las arcillas, por lo que los niveles de agua no recuperan su estado anterior (Figura 1).

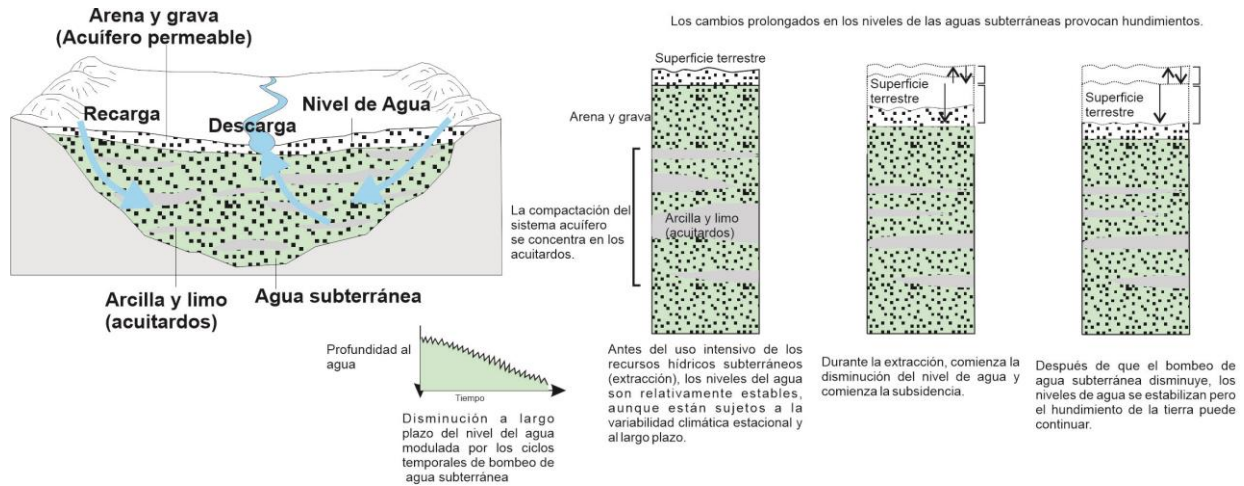


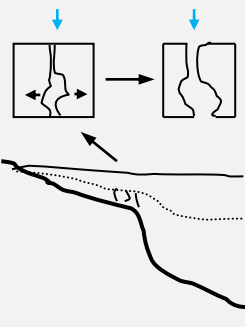
Figura 1 Izquierda. Sistema acuífero sin desarrollarse, está en balance entre carga y descarga. El bombeo para usos urbanos y agrícolas interrumpe el balance y causa subsidencia. **Derecha.** Cambios prolongados en los niveles de agua subterránea que induce subsidencia (simplificado de Galloway, et. al. 1999).

Fracturamiento del suelo

En la actualidad varias disciplinas han abordado el estudio de la génesis y los procesos actuantes en cuanto a la deformación y generación de fracturamiento se refiere. En las últimas décadas, las Ciencias de la Tierra han contribuido al conocimiento de este fenómeno geológico presente principalmente en las zonas urbanas y regiones agrícolas que han sobreexplotado los mantos acuíferos. En la siguiente tabla se muestran las distintas concepciones, mecanismos y esquemas del fracturamiento del suelo desde el punto de vista de diversas disciplinas.

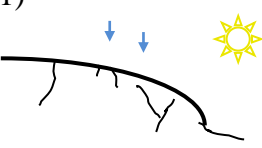
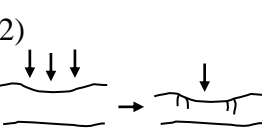


Tabla 1. Definición del fracturamiento por disciplina

Definición / Autor	Mecanismo /Proceso	Esquema
Geología		
Se le denomina “fractura” a la separación de materiales geológicos en el subsuelo o en la superficie cuando su resistencia es menor al esfuerzo que se aplica. Se diferencia de una “grieta” por la asociación que tiene esta última con los cambios de humedad de cualquier material y que generalmente tiene una connotación superficial. (Carreón, 2011)	De manera general se pueden presentar cuatro mecanismos: 1) Materiales altamente heterogéneos (el fracturamiento se localiza en zonas de contacto); 2) Deslizamiento en forma de bloques irregulares (originados en una superficie de despegue); 3) Colapso de materiales piroclásticos (socavamientos derivado de la pérdida de estructura derivado de infiltración de agua; y, 4) Deformación diferencial en planicies lacustres (condicionado por la compresibilidad y el contenido de agua de las arcillas).	<p>1)</p> <p>2)</p> <p>3)</p> <p>4)</p>
Ilustraciones: Simplificado de Alcaldía Iztapalapa, 2011		

Definición / Autor	Mecanismo /Proceso	Esquema
<p>La “fisura” es resultado de la falla del suelo en áreas de compactación diferencial o desigual, teniendo afectaciones en carreteras, construcciones, vías de ferrocarril, tuberías y alcantarillas. (Galloway, et. al., 1999)</p>	<p>La menor compactación de una cuenca aluvial ocurre en la capa de aluvión más delgada, cerca del margen de la cuenca. La tensión que resulta de la compactación diferencial se extiende en el sedimento suprayacente hasta que falla como una “fisura”.</p>	

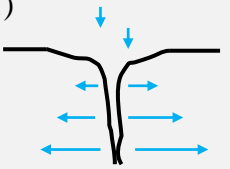
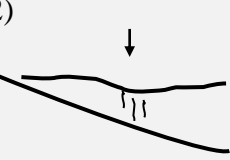
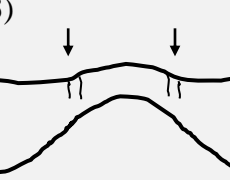
Ilustraciones: Simplificado de Galloway, et. al., 1999

Geomorfología

<p>Grieta es una ruptura longitudinal de las rocas o el hielo, sin desplazamiento de las porciones que separa. Las grietas pueden ser de origen tectónico y no tectónico. Se usa como sinónimo de fisura y fractura (Lugo-Hubp, 2011).</p>	<p>Existen varios orígenes de las grietas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) De intemperismo 2) De compactación 3) De desprendimiento 4) De deslizamientos 	<ol style="list-style-type: none"> 1)  2)  3)  4) 
--	--	--

Ilustraciones: Elaboración propia

Geotecnia

Definición / Autor	Mecanismo /Proceso	Esquema
<p>El fisuramiento de las arcillas se puede describir como un evento rápido que ocurre cuando se acumula agua en la superficie y bruscamente se abre una fisura por la que penetra ese líquido (Santoyo, et. al., 2005).</p> <p>En las zonas de transición abrupta, contacto lacustre-volcánico, el hundimiento se manifiesta con mayor virulencia con la consecuente aparición de fisuras en superficie. (Santoyo, 2005)</p>	<p>1) El mecanismo es de fisuramiento hidráulico y, como se describe esquemáticamente, el agua que se acumula en la superficie penetra dentro de la discontinuidad y genera un incremento de las presiones horizontales en su vértice inferior lo cual propaga la grieta.</p> <p>2) Mecanismo de fisuración a la orilla del lago</p> <p>3) Mecanismo de fisuración sobre un domo cubierto</p>	<p>1) </p> <p>2) </p> <p>3) </p>
Fuente de ilustraciones: Simplificado de Santoyo, et. al. 2005		

La principal problemática asociada con el fracturamiento en la Cuenca de México se observa a partir del “comportamiento de las orillas”, correspondientes a las zonas de transición entre los suelos lacustres arcillosos y secuencias volcánicas. Estas condiciones de transición abrupta se presentan al norte, oriente y sur de la Ciudad de México (Santoyo, 2005).

En las zonas de contacto se desarrollan los principales patrones de fracturamiento; dentro de la alcaldía Iztapalapa se presentan en los bordes de la Sierra de Santa Catarina y el Peñón del Marqués, y que al encontrarse estratigrafías distintas, tanto en secuencias de suelos finos y gruesos, como en profundidades de estos, la dinámica que origina el fracturamiento tiende a presentarse de manera distinta. Como lo manifiesta Carreón (2011), el deslizamiento en forma de bloques irregulares mediante una zona de despegue, se puede observar en los flancos que rodean la estructura volcánica Peñón del Marqués, ya que las fracturas que se presentan circundan y tienen un echado hacia el piedemonte de este. El medio urbano que se encuentra en el piedemonte se encuentra afectado por los efectos del fracturamiento que se ha desarrollado con mayor magnitud en las últimas décadas.

Capítulo 1. Marco geológico

1.1 Aspectos generales

La Cuenca de México se encuentra ubicada en el Centro-Oriente del Sistema Neovolcánico Transmexicano (SNT, Faja Volcánica Mexicana o Sistema Volcánico Transversal). La dinámica del SNT se desarrolló en el Cuaternario (Plioceno, Pleistoceno – Holoceno), época en que la actividad endógena se manifiesta en grandes superficies como predominio sobre los procesos exógenos niveladores (Lugo-Hubp, 1990). Se extiende desde el Océano Pacífico en los estados de Nayarit y Jalisco, hasta el Golfo de México en el estado de Veracruz, correspondiente a los paralelos 19° a 21° Norte y meridianos del 105° al 97° Oeste.

Según Demant (1976) el SNT se encuentra subdividido por cinco grandes sectores: 1) Fosa de Chapala (Tepic-Chapala), 2) Fosa de Colima, 3) Zona de Michoacán, 4) Valles (cuencas) de Toluca, México y Puebla y 5) Sector Oriental. Estos sectores tienen la particularidad que se encuentran delimitados por rasgos morfológicos. Hace un millón de años (Pleistoceno Temprano), la Cuenca de México permaneció abierta (exorreica) sobre la cual drena un sistema fluvial integrado por dos ríos principales, el Cuernavaca y el Cuautla. El primero al occidente, alimentado por las Sierras de las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo, de Guadalupe, Tepoztlán, Cerro Gordo, de los Pitos y Sierra de Pachuca. El segundo al oriente, alimentado por aguas de la Sierra Nevada; ambos afluentes del Río Amacuzac, que se integran al Balsas, para desembocar al Océano Pacífico (Figura 1.1).

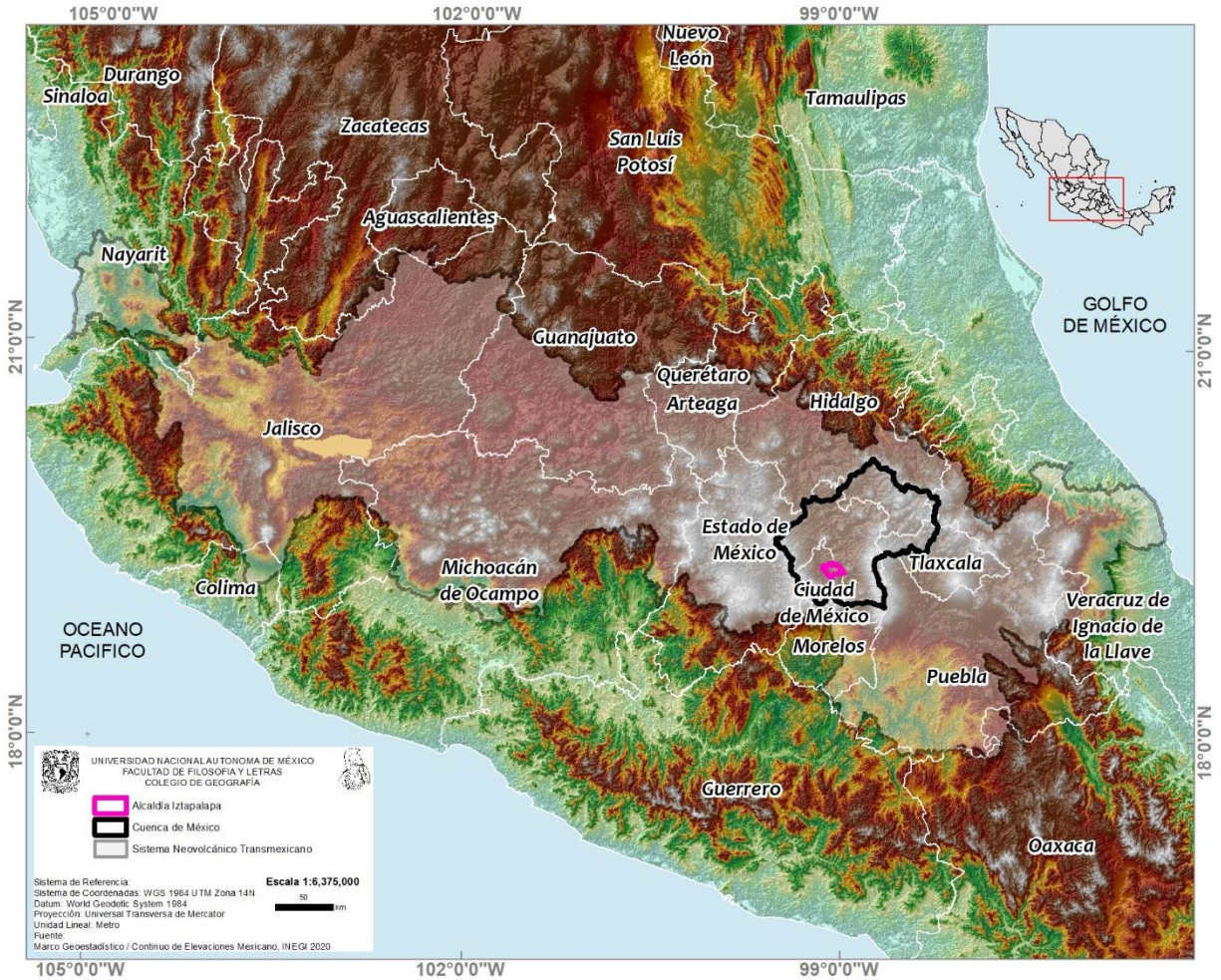
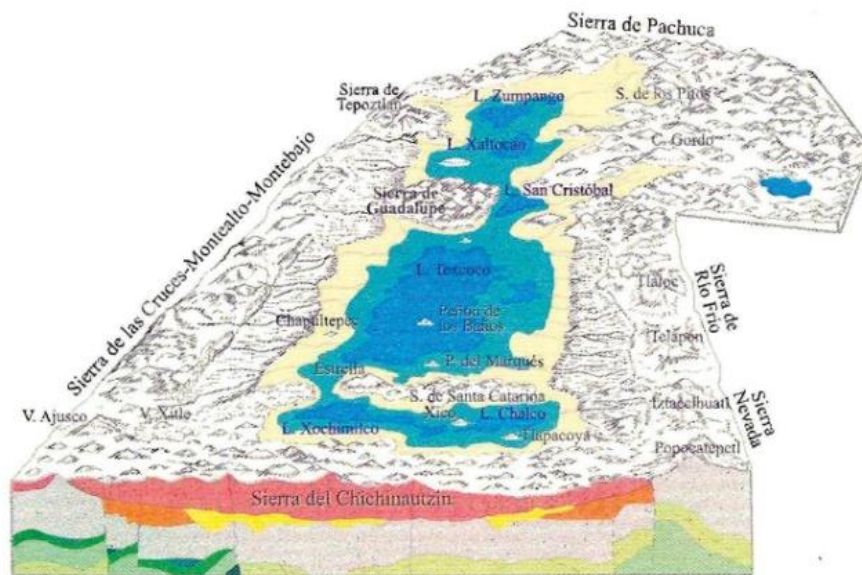
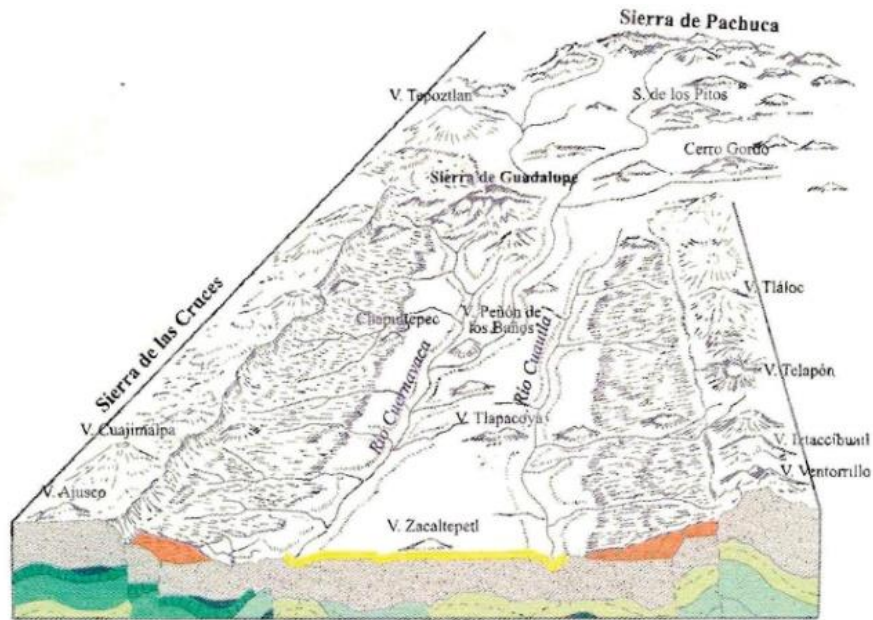


Figura 1.1 Localización de la Cuenca de México a nivel nacional (elaboración propia).

Hace setecientos mil años, la intensa actividad volcánica originó la Sierra del Chichinautzin, cerrando de manera natural el sur de la antigua cuenca, obstruyendo el drenaje de los ríos que drenaban al Balsas, lo cual almacenó el agua de las sierras y dio origen a varios lagos (Figura 1.2). La porción central se fue rellenando con sedimentos limo-arenosos, limo-arcillosos y emisiones de ceniza y pómez de los volcanes del sur.



LEYENDA

Rocas marinas del Mesozoico	Depósitos piroclásticos del Terciario Inferior	Depósitos aluviales	Lagos	Planicie fluvio-lacustre
Depósitos de acarreo fluvial	Depósitos volcánicos Cuaternario Superior	Planicie lacustre		

Figura 1.2. Arriba. La Cuenca de México en el Pleistoceno Temprano. Abajo. La Cuenca de México en el Pleistoceno Tardío, presenta al sur la Sierra de Chichinautzin (hace 700,000 años). (Mooser, 1975, citado en Gutiérrez-MacGregor, et. al., 2005)

La Cuenca de México se encuentra delimitada al Norte por la Sierra de Pachuca, al Sur por la Sierra de Chichinautzin, al Oriente por la Sierra de Río Frío y la Sierra Nevada, y al Occidente por la Sierra de las Cruces. La CM se encuentra entre los meridianos 98° 15' a los 99° 30', y los paralelos 19° 00' a 20° 15'.

Dentro de la zona se presentan distintas morfologías, asociadas al proceso erosivo-acumulativo de las Sierras que circundan la cuenca. Gutiérrez-MacGregor, et. al., 2005 presenta cuatro regiones morfológicas (Figura 1.3):

Relieve montañoso: Terrenos dado su altura relativa se distinguen de superficies adyacentes, presentan contrastes altitudinales en cortas distancias y laderas heterogéneas. El relieve en la cuenca es de origen volcánico (Terciario al Cuaternario), las mayores elevaciones definieron el parteaguas, las pequeñas elevaciones forman prominencias aisladas y sierras que irrumpen la continuidad de la planicie. La intensidad y el tiempo de exposición al que ha estado sujeto el relieve a los procesos erosivos, han definido la diferencia de morfologías en todas las montañas en la cuenca.

Los dos agentes que contribuyen a la expresión actual del relieve son de origen fluvial y glacial. El primero, presente en todos los conjuntos montañosos, con distinta intensidad, en algunos casos se llega a perder la fisonomía original (ej. Sierra de Tepetzotlán, o Sierra de Guadalupe), por el otro lado, en las sierras de Chichinautzin y Tezontepec, no existe un sistema fluvial, derivado de la infiltración, por lo que conservan su morfología original. El agente glacial es resultado del movimiento de una masa de hielo donde el desgaste (abrasión), el arranque (plucking) y los pulidos (exaración), forman circos glaciares, valles en forma de “U” y distintos tipos de morrenas entre otras formas de relieve. Este proceso se encuentra de manera notable en la Sierra Nevada, en elevaciones presentes en el Cuaternario, ya que se presentan climas fríos y masas de hielo de mayor volumen, es el caso del volcán Ajusco, mientras al sur prevaleció un ambiente periglacial, estas condiciones también se presentaron en la Sierra de las Cruces. Actualmente se presenta un ambiente glacial en los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl.

Piedemonte: Superficie inclinada marginal a las cadenas montañosas, sierras y volcanes, su origen corresponde a la alteración de numerosas fases de erosión-sedimentación y volcánica acumulativa.

Los periodos de erosión-sedimentación han sido resultado de actividad glacial, fluvial y gravitacional. Estos procesos han contribuido con el desarrollo de piedemontes con sedimentos glaciales, aluviales, proluviales y coluviales. Las principales formas de relieve de estos depósitos son los abanicos aluviales o proluviales y conos de escombros.

Derivado de las etapas volcánico-acumulativas, las secuencias sedimentarias exógenas se ven interrumpidas por secuencias de colada de lava, flujos piroclásticos, o de bloques y ceniza, lahares o por material de caída, dando como resultado lomeríos, superficies mesetiformes o en gradería (escalonadas).

Su desarrollo depende del tiempo que han quedado expuesto los conjuntos montañosos, a los procesos de erosión. Para la Cuenca de México las sierras de Las Cruces y Nevada tienen piedemonte de mayor desarrollo (iniciaron formación en el Terciario Inferior), en contraparte la Sierra de Chichinautzin (con menos de un millón de años) cuenta con incipientes y discontinuos piedemontes.

Planicies proluviales-lacustres: Presentan pendiente menor a cinco grados, constituido por material proluviales, acarreados principalmente del piedemonte a riberas lacustres, cuerpos de agua poco profundos o llanuras de inundación temporal. Las gravillas y arenas de diversa granulometría son las texturas que predominan en los abanicos entre el piedemonte y la planicie

lacustre. Los depósitos al llegar a lagos y zonas inundables, comienzan a rellenarse, dan paso a porciones de tierra firme con humedad constante, favoreciendo la vegetación hidrófila y cieno; este ambiente se conoce como ciénagas y marca el inicio de desaparición de los lagos. La expresión morfológica es muy sutil e incluye superficies subhorizontales, inclinadas, onduladas, cóncavas y escalonadas.

Planicie lacustre: con pendientes inferiores a los cuatro grados de inclinación y una superficie cuasi horizontal, presenta una altitud promedio de los 2,240 msnm. Derivado de un proceso de relleno de todo el terreno a partir de la aparición de la Sierra de Chichinautzin, funcionando como represa natural. Al azolverse se intercalaron materiales proluviales (limos y arenas), lacustres (arcillas y limos), arenas y cenizas volcánicas, que al intemperizar generan arcillas altamente compresibles.

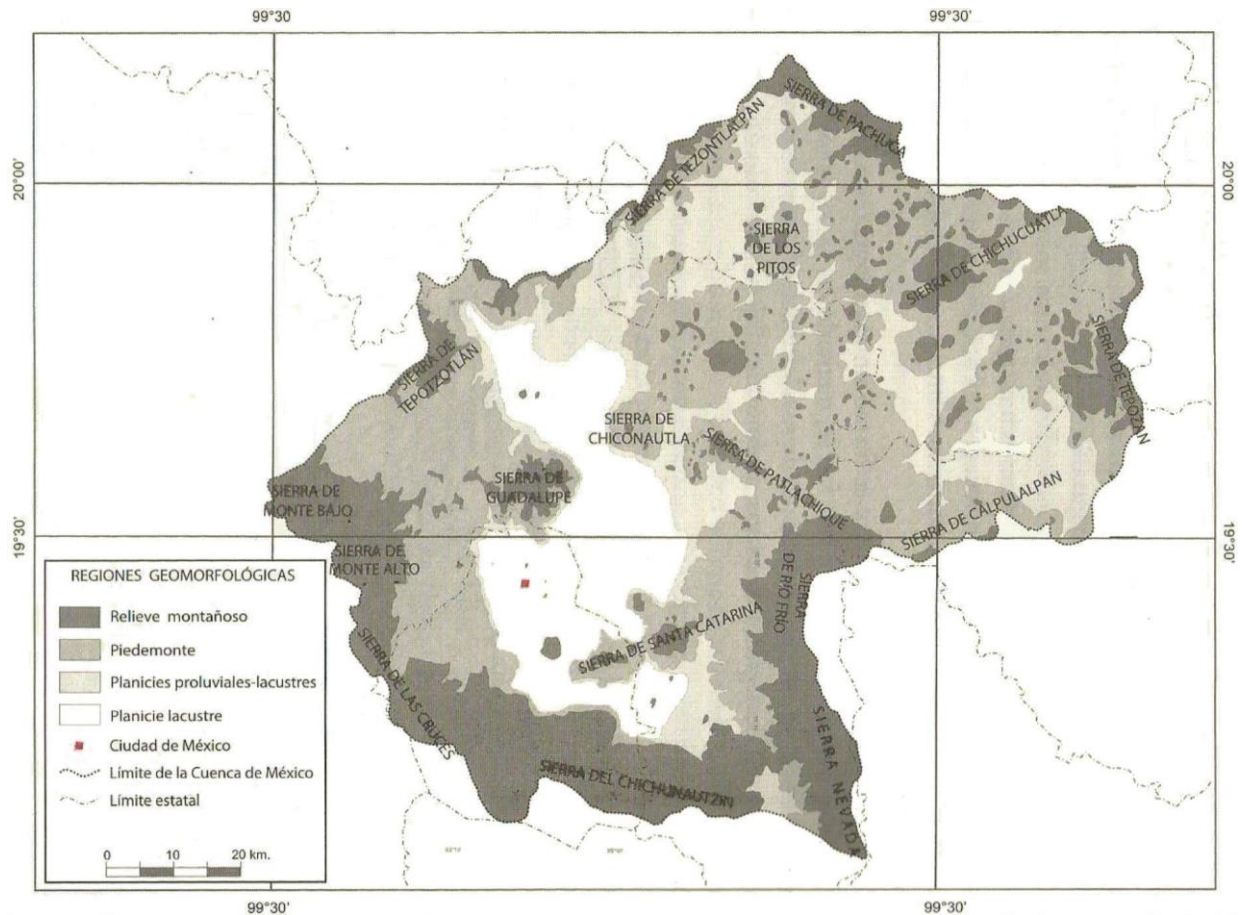


Figura 1.3. Principales regiones geomorfológicas de la Cuenca de México (Gutiérrez-MacGregor, et al., 2005)

1.1.2 Geología general

De manera general, la secuencia estratigráfica, de la Cuenca de México, se compone de rocas calcáreas y calcáreo-arcillosas, del Mesozoico (cretácico), que subyacen de manera discontinua por rocas volcánicas, depósitos aluviales, fluviales y lacustres del Cenozoico (Vázquez, S. et al., 1989).

Los depósitos más antiguos calcáreos limosos y arcillosos en una extensa plataforma marina, corresponden a la edad Albiano Medio-Cenomaniano Temprano, de la formación Morelos, identificadas por las perforaciones de los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 a 1,550 y 2,100 msnm, respectivamente.

Sobre estos depósitos, se encuentra la regresión marina correspondiente a las formaciones El Doctor (facies de banco) y Cuautla (facies de banco y litoral). Sobreyace a estas, la formación Mexcala, del Coniaciano-Campaniano, que representa una formación flysch (De Cserna, 1988), que se generó como posible consecuencia del levantamiento y erosión del arco magmático Cretácico. Posterior a la actividad tectónica se depositaron secuencias clásticas continentales del Balsas (depositados al Sur de la cuenca) y El Morro (depositados al Norte de la cuenca), con efusiones fisurales de basaltos alcalinos. Ambos de conglomerados rojos de clastos calcáreos bien consolidados, de origen fluvio-aluvial, que presentan intercalaciones de tobas y lavas andesíticas y basálticas.

Para el Mioceno Inferior y Medio se presenta actividad tectónica en la cuenca representada por fracturamiento y fallamiento, un sistema SW-NE (falla Apan-Tlálóc) y SE-NW (alineamientos Popocatepetl - Cerro de Chimalhuacán - Sierra de Guadalupe, emplazándose rocas volcánicas calci-alcalinas, desde andesitas hasta dacitas, formando parte del arco volcánico del Terciario Medio. En el Mioceno Tardío, los procesos fluviales dieron lugar a la formación Tepoztlán. Se presentan hiatos magnáticos en el Sistema Neovolcánico Transmexicano, representados por secuencias de depósitos piroclásticos y de flujo, derrames lávicos y domos, de composición andesítica a dacítica. Durante el Plio-Cuaternario se emplazan basaltos fisurales, y coladas de basaltos, con tefra de caída, de composición calci-alcalina de edad Cuaternaria. Esta conjunción volcánica conforma las Sierras Nevada y Río Frío al Oriente, Sierra de las Cruces y Zempoala al poniente (Figura 1.4).

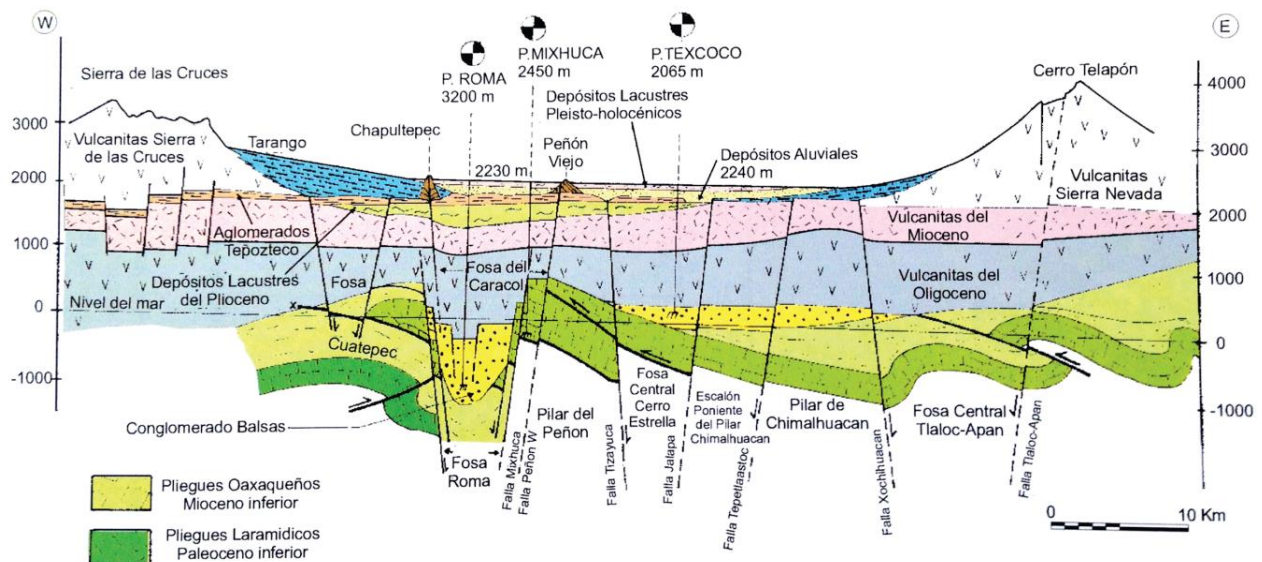


Figura 1.4. Sección geológica WE de la Cuenca de México. Sierra de las Cruces al W y Sierra Nevada al E. (Santoyo, et. al. 2005)

Posterior a la formación de las sierras, se depositó un complejo volcano-sedimentario, que se le conoce como la formación Tarango, que se encuentra al SW de la cuenca. Su principal

característica es el arreglo caótico de las series clásticas depositadas. La sierra de Chichinautzin se originó en el pleistoceno y holoceno, formando conos cineríticos y derrames de lava vesiculares y masivos, asociados a material piroclástico, cubriendo discontinuamente a las unidades estratigráficas desde cretácicas marinas plegadas hasta cuaternarias lacustres (Figura 1.5). De igual manera el centro de la cuenca (Tizayuca, Atzompa y Texcoco) presenta características petrográficas y morfológicas semejantes a las de Chichinautzin.

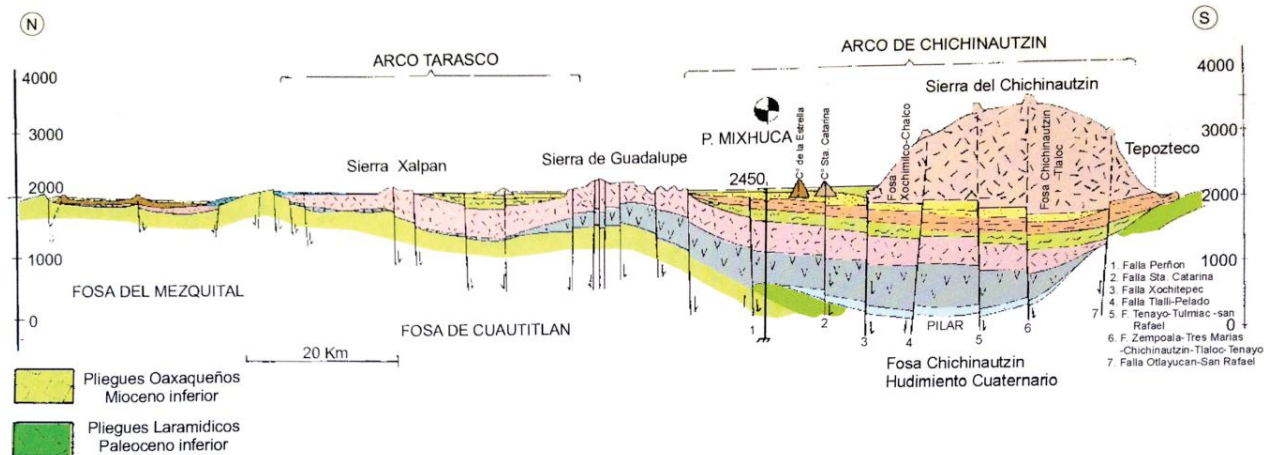


Figura 1.5. Sección geológica NS de la Cuenca de México. Al S la Sierra de Chichinautzin. (Santoyo, et. al. 2005)

Los depósitos más recientes son sedimentos clásticos y productos piroclásticos del Popocatepetl y la Sierra de Chichinautzin, depositados en un ambiente lacustre. Estos depósitos formaron la planicie lacustre (morfología antes descrita), con espesores entre los 30 y los 300 m.

1.1.3 Geología Local

La Alcaldía Iztapalapa se localiza al Sur de la Cuenca de México, en el Distrito Federal, limitando: al Norte con la Alcaldía Iztacalco, al Sur con Tláhuac principalmente por el límite natural formado en el parteaguas de la Sierra de Santa Catarina, al Suroeste con Xochimilco sobre la trayectoria del Canal de Chalco, al poniente con la Alcaldía Coyoacán por Av. Canal Nacional (Canal de Chalco), al Noroeste con Benito Juárez por Av. Plutarco Elías Calles, y al oriente con el Municipio de Nezahualcóyotl quedando el límite sobre la Av. Texcoco, y Los Reyes La Paz limitando por la carretera México-Puebla (Figura 1.6).

En cuanto a morfología, se presentan las cuatro regiones morfológicas mencionadas con anterioridad. La población en Iztapalapa se encuentra principalmente establecida sobre la planicie lacustre de los remanentes del lago de Texcoco y el piedemonte de la Sierra de Santa Catarina, las planicies proluviales-lacustres son incipientes, ya que esta región morfológica se encuentra con un mayor desarrollo al norte de la cuenca, en el Estado de México y Estado de Hidalgo.

Las características de las rocas superficiales (menos de 100 metros), de acuerdo a Marsal R., et. al. (1959), definen una clasificación estratigráfica: la zona de lago, la zona de transición y la zona de lomas. La zona del lago se representa en Iztapalapa por secuencias arcillosas, limos y arenas con diferentes grados de cementación y consolidación, además de depósitos piroclásticos y lavas intercaladas. La zona de transición se dividió en transición abrupta y estratificada. De acuerdo con estos autores, la transición abrupta caracterizaría los flancos del Peñón del Marqués, mientras

que la transición estratificada podría ejemplificarse en los flancos del Cerro de la Estrella. En estas zonas cercanas a los edificios volcánicos hay depósitos aluviales y de pendiente.

La zona de lomas, incluye el Cerro de la Estrella, La Sierra de Santa Catarina y el Peñón del Marqués. Estas últimas, son las mayores elevaciones, que corresponden a edificios volcánicos compuestos por andesitas, basaltos y rocas piroclásticas de edad plioceno y pleistoceno, hace 5 millones de años (Alcaldía Iztapalapa, 2008).

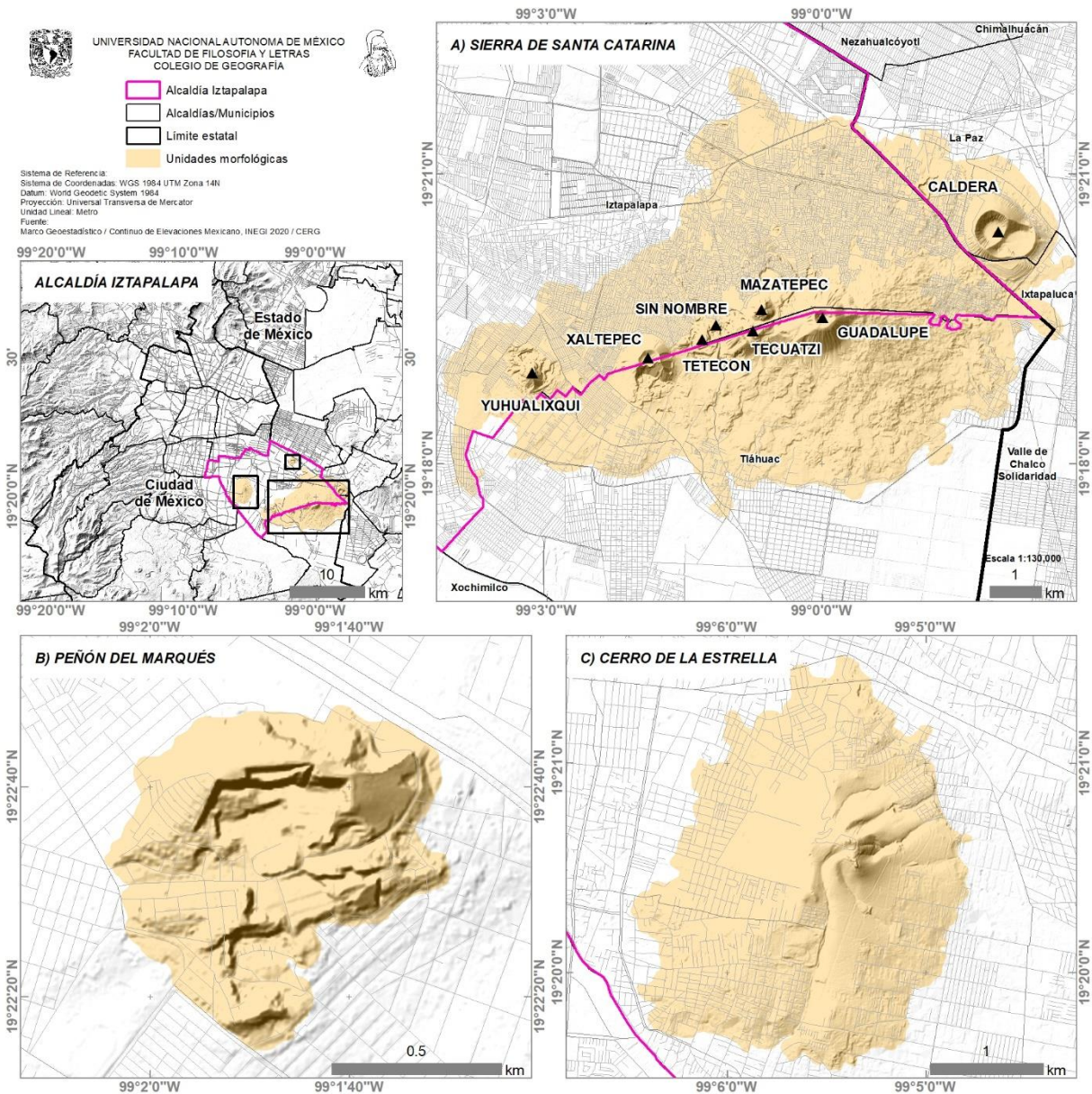


Figura 1.6 (A, B y C). Localización de la Alcaldía Iztapalapa y sus estructuras volcánicas (elaboración propia).

1.2 Unidades morfológicas

1.2.1 Sierra de Santa Catarina

La Sierra de Santa Catarina se encuentra compuesta por volcanes monogenéticos, conos de escoria volcánica, flujos de lava y rocas piroclásticas. Los siete conos volcánicos que la integran muestran una alineación general N 75-80° E. El más occidental (Cerro de San Nicolás) está ubicado sobre la misma falla inferida por gravimetría que el Cerro de Chimalhuacán. Los dos conos gemelos al oriente (Cerro de Santa Catarina) de esta misma sierra, están sobre otra falla inferida por gravimetría, de orientación N 45° E, que se dirige hacia Topilejo. La orientación N 75-80° E de los conos que integran la Sierra de Santa Catarina tienden a indicar que estos se formaron sobre una fractura de tensión que se desarrolló por la deformación rotacional producida por las fallas orientadas NE-SW, de desplazamiento horizontal siniestro (De Cserna, et al., 1988). (Figura 1.6-A).

La sierra tiene una extensión de 12 km de poniente a oriente, formando una franja hasta la planicie lacustre de 6 km de ancho, con alturas relativas de 60 a 310 m. Debido a los derrames de lava en sus laderas, la sierra es muy irregular y de suaves pendientes y no presenta rasgos importantes de modelado fluvial. Presenta relieve de origen endógeno y exógeno, el endógeno es de tipo volcánico acumulativo y el exógeno es de tipo erosivo acumulativo y antrópico (Lugo, et al., 1994).

De poniente a oriente se detallan los edificios volcánicos que conforman la Sierra de Santa Catarina, tomando como base a Lugo et. al. (1994) y Alcaldía Iztapalapa (2008) (ver figura 1.6):

- **Yuhualixqui o San Nicolás**

Cono volcánico que se encuentra al extremo poniente, de 150 m de altura aproximada, aislado del resto de conos que conforman la sierra, la mayor parte del cono se encuentra modificado derivado de la extensiva extracción de materiales para la construcción. Esta extracción ha descubierto la escoria de color rojo, característica de este tipo de volcanes. Sus derrames están casi en su totalidad cubiertos por materiales piroclásticos, de aproximadamente 15 m de grosor. El volcán se encuentra rodeado por un manto piroclástico, sobrepuesto a un derrame de lava, se presenta un modelado antrópico, como los corredores de escombros, paralelo a la ladera.

- **Xaltepec**

Es un cono volcánico de 220 m de altura, alargado ligeramente de N-S (con diámetros mayor y menor de aproximadamente 1250 y 1040 m, respectivamente), mayor que el Yuhualixqui, pero de la misma constitución, esto es, por escoria y lavas de composición máfica, que aparentemente cubren parcialmente el Yuhualixqui, aunque la relación no es clara. De igual manera se encuentra en un proceso de destrucción por la extracción de material para la construcción. En el borde del cráter (Sureste), se reconocen dos capas de ceniza, se infiere depósitos de erupciones, posiblemente del Guadalupe.

- **Tetecón**

Se conforma por dos conos de escoria, rocas piroclásticas y un flujo de lava que se observa hacia el norte. El cono principal (Tetecón 1) tiene 100 m de altura y una forma alargada en dirección

norte (los ejes mayor y menor de la elipse son aproximadamente 830 y 570 m). La Alcaldía Iztapalapa (2008) propone que el volcán tiene un colapso en forma de herradura con dirección NW, mientras que Lugo et al. (ibíd.), marca el cráter en forma de herradura, original del proceso de formación. El cono principal se encuentra parcialmente cubierto en su flanco norte por un cono secundario o cono adventicio (Tetecón 2) que generó una colada de lava hacia el norte, de igual manera el derrumbe y destrucción del flanco noroccidental, cubierto por piroclastos. Actualmente se encuentra destruido más del 50% de su volumen original.

- **Volcán Sin Nombre**

Tiene una altura de 200 m, constituido por flujos de lava y depósitos piroclásticos con derrames de lava colocados sobre los del Tetecón y el Mazatepec, con estructuras de flujo bien definidas. El flanco oriental se encuentra colapsado y cubierto por el volcán Mazatepec. Su forma original fue elongada en dirección NNW (eje mayor y menor de 1190 y 910 m respectivamente). Al igual que los volcanes mencionados con anterioridad, el sin nombre presenta las mismas características en cuanto a composición y tamaño lo cual sugiere que se formaron durante el mismo evento volcánico.

- **Mazatepec**

La morfología de este volcán presenta dos interpretaciones: la primera de la Alcaldía Iztapalapa en 2008, que lo describe como un domo circular, con un diámetro de 400 m, y alrededor de 50 m emplazado sobre la cima del cráter del volcán sin nombre; la segunda de Lugo et al. (ibíd.), que la define como un cono volcánico de pequeñas dimensiones, constituido por escoria y derrames de lava que surgieron por dos bocas, ubicadas al norte y sur; los de la boca meridional rodean al cono, lo que en apariencia provocó la ruptura del cráter. El límite de los derrames de lava se encuentran bien diferenciados sobre el terreno, en el fondo del cráter se encuentran dos domos con derrames dispuestos al sur. Muestra barrancos activos cuyas cabeceras avanzan hacia el cráter.

- **Tecuatzí o Tecuatzin**

Representa un domo de andesita de hiperstena (Ordoñez, 1985), con laderas empinadas, incluso verticales. Tiene un diámetro de 580 m y una altura de 170 m, sobre la cima del sin nombre. Sus derrames de lava se extienden al noroccidente y noreste para unirse a un cono volcánico y cubrir parcialmente los derrames del Mazatepec.

- **Volcán Guadalupe o Cerro Santa Catarina**

Es el cono volcánico de mayores dimensiones en la sierra, con un amplio cráter de 120 m de profundidad. En el fondo del cráter, presenta cuatro conos menores: dos conocidos y dos de menor tamaño. Está formado por flujos de lava y rocas piroclásticas de composición máfica. Su flanco oriental se encuentra cortado por una fisura que emitió lavas hacia el oriente y norte, las cuales rodean parcialmente el cráter doble La Caldera, por lo que son más jóvenes que este último. El cono del volcán se encuentra emplazado en antiguas lavas que se esparcen en la sierra. Los registros litológicos al norte del volcán muestran que las lavas se encuentran por debajo del Peñón del Marqués.

- **La Caldera**

Edificio volcánico formado por depósitos piroclásticos y dos cráteres, formados por proceso freático-magmático, que se encuentra rodeada parcialmente por las lavas del Guadalupe. El conjunto tiene una forma elíptica con orientación NW-SE y ejes mayores de 1600 y 1200 m, con una altura de 110 m. se encuentra formada por tobas pomosas.

1.2.2 Peñón del Marqués

De igual manera se le conoce como el cerro del Peñón Viejo, es un cono volcánico, conformado por escoria, rocas piroclásticas y lavas escasas. Se ubica, al igual que el Cerro de la Estrella y de Chimalhuacán, sobre la traza de dos fallas inferidas, de orientación N 50° E, asociadas con actividad reciente (De Cserna, et al., 1988). Comprende una superficie de 1,800 metros, de forma elíptica E-W y una altura de alrededor de 100 m.

Con respecto a las laderas que conforman al cono, se encuentran compuestos por rocas piroclásticas y tobas no consolidadas. Hacia el flanco norte del edificio volcánico se observan evidencias de un colapso sectorial con dirección hacia el norte (Alcaldía Iztapalapa, 2008). (Figura 1.6-B)

1.2.3 Cerro de la Estrella “Huizachtepetl”

Es un edificio volcánico compuesto por lavas máficas de edad plio-cuaternario, de tres kilómetros de diámetro ligeramente elongado hacia el norte y una elevación de 200 m sobre el valle lacustre (Figura 1.6-C). Como se mencionó con anterioridad, se encuentra sobre la traza de una falla inferida, con orientación N 50° E. En la parte más alta, el cerro presenta dos chimeneas de lava, estructuras que corresponden a sus antiguos cráteres. Se considera que es un levantamiento motivado por la actividad de gases subterráneos que no tuvieron suficiente fuerza para producir una erupción, dando lugar a una serie de cavernas dispuestas a través de las formaciones lávicas que lo constituyen (Montero, G.I.A., 2002).

Se encuentra formado por basalto, sobreyacentes a sedimentos del periodo Cuaternario que formaba el fondo de lo que era un solo lago. Parte de los sedimentos al contacto con la roca ígnea cambiaron su constitución física y actualmente revisten la superficie del Huizachtepetl en forma de toba. Los basaltos no se encuentran cubiertos en totalidad, en algunos sitios yacen en superficie, formando pequeños peñascos, indicando probablemente ruptura del terreno. Además de basalto, se compone de tobas, conglomerado de tobas de basalto y cenizas interestratificadas con arenas y gravas con diferentes grados de intemperismo.

La formación de cavernas en el Huizachtepetl pertenece, como se mencionó anteriormente por la actividad de gases al interior del edificio volcánico. Las cavernas según su origen se clasifican de la siguiente manera: basaltos escori-ceos (burbujas de vapor), basaltos lajeados, basaltos de bloque y por agentes erosivos.

1.2.4. Planicie lacustre

De manera similar, y en forma general a la cuenca, la planicie lacustre en la alcaldía se caracteriza por tener pendientes inferiores a los cuatro grados de inclinación y una superficie cuasi horizontal, presentando una altitud promedio de los 2,240 msnm. Se encuentra relleno de una secuencia compuesta por rocas volcánicas, piroclásticas y sedimentos. En la parte superior de

esta secuencia predominan los sedimentos de ambiente lacustre y en las zonas cercanas a los edificios volcánicos hay depósitos aluviales y de pendiente (Figura 1.7).

Los depósitos lacustres provienen principalmente de los ríos y escurrimientos que circundan la cuenca, los sedimentos se depositan a lo largo de la rivera, las gravas y arenas se depositan en riveras, tanto que los limos y arcillas alcanzan el centro del lago. De igual manera, contienen una porción y variedad de microfósiles (ostrácodos y diatomeas) que adicionan compuestos solubles generados por la alteración de sus esqueletos y que forman parte de la microestructura del suelo.

Estos depósitos lacustres se forman mediante procesos de erosión y transporte, seguido de depositación y consolidación bajo su propio peso. El comportamiento de los suelos lacustres depende principalmente de dos factores: de su composición, referido a la naturaleza de las partículas mismas (tamaño, forma y mineralogía); y de su estructura. Estas características y la integración con la fase líquida determinan la plasticidad, compresibilidad, resistencia y permeabilidad (Díaz - Rodríguez, 2006).

Sin embargo, los cambios litológicos que condicionan el contraste mecánico de los materiales limo-arcillosos se deben a los cambios en las condiciones de depósitos en el ambiente lacustre que predomina en la zona y a las variaciones del nivel del agua (Alcaldía Iztapalapa, 2008). Estas características propician la plasticidad e inestabilidad de estos limos-arcillosos.

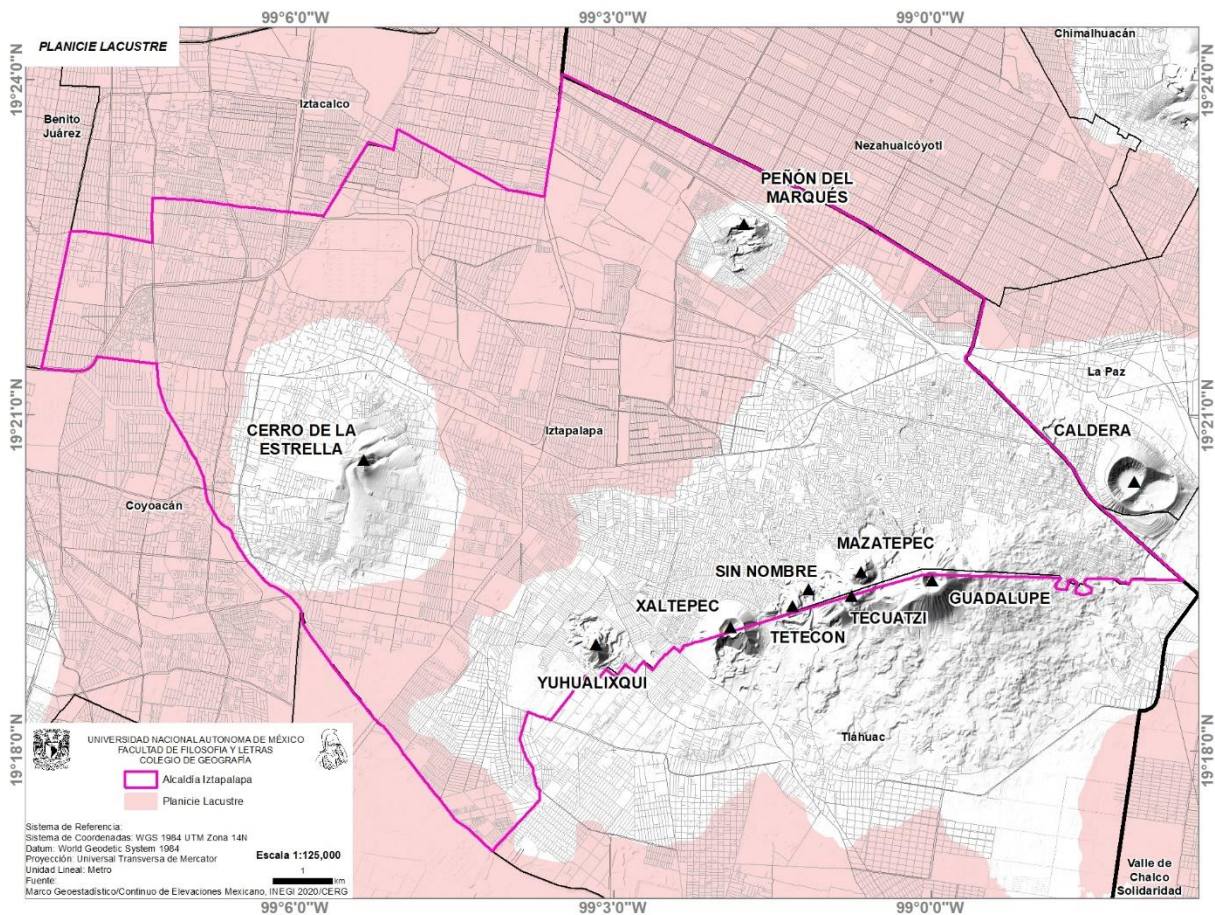


Figura 1.7. Zona lacustre en Iztapalapa (elaboración propia).

Capítulo 2. Breve historia del crecimiento urbano del siglo XX en la Alcaldía Iztapalapa

2.1 Crecimiento urbano a principios del Siglo XX. Primeros registros de hundimiento en la Ciudad de México

Los orígenes de la Ciudad de México se remontan a la fundación de México-Tenochtitlan, alrededor de 1325, con la llegada de los mexicas o aztecas (Tezozómoc, 1949). Se instalaron sobre la parte baja de la cuenca, a los 2,200 msnm, entre el lago de Texcoco y el lago de México, el primero de agua salada y el segundo de agua dulce, donde se situaba una isla (centro de México-Tenochtitlan) (Gutiérrez, et. al. 2002). Tanto esta última como el lago de México, se encontraban a un nivel más alto que el Texcoco, esto derivó en una albarrada¹ construida por Nezahualcóyotl, a petición de Moctezuma I, para impedir las inundaciones periódicas de la ciudad durante las lluvias y también la separación del agua dulce del lago de México y la salada del lago de Texcoco. De esta manera se inicia con la modificación del sistema hidráulico prehispánico (Gutiérrez, et. al., 2002.).

Con la llegada de los españoles, a partir del siglo XVII, se comenzaron a construir las grandes obras que desecaron el lago de la Cuenca de México: el tajo de Nochistongo, el Gran Canal, los túneles de Tequisquiac y el sistema de drenaje profundo. En 1915 el lago tenía 10 metros de profundidad en algunos sitios. En los periodos geológicos de mayor precipitación, según el Departamento del Distrito Federal, tomado de Santoyo et. al. (2005), los bordes del lago llegaron a tener 80 km del norte al sur y unos 45 km de oriente a poniente (Figura 2.1). Las islas más importantes eran Tenochtitlan, Tlatelolco, Nonoalco, Mixhuca y Tlalpan. Los cinco principales lagos de la cuenca eran: Texcoco, Zumpango, San Cristóbal, Xaltocan, Chalco y Xochimilco. Los ciclos de inundación y sequía los unían o separaban.

¹ Pared de piedra seca

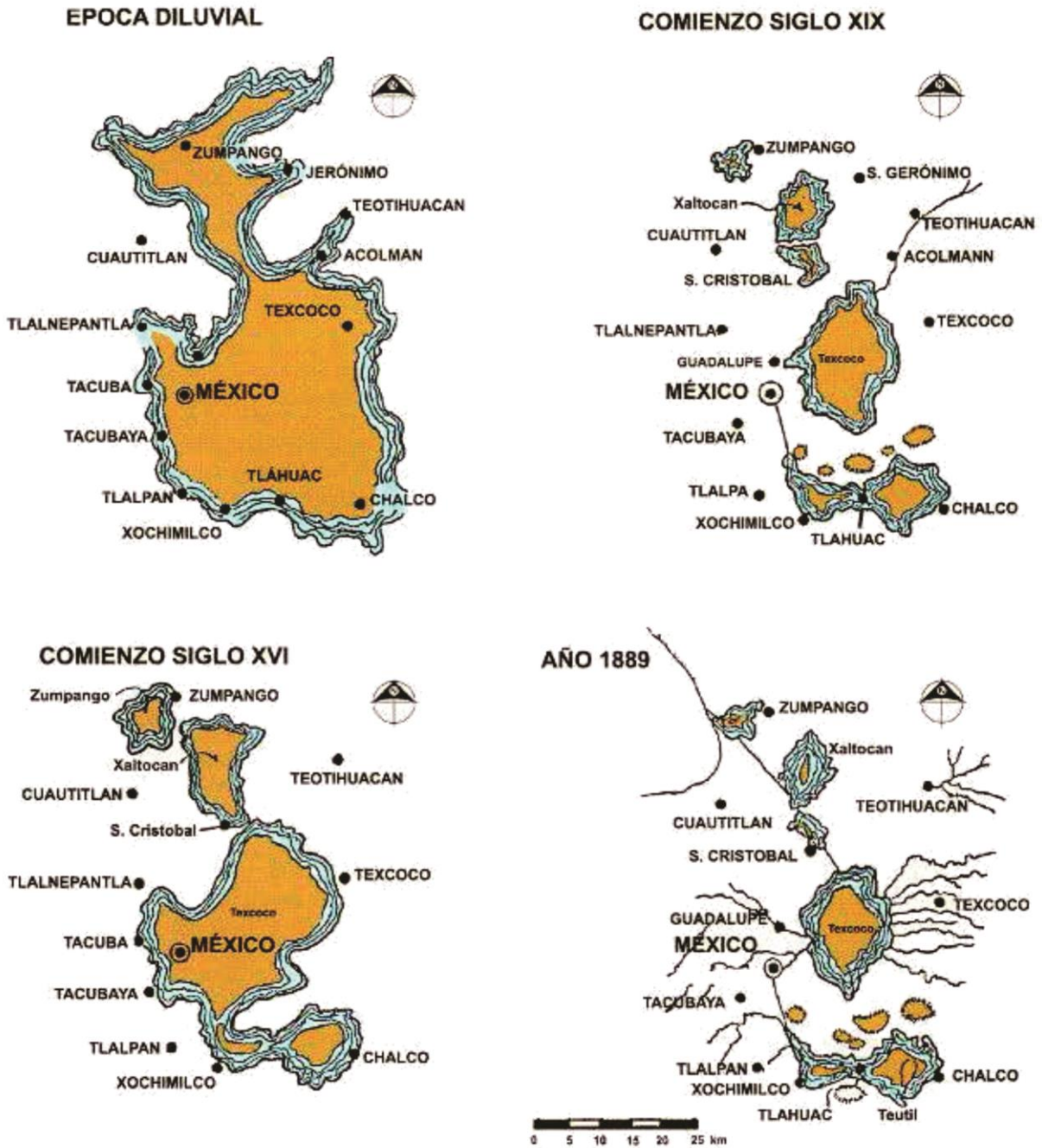


Figura 2.1. Evolución de los lagos y las islas en la Cuenca de México (modificado de Gutiérrez de MacGregor, et. al., 2010).

Antes y durante la época colonial, a pesar de todas las obras de drenaje que hasta el siglo XIX se construyeron, la navegación por canales fue un medio de transporte popular. Desde los muelles cercanos a la Merced, hasta los ubicados al este del zócalo, salían pequeños barcos de vapor hacia Xochimilco y Chalco (Sierra, 1984). El canal de la Viga, entre otros más, permanecieron activos durante buena parte del siglo pasado, y aún formaban una vía de traslado de productos entre Xochimilco y el centro, lo cual manifiesta la presencia de agua de manera superficial hasta hace algunas décadas.

El establecimiento y crecimiento urbano se dio a partir de la conquista, cuando la ciudad tenía una superficie de 1.9 km² en el año 1524, y contaba con una población de 30 mil habitantes (Gutiérrez de MacGregor, et. al., 2010). Su crecimiento espacial continuó hasta llegar al año 1900. A partir del núcleo central, se encontraba un pequeño crecimiento en la porción occidental, correspondiente a la Calzada México-Tacuba, se registró una población de 368 mil habitantes que ocupaban una superficie de 16.9 km², la cual como manifiesta Gutiérrez, et. al. (2010), se encontraba rodeado por un gran espacio rural.

El factor determinante durante finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, se debió al periodo de Porfirio Díaz, con la cual la revolución industrial se instaló en México. Tal revolución demandó servicios básicos, entre los cuales el acceso al agua fue uno de los primordiales, tanto para las industrias que se establecieron en la capital, como para uso doméstico. Al instalarse los ferrocarriles, se incrementó la migración hacia la cuenca, campesinos en busca de empleo en las nuevas fábricas, y varios poblados cercanos como Tacuba, Tacubaya y Azcapotzalco fueron absorbidos por el crecimiento urbano (Ezcurra, 2003).

Este proceso industrial al final de la revolución mexicana, marcó sobre todo una mejoría en el sistema de transporte público, lo que permitió una expansión en el área urbana. Esto último, impacto en las zonas agrícolas, ya que quedaron ocupados por calles y edificios, reduciendo así la recarga de los mantos acuíferos. Para los años 1934 y 1940 se estableció la reforma agraria como Secretaria de Gobierno, con esto miles de nuevos ejidos se crearon sobre las tierras repartidas. En la época de Lázaro Cárdenas, derivó su preocupación por la creación de parques nacionales, especialmente por la creación de parques en las montañas que rodean a la cuenca de México, y la creación de áreas verdes en el perímetro urbano. Fue así como se crearon los parques nacionales Desierto de los Leones y Cumbres del Ajusco, con esto se pretendía detener la deforestación, así mismo se pretendía que estos parques funcionarían como zonas de infiltración y recarga de mantos acuíferos(Ezcurra, 2003).

Al finalizar el gobierno de Cárdenas, se continuó con la política de proteger las sierras que forman parte de la cuenca. Sin embargo, en el sexenio de Miguel Alemán Valdés, de 1946-1952 parte del Parque Nacional Cumbres del Ajusco fue deforestado por las papeleras Loreto y Peña Pobre, aunque, estas últimas se comprometieron a reforestar los polígonos afectados, la tala inmoderada, fue suficiente para el crecimiento de la mancha urbana sobre estas zonas de gran importancia forestal.

En esos años se registró una importante mejora en las vialidades centrales, y al sur se descentralizaron las actividades urbanas, sobre Insurgentes y Calzada de Tlalpan, desarrollando así empresas, comercios e instituciones sobre la traza de estas dos avenidas(Gutiérrez de MacGregor, et. al., 2010).. De igual manera se gestaron colonias de clase alta al sur y oeste, como Polanco, Del Valle y Chapultepec-Morales. Por otro lado, la industria fungió como factor en la expansión urbana del norte de la cuenca, ya que la demanda de mano de obra atrajo trabajadores migratorios en las hoy alcaldías de Azcapotzalco y Gustavo A. Madero.

Derivado de este proceso de urbanización, durante el periodo de 1930 y 1950 se registró una tasa de crecimiento anual de 5.8%, la más alta del siglo XX (Ezcurra, 2006). El incesante crecimiento de la industria en las periferias de la ciudad generó una expansión importante de la urbe, permaneciendo dentro de los límites del Distrito Federal. Para el año de 1950 la ciudad comprendía 3.4 millones de habitantes. Sin embargo, en la zona oriente no se registró un aumento

importante de su población, principalmente en los pueblos originarios de Iztapalapa, que mantuvieron hasta la primera mitad del siglo XX su número de habitantes (Figura 2.2). Cabe destacar, al oriente de Iztapalapa lo que hoy es municipio de Nezahualcóyotl, formaba parte de los remanentes del lago de Texcoco, lo cual se puede apreciar en la parte superior izquierda de la figura 2.2, indicando hasta el año de 1943 aún cuerpos de agua significativos.

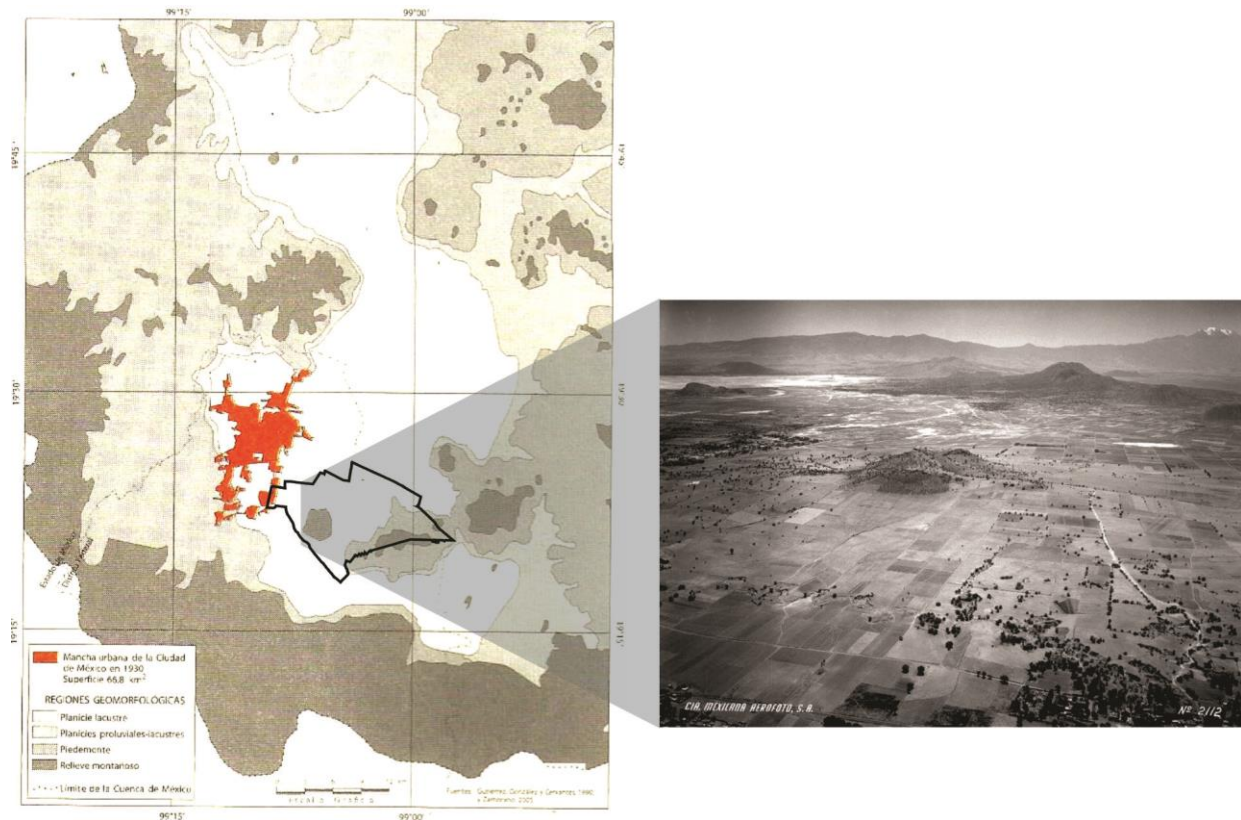


Figura 2.2. *Izquierda.* Mapa del límite de la mancha urbana para el año 1930. El recuadro marca la orientación de la fotografía (modificado de Gutiérrez de MacGregor, et. al., 2005). *Derecha.* Fotografía oblicua de la Alcaldía Iztapalapa al centro se observa el Cerro de la Estrella (Compañía Mexicana de Aerofoto, S.A. de C.V., Derechos de autor Fundación ICA A.C., Fecha de la imagen 1943)

Por su parte, y antecedendo el crecimiento urbano de inicio de siglo, la extracción de agua del acuífero subyacente a las arcillas se inició en 1847, Pane y Molteni abrieron los primeros pozos de hasta 105 m de profundidad (Tellez Pizarro, 1899, tomado de Santoyo, et. al. 2005), hacia 1857 habían 168 pozos, para 1870 funcionaban 1,000 pozos, cabe señalar que hasta ese año los pozos operaban de manera artesanal, lo cual hacía subir el agua hasta el segundo nivel de las casas. Al agotarse el artesianismo se comenzó el bombeo para extraer el agua. Desde ese entonces se inició el dramático problema del hundimiento regional, originado por la pérdida de la presión del agua intersticial (Santoyo, 2005).

Para finales del siglo XIX ya se tenían los primeros registros sobre hundimientos en el centro de la ciudad, las nivelaciones realizadas de 1891 a 1895 marcan 5 centímetros por año. Hacia el año 1925, según Lesser (1998), algunos ingenieros sostenían la teoría de que el lago de Texcoco se estaba azolvando. Para el periodo de 1936-1944, se perforaron los primeros 93 pozos profundos que provocaron hundimientos en el centro de hasta 18 centímetros por año. (Lesser, 1998).

Durante el año de 1965, como lo marca Gutiérrez de MacGregor, et. al., 2010, el hundimiento de la Ciudad de México logró que la ciudad quedara por debajo del nivel del lago de Texcoco, lo cual marcó un peligro tanto para las potenciales inundaciones, como el gran canal de desagüe que quedó por debajo de ese nivel, por lo que era necesario bombear las aguas negras para sacarlas por el túnel de Tequixquiac. (Figura 2.3).

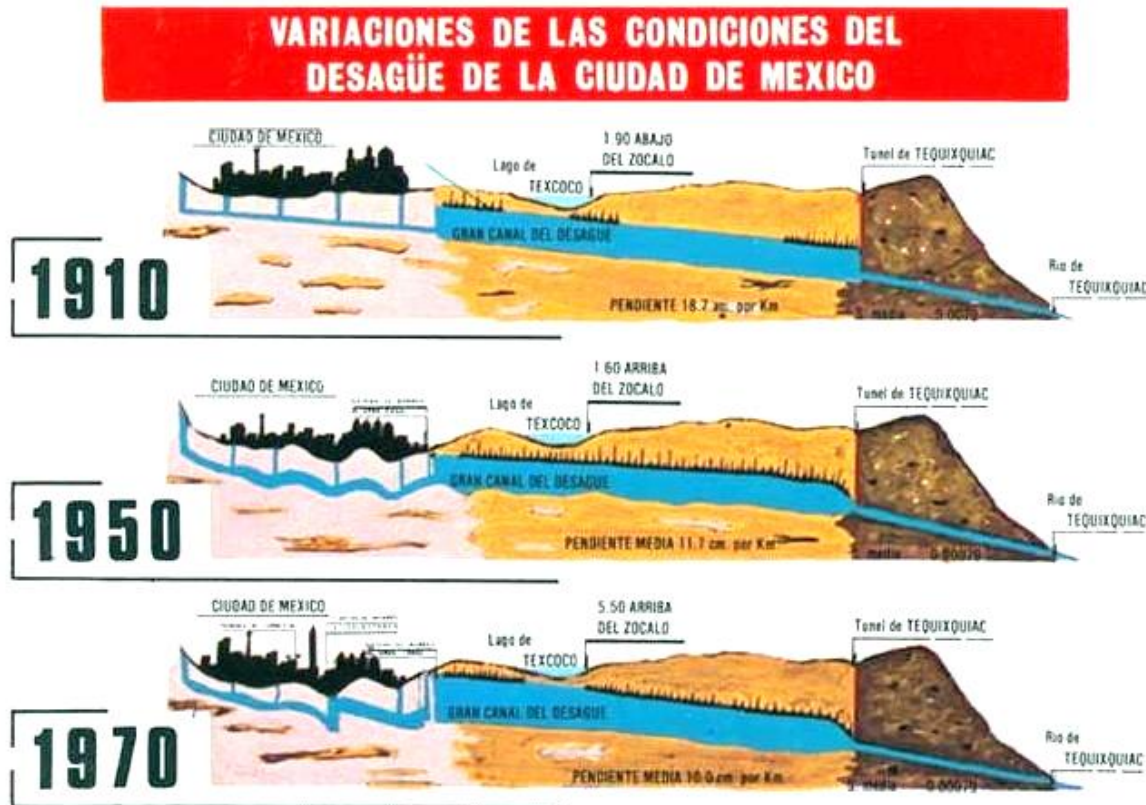


Figura 2.3. Variaciones en las condiciones del desagüe en la ciudad, de acuerdo a los hundimientos que ha sufrido la misma. (Modificado del Departamento del Distrito Federal, 1975)

El hundimiento que se presentó a finales del siglo XIX y principios del siglo XX es evidencia de la influencia que la población tiene sobre la necesidad de obtención de agua. Este fenómeno no es exclusivo de la Ciudad de México ya que se presenta en la actualidad en ciudades como Puebla, Toluca, Querétaro, San Luis Potosí, Aguascalientes, Morelia, el bajío (Celaya, Salamanca, Irapuato, León, Silao), Zamora, Guadalajara y Tepic. Este proceso de obtención de agua ya sea para el uso agrícola como en la región del bajío principalmente, o para consumo humano como en las grandes ciudades.

2.2 Crecimiento urbano e industrial en la segunda mitad del siglo XX. Inicio de hundimiento al oriente de la ciudad

Al llegar la segunda mitad del siglo XX, se acentuó el crecimiento urbano de la ciudad. Entre los años 1930 y 1960, la superficie ocupada pasó de 66.8 a 383.8 km² y la población llegó a los 5.1 millones de habitantes (Gutiérrez de MacGregor, et. al., 2010). La enorme expansión física se dio en forma de zonas industriales más allá del norte y noreste del Distrito Federal, lo que hoy es

Vallejo. La zona urbana empezó a invadir los municipios del Estado de México, que tenían tasas de crecimiento anual del doble que del Distrito Federal.

Tanto el segundo cuadro del centro de la ciudad, como los barrios y colonias vecinas formaron parte de la zona urbana. Para Gutiérrez de MacGregor (2010), la periferia de la ciudad se extendió de manera tentacular, derivado de la expansión rápida de la periferia a lo largo de las principales vías de comunicación, en la parte noreste, sobre la carretera a Pachuca, al noroeste sobre la carretera a Querétaro, al sureste sobre la carretera de Cuernavaca, este de manera muy irregular.

Al oriente, el crecimiento urbano se gestó en dos vertientes, el primero se desarrolló del centro al oriente de la ciudad a lo largo de la carretera a Puebla, sobre lo que antes ocupaba el lago de Texcoco, donde hoy se encuentran las alcaldías de Iztacalco e Iztapalapa en su parte norte, incorporando a la mancha urbana los pueblos de estos últimos. La segunda vertiente del crecimiento urbano se dio sobre la Calzada Ermita Iztapalapa (donde fue mayor el crecimiento), Canal Nacional y Av. Tláhuac. Esto adiciona los pueblos de Culhuacán al poniente del Cerro de la Estrella y los 8 barrios de Iztapalapa al norte del cerro en la dinámica urbana (Figura 2.4). Ciudades periféricas como Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco fueron incorporadas a la megalópolis (Ezcurra, 2006). Se realizó la construcción del drenaje profundo para minimizar las inundaciones, con ello se secaron casi todos los antiguos lechos del lago.

Las clases medias y altas se establecieron en los suburbios del noroeste, entre ellos ciudad satélite, inaugurado en 1957. Por otra parte, las clases sociales bajas fueron segregados a tierras secas y salinos del lecho del lago de Texcoco, los cuales carecían de todo servicio básico, expuestos a inundaciones y tolveneras. El flujo de migrantes, como lo menciona Ezcurra (2006), cada vez mayor, provocó la proliferación de asentamientos, de subdivisiones ilegales de la tierra. El ejemplo más claro es Nezahualcóyotl que aumentó su población de 65 mil en 1960 a 650 mil en 1970. La gran expansión física que sufrió la ciudad se reflejó en su superficie, que pasó de 380 km² en 1960 a 600 km² en 1970 y casi a 1 000 km² en 1980.

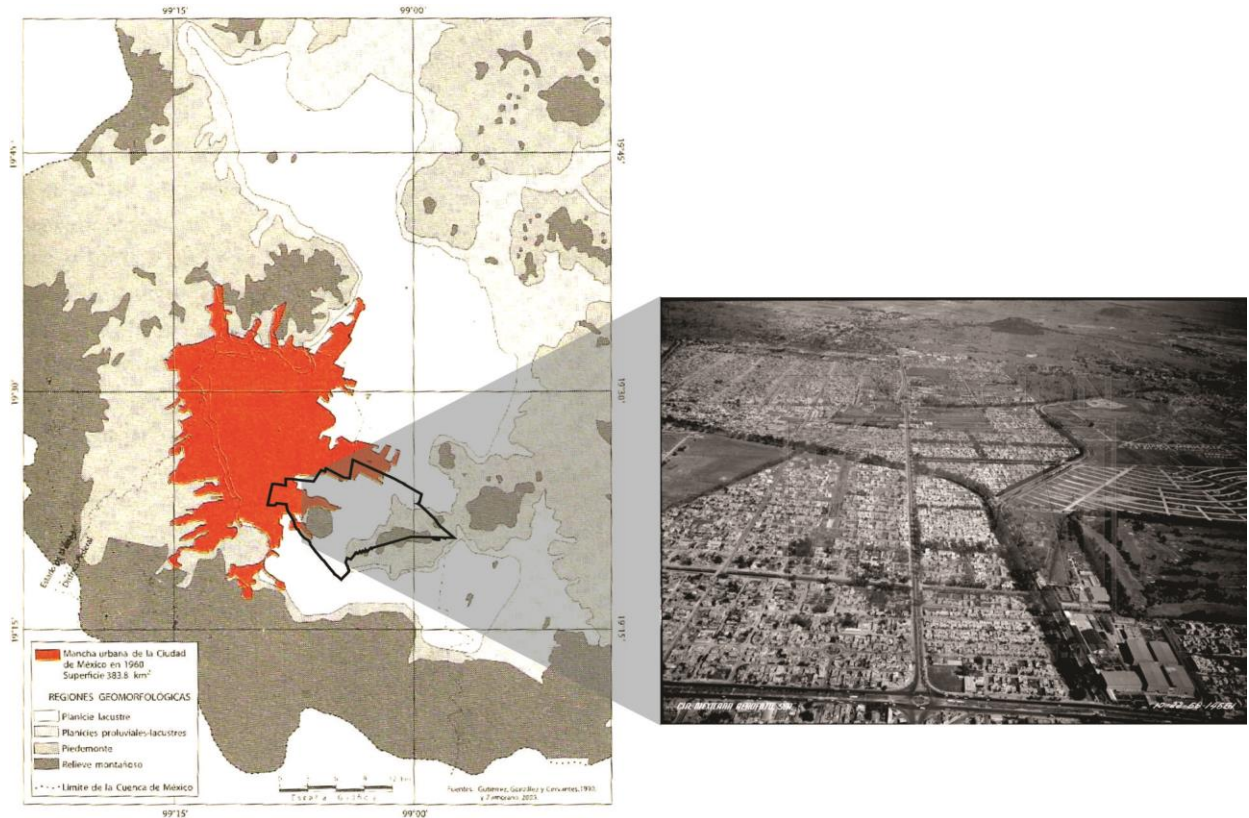


Figura 2.4. *Izquierda.* Mapa del límite de la mancha urbana para el año 1960. El recuadro marca la orientación de la fotografía (modificado de Gutiérrez de MacGregor, et. al., 2005). *Derecha.* Fotografía oblicua, al centro la calz. Ermita Iztapalapa, paralelo Río Churubusco y a la derecha el club campestre de la Ciudad de México (Compañía Mexicana de Aerofoto, S.A. de C.V., Derechos de autor Fundación ICA A.C., Fecha de la imagen 1943).

El aumento en las viviendas y la industria, ocasionó el aumento en la red de abastecimiento de agua. Esto generó la perforación de una mayor cantidad de pozos de agua en el centro y las periferias de la ciudad. Para el periodo de 1947-1996 se registraron velocidades de hundimiento de 40 cm o mayores por año al inicio de la etapa y que disminuyeron hasta llegar a los 10 cm anuales (Lesser, et. al., 1998). El impacto de la extracción de agua se aceleró y en esta época el centro sufrió la mayor deformación. En los años de 1942-43 el Ing. Nabor Carrillo ya había identificado y advertido a las autoridades de las consecuencias de la extracción de agua por lo que prohibió extraer agua del centro de la ciudad (Figura 2.5).

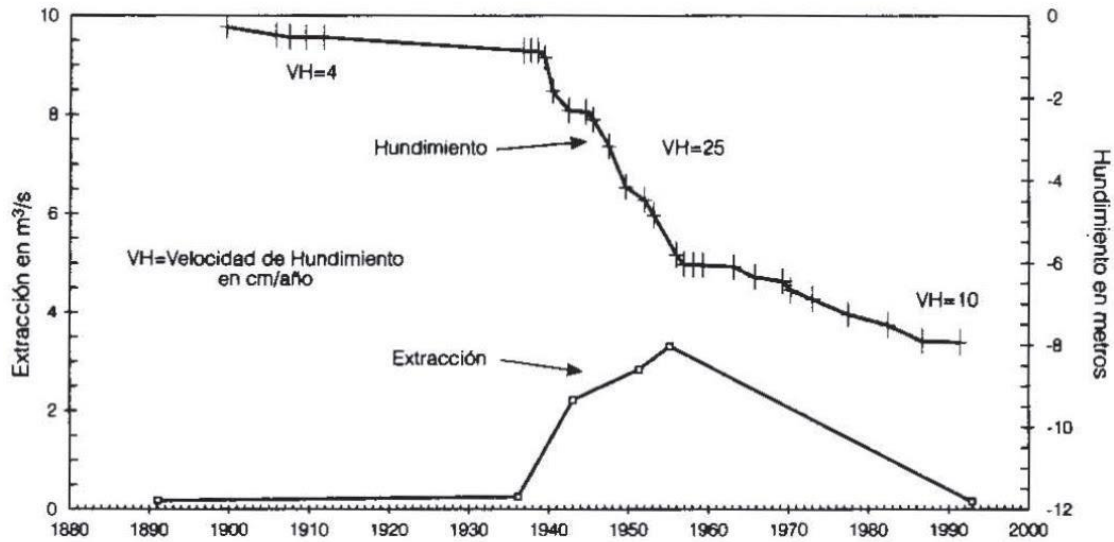


Figura 2.5. Extracción de agua y hundimiento en el centro de la ciudad durante el siglo XX, donde se observan los mayores niveles de hundimiento en las décadas 1940 y 1950, a partir de la década de 1960 disminuyó la extracción, trayendo una notable disminución en el hundimiento (Lesser, 1998).

Hasta el año de 1960 se marcó un parteaguas en la disminución y restricción de la extracción de agua en el centro de la ciudad, y así mismo, el inicio de la explotación del acuífero sur (Xochimilco-Chalco). Este cambio de extracción en el centro no erradicó el problema de hundimiento, marcó una reducción, lo que significó una baja considerable a partir de 1960 hasta 1990 (Alcaldía Iztapalapa, 2008). Por otra parte inició la problemática del hundimiento de la zona sur-oriental de la ciudad generando problemas que hasta la actualidad se mantienen, ya que ha funcionado como el principal abastecedor de agua de la zona más poblada de la ciudad (Figura 2.6).

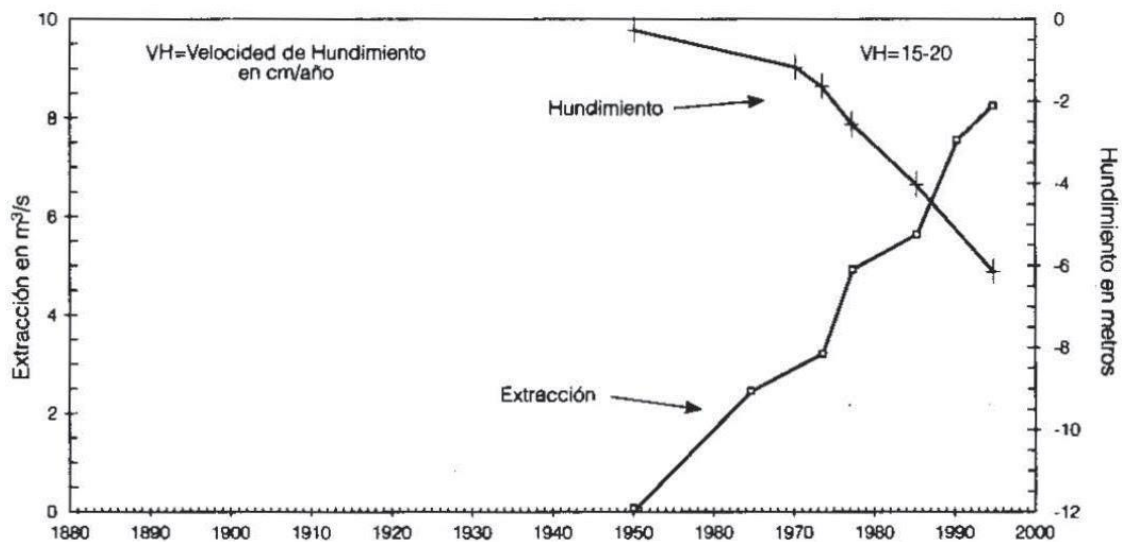


Figura 2.6. Extracción de agua y hundimientos en la zona sur del D.F. (Xochimilco-Chalco), teniendo como inicio la década de 1950 y 1960, teniendo una aceleración del proceso en la década de 1970 sin que se marque hasta el 2000 una disminución.(Lesser, 1998)

En Iztapalapa se tiene conocimiento desde la década de los sesentas del problema de hundimiento. A pesar de no contar con la información puntual, en 1957, se operan los primeros pozos, con bombeo de 0.5 m³/s en los alrededores del Peñón del Marqués, las primeras fracturas se formaron a inicios de 1960 y fueron observadas en el flanco suroeste (Del Castillo-Muris, 1978, tomado de Alcaldía Iztapalapa, 2008).

La deformación también se comenzó a presentar en otras zonas de Iztapalapa en tiempos más recientes. Se tienen reportes sobre agrietamiento en el fraccionamiento los Olivos realizados por Garay (1975), en la Alcaldía Tláhuac, esto es en las cercanías del volcán San Nicolás, en la zona de San Lorenzo. Para 1998, Lugo identificó zonas de hundimiento en los límites de Tláhuac e Iztapalapa, actualmente en las colonias Del Mar, La Turba y La Planta.

2.3 La escasez de agua potable en la Ciudad de México

2.3.1 Formas de obtención y abastecimiento de agua potable

La extracción del agua en la Cuenca de México, comenzó de forma intensiva en el siglo XIX, aunque se conoce en tiempo prehispánicos, los aztecas utilizaban el agua de pozos artesianos, y eran autosuficientes en el uso del agua (Ezcurra, 2006), posteriormente se intensificó la demanda a causa de la urbanización. La extracción de agua subterránea comenzó en 1847, y se extendió hasta 1950 y 1960 proporcionando suficiente agua para los habitantes de la ciudad hasta el año de 1965. Desde entonces se necesita extraer agua de cuencas aledañas para abastecer la demanda actual: la de Lerma en el Estado de México, la de Cutzamala en los estados de México, Michoacán y Guerrero, entre otras (Ezcurra, 2006).

Actualmente la Ciudad de México obtiene el agua a través de pozos de extracción, cauces y manantiales, sistemas hidráulicos como Lerma-Cutzamala (información del SACMEX proporcionado por la Dirección General de Servicios Urbanos de la Alcaldía Iztapalapa (DGSU) en el año 2014. En cuanto a la distribución del agua en Iztapalapa, en una tercera parte del territorio se realiza por medio de pipas. Como lo manifiesta la DGSU de la Alcaldía Iztapalapa, el total de agua es de 32.5 m³/s, de los cuales 13.7m³/s proviene de los pozos, 9.5 m³/s del sistema Cutzamala, 3.8 m³/s del Lerma y los restantes 5 m³/s de otras cuencas y sistemas (figura 2.7).

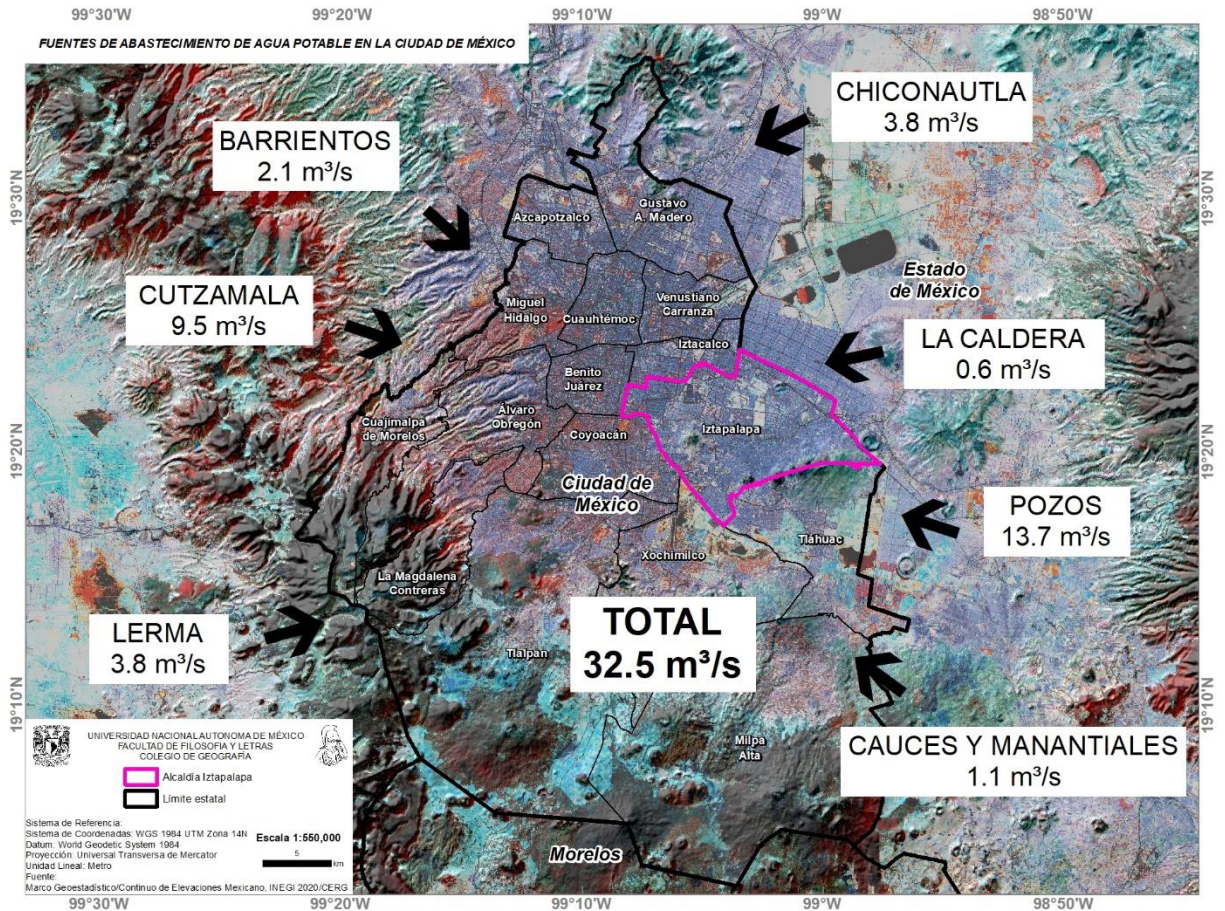


Figura 2.7. Fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México (elaboración propia con datos de la DGSU, 2014).

Sin embargo, el modelo de gestión hídrica adoptado es insostenible, basado en su dependencia de fuentes externas y el aprovechamiento intensivo de sus mantos freáticos. Por ejemplo, la cuenca de Lerma alimentaba al lago de Chapala, el mayor cuerpo de agua dulce del país, así como zonas agrícolas importantes durante todo su cauce. Los niveles del lago de Chapala han descendido en por lo menos 5 metros, en parte atribuible a la exportación de agua para la Ciudad de México. Por otro lado el agua superficial en la parte superior de la cuenca del Cutzamala se utilizaba en otro tiempo para la generación hidroeléctrica, así como para riego agrícola, actividades que han cambiado como resultado de la transferencia de agua a la cuenca de México (Ezcurra, 2006).

A pesar de las políticas de las últimas administraciones en el Distrito Federal y Zona Conurbada para contener el avance de la mancha urbana, y proteger las áreas para la recarga del acuífero, su balance sigue siendo negativo (Figura 2.8), ya que la recarga total es de 11.2m³/s, esto por medio de la recarga natural, fugas, recarga inducida e infiltración. Por otra parte la extracción es de 18.1 m³/s, ya sea para su uso doméstico y no doméstico, pozos particulares y zonas agrícolas. Esto es, que se extraen 6.9m³/s más de lo que se recarga.

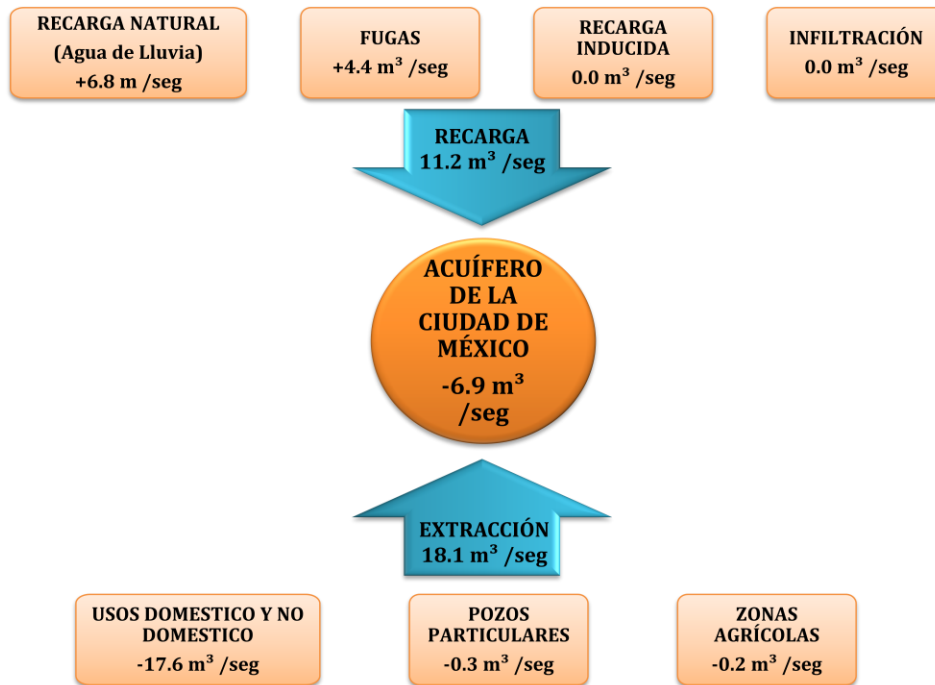


Figura 2.8. Balance entre la recarga y extracción de agua. (DGSU, 2014).

Para la Alcaldía Iztapalapa, el modelo de gestión hídrica se replica. Mediante tanques de regulación que reciben el agua de las distintas fuentes que abastecen a la ciudad, como de su batería de pozos. El caudal que se estima por las fuentes externas es de 3,700 l/s. Por medio de los 78 pozos de extracción que se encuentran en toda la alcaldía se realiza un aporte de 2,300 l/s. De estos, 9 se localizan en las zonas bajas aledañas al Peñón del Marqués, los cuales tienen aproximadamente 50 años de servicio, 30 pozos que se encuentran en otros puntos tienen alrededor de 10 años (DGSU, Alcaldía Iztapalapa, 2014).

Los tanques de regulación y los acueductos son otra parte de importancia en el abastecimiento y distribución de agua. El tanque Cerro de la Estrella tiene una influencia de 59.7 km², seguido por los pozos de extracción con 27.3 km², la Caldera por su parte, tiene una influencia de 13 km², y finalmente los acueductos y el tanque Xaltepec con 4.8 km² y 4.3 km² respectivamente (Figura 2.9).

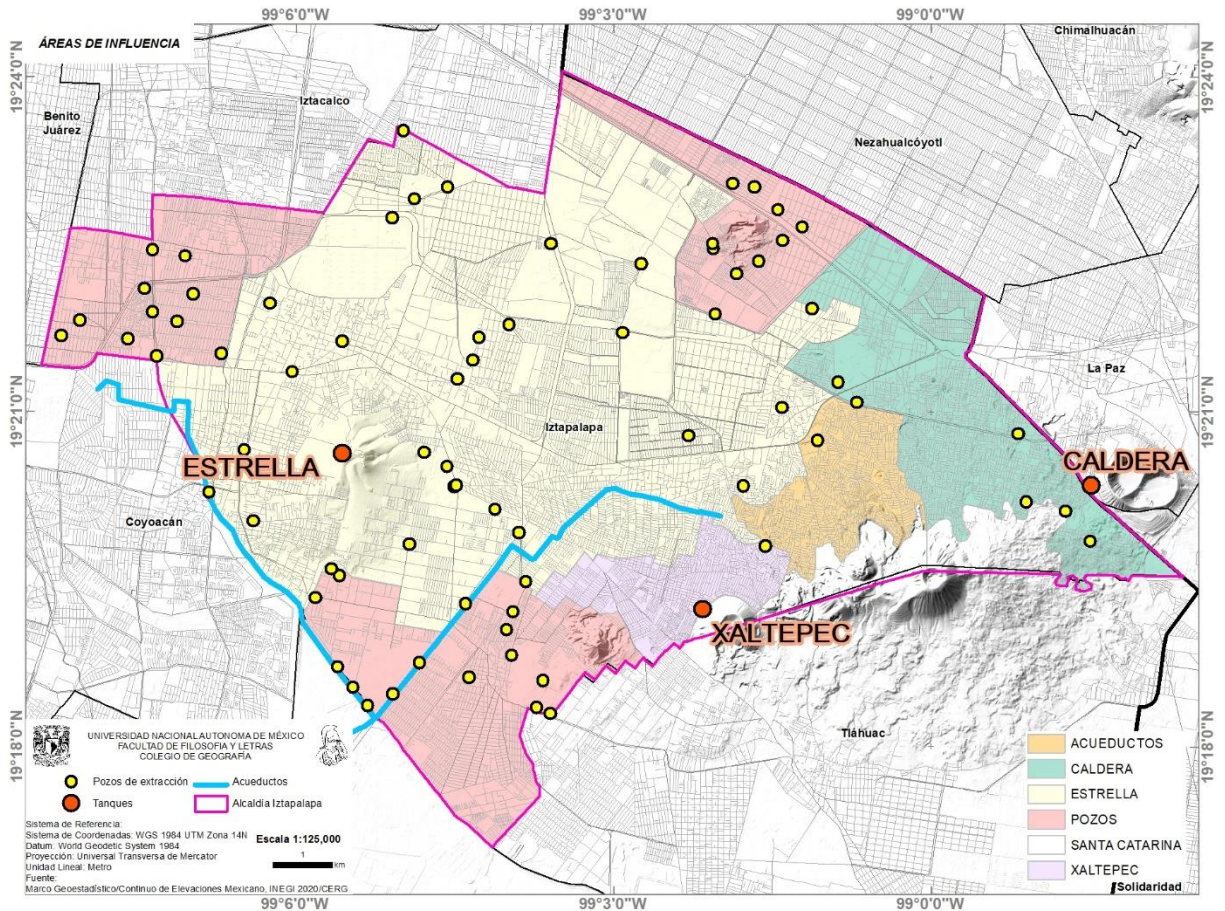


Figura 2.9. Área de influencia de las distintas fuentes de obtención y abastecimiento de agua (elaboración propia con datos de la DGSU, 2014).

Sin embargo, actualmente la reducción de caudales y la pérdida de la presión hidrostática, han sido un factor para la escasez de agua en Iztapalapa, ya que durante los últimos 10 años se ha observado una disminución del caudal proveniente de fuentes externas. El caudal teórico estimado es de 6,000 litros por segundo, en contraparte, las mediciones realizadas por la Dirección General de Servicios Urbanos de la Alcaldía Iztapalapa, infieren que el caudal real es de 5,244 L/s. Esto presupone un déficit de 717 L/s, lo que representa un 13% menos de agua necesaria para abastecer adecuadamente a la población.

Esta disminución se refleja principalmente en los tanques de regulación y el aumento del tandeo en colonias, y la distribución por medio de pipas. En cuanto a disminución, el tanque Estrella, el más importante en cuanto a área de influencia, en los últimos 12 años disminuyó un 19%, ya que su presión mínima requerida es de 2.4 km/cm³, y en el periodo de 2001-2011 solo en dos años llegó a de 2 km/cm³. El tanque la Caldera, presenta actualmente una disminución del 24%, ya que su gasto requerido es de 700 L/s y para el periodo de 2006-2011 presenta en promedio 500 L/s. Finalmente el tanque Xaltepec presenta un déficit histórico de 19%, ya que de los 8m de tirante requerido, presenta 6.5m para el 2012 (DGSU, Alcaldía Iztapalapa, 2014).

En los últimos años, según informes de DGSU de la Alcaldía Iztapalapa, se ha mejorado y realizado la sustitución de tuberías, sin embargo aún se pierde cerca del 23% del agua por fugas. Esto debido a la obsolescencia de la red y por hundimientos diferenciales que generan ruptura en las redes de suministro. Principalmente el problema se presenta en la tubería de ½” que se refiere a cerca de 376,000 tomas domiciliarias. Se presenta con mayor frecuencia en la zona de Peñón del Marqués - Santa Martha Acatitla y en Aculco, el primero por la deformación del suelo y el segundo por la obsolescencia de la red principalmente.

2.3.2 La calidad del agua potable

Aunado a la problemática de obtención, abastecimiento y distribución de agua en la Ciudad de México y en Iztapalapa, la calidad del agua es otro factor que se ha deteriorado con los años. En Iztapalapa de los 78 pozos mencionados en el punto pasado, 28 requieren de planta potabilizadora, 25 presentan problemas de calidad y 4 no se han conectado a la red por mala calidad. El problema de la calidad del agua se presenta tanto en los sistemas subterráneos como en la superficie y la atmósfera (DGSU, 2014).

La contaminación del aire por microorganismos de origen fecal, producida tanto por el fecalismo que aún existe en la ciudad, como por las aguas negras del fondo del valle, sigue siendo una fuente potencial de infecciones. La concentración de bacterias fecales en el agua de lluvia de la ciudad es de 100 a 150 microorganismos por litro (Soms - García, 1986). Dos puntos importantes para tomar en cuenta: La contaminación por residuos orgánicos, industriales o domésticos es más alta en aguas superficiales, dado el proceso lento de filtración durante su percolación hacia horizontes profundos del suelo, con ello las aguas profundas son menos turbias y tienen cantidades más bajas de microorganismos en suspensión. Por la obscuridad no muestra crecimiento de algas.

El segundo punto importante sobre la calidad del agua, es sobre las aguas subterráneas y su proceso de potabilización. Como lo menciona Ezcurra (2006), En algunas ocasiones la cantidad de minerales presentes en el subsuelo, es mayor que en la superficie, entre ellos algunos tóxicos como los óxidos de manganeso, el amonio y los nitratos. También se pueden ver afectadas por los líquidos que se percolan de basureros, zanjas de rellenos sanitarios (lixiviados), o los líquidos del drenaje local e industrial que se pueden filtrar en profundidad. Por ello es importante la potabilización en algunos casos de las agua subterráneas antes de su distribución final como agua potable.

2.4 La Alcaldía Iztapalapa en la actualidad: la problemática de subsidencia y fracturamiento

Como se mencionó con anterioridad (punto 2.2.), el inicio de la extracción del acuífero sur-oriente (Xochimilco-Chalco) en los años 1960, fue el detonante para el aumento de la subsidencia en esta zona. Iztapalapa al estar ubicado sobre los remanentes de los antiguos lagos, ha sufrido un cambio en superficie con respecto a su topografía de décadas anteriores. Esto ha sido factor de la actual problemática de subsidencia, deformación diferencial, lo que origina el fracturamiento en superficie.

La subsidencia que se registra en la alcaldía no es homogénea y se encuentra influenciada por los edificios volcánicos y los depósitos volcánicos derivados de estos. Sin embargo, las mayores zonas de este proceso no se encuentran en la demarcación, Cabral-Cano (2008) y López-Quiroz

(2009) reportan entre 39 cm/año en el Municipio de Nezahualcóyotl; para Iztapalapa se registran desde 0 cm/año, hasta alrededor de 30 cm/año, por lo cual no es posible establecer una relación directa entre la cantidad de agua que se extrae en el subsuelo con el hundimiento del terreno, esto derivado por la heterogeneidad del medio geológico, como por las cargas dinámicas y estáticas presentes.

Así mismo, el patrón de subsidencia está relacionado de manera cercana con la distribución de las secuencias lacustres. Aunque la mayoría de los hundimientos se presentan en la parte lacustre de la Cuenca de México, existen también hundimientos de menor escala en las zonas de transición, donde se presentan secuencias piroclásticas, de diversa génesis y composición, así como en los flancos de la Sierra de Santa Catarina. Esto puntualiza lo mencionado anteriormente sobre la dinámica de la subsidencia (Figura 2.10).

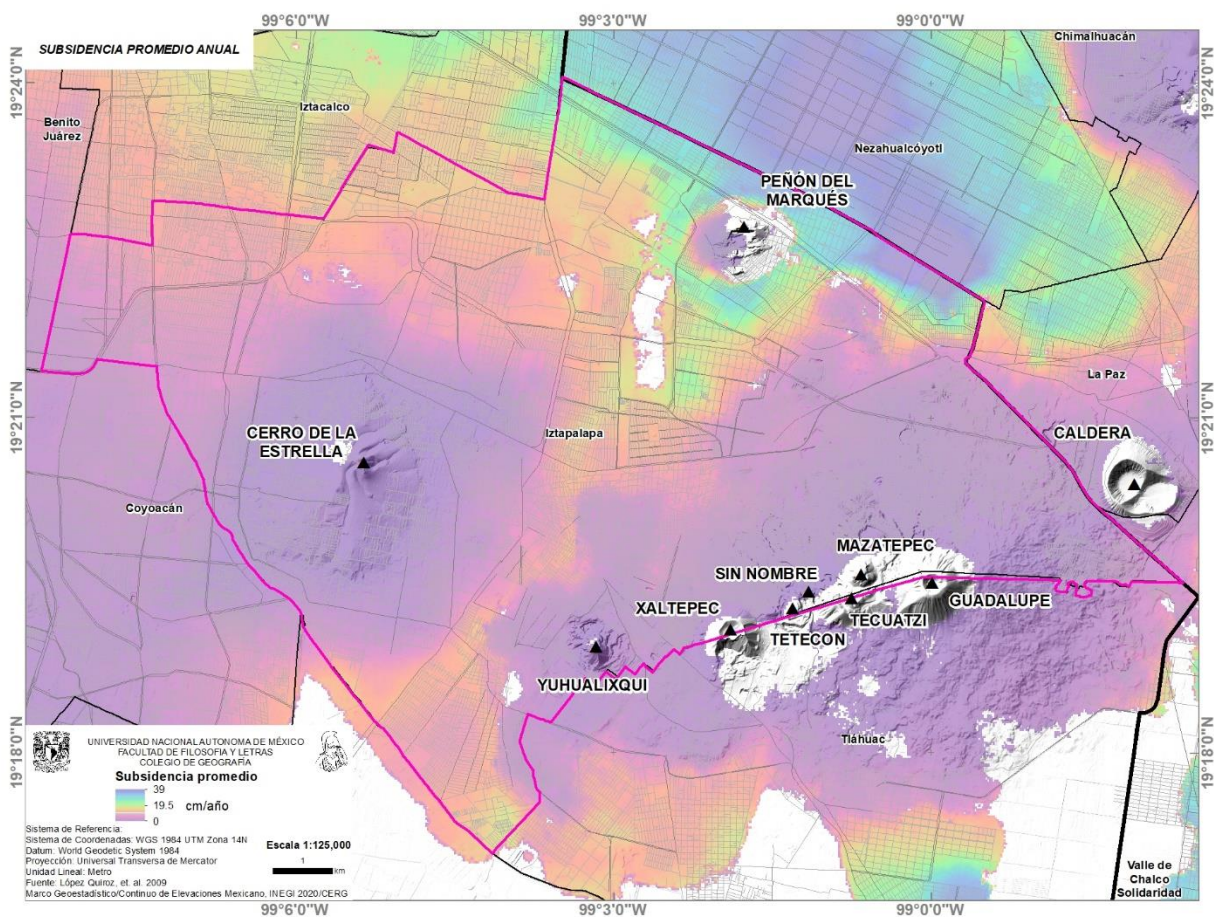


Figura 2.10. Subsidencia promedio anual registrada para el periodo 2002-2007 (elaboración propia con datos de López Quiroz, et. al., 2009).

En la figura 2.10 se destaca la variación en la magnitud del hundimiento, siendo los municipios y las alcaldías del oriente de la ciudad en los que se presenta en mayor medida el fenómeno. Para el caso de Iztapalapa, como lo muestra López-Quiroz (2009), para el periodo 2002 - 2007, las zonas de mayor contraste se encuentran en la zona noreste, cubriendo los alrededores del Peñón del

Marqués; el corredor de sur-noreste de la Sierra de Santa Catarina; en menor medida el suroeste y noroeste de la demarcación correspondientes al Cerro de la Estrella.

La subsidencia se puede observar de manera indirecta por medio de la emersión aparente. Este fenómeno se origina en edificaciones o cualquier elemento de equipamiento y/o infraestructura que se desplanta sobre un estrato con mayor dureza que el resto de los estratos subyacentes. Para el caso de la Ciudad de México si un edificio se cimenta o se le añaden pilotes en la primera capa dura, pasado el tiempo y por el hundimiento regional, estas edificaciones exhiben una "emersión aparente" respecto a la superficie del terreno aledaño, trayendo consigo afectaciones a las instalaciones de los edificios, e instalaciones circundantes.

El fenómeno de emersión aparente se presenta con un mayor desarrollo en la zona centro de la ciudad, en edificios que cuenten con alguna modificación en su cimentación. En Iztapalapa se puede llegar a observar en edificaciones de varios niveles, sobre todo en los que presentan un mejoramiento de sus cimentaciones (figura 2.11). Otro tipo de cimentaciones o "cajones de cimentación" que pueden llegar a registrar la emersión son los que se encuentran en las columnas de los puentes vehiculares. La principal afectación es al tránsito vehicular, ya que los escalonamientos complican la circulación (figura 2.12 y 2.13).

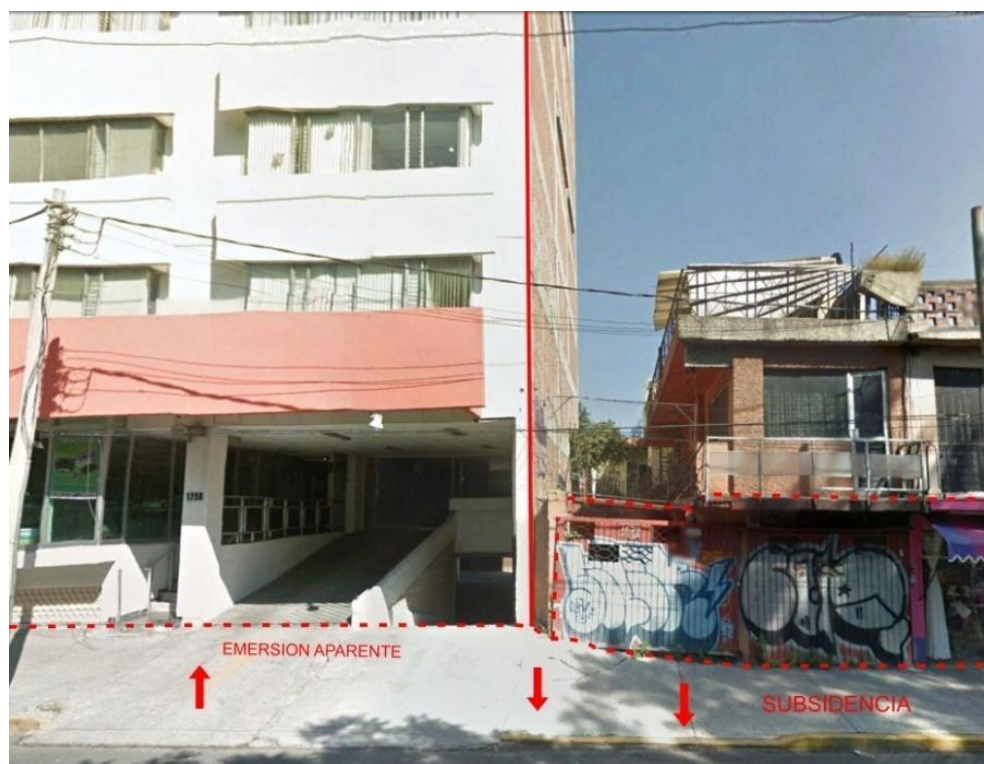


Figura 2.11. Emersión aparente de edificio (izquierda) y afectación en la vivienda aledaña (derecha), sobre calzada de la Viga, en la colonia Héroes de Churubusco.



Figura 2.12. Emersión aparente de cajones de cimentación del puente vehicular de la calzada Ermita Iztapalapa sobre la avenida Eje 3 Oriente.



Figura 2.13. Emersión aparente de cajones de cimentación del puente vehicular del Eje 6 Sur Trabajadores Sociales sobre la avenida Eje 3 Oriente.

En cuanto al problema del fracturamiento, información proporcionada por el Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos de la Alcaldía Iztapalapa, se tienen ubicados 1072 expresiones superficiales de fracturamiento, con una longitud total de 117.16 km. Dichas fracturas se presentan con una orientación preferencial al sur, centro y noreste, siendo esta última la zona más afectada por la presencia del fenómeno (Atlas de Riesgos y Vulnerabilidades de Iztapalapa, 2014).

El origen del fracturamiento deriva de acuerdo a su mecanismo. Carreón (2011), desarrolla distintas fuentes para el desarrollo del fracturamiento: Materiales altamente heterogéneos (localizados en zonas de contacto litológico); deslizamiento en forma de bloques irregulares (originados en una superficie de despegue); colapso de materiales piroclásticos (estos socavamientos se originan por infiltración de agua por la pérdida de la estructura); y, deformación diferencial en planicies lacustres (esto derivado de la compresibilidad y el contenido de agua de las arcillas) (Figura 2.14).

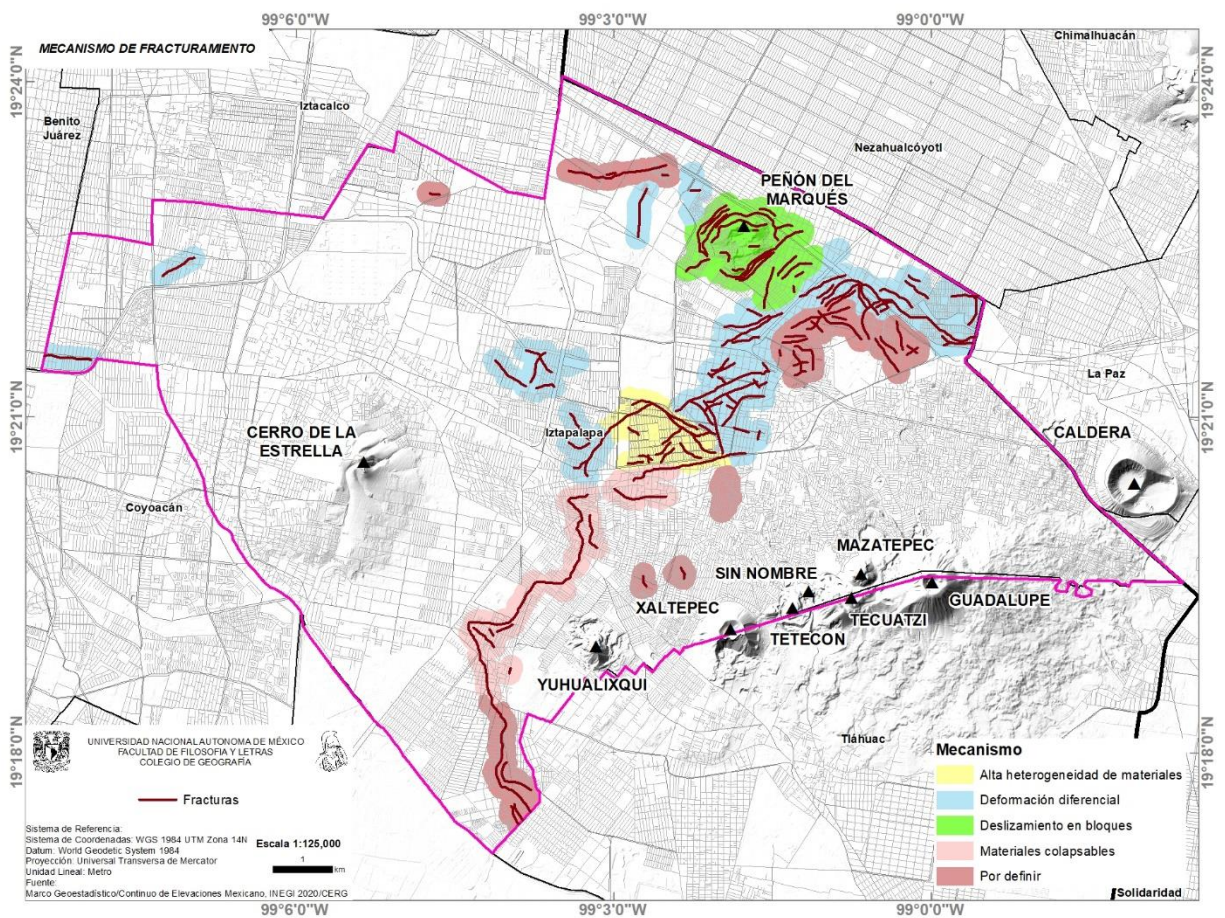


Figura 2.14. Mapa de fracturas evaluadas por su mecanismo de fracturamiento en Iztapalapa (elaboración propia con datos del Atlas de Riesgos y Vulnerabilidades de Iztapalapa, 2014).

Actualmente se presentan varios sistemas preferenciales de fracturamiento, los cuales afectan a la población. El primer sistema tiene orientación NE-SW, la cual delimita en forma general el borde de la Sierra de Santa Catarina. Este sistema cuenta con un desplazamiento normal (desde varios

centímetros hasta 2 metros) con un buzamiento hacia el NW, en una zona relativamente angosta de deformación. Las colonias afectadas por este primer sistema de fracturamiento son la colonia Jacarandas, la Unidad Habitacional Santa Cruz Meyehualco, Santa María Aztahuacán, Santa Martha Acatitla y la U.H. Ermita Zaragoza, estas últimas cuentan con diversos buzamientos a nivel local (Figura 2.15 y 2.16).

Por su parte hay otro sistema que corre paralelo a la Calz. Ignacio Zaragoza con desplazamientos hacia el NE (Carreón, *ibíd.*). Este sistema muestra concordancia con el límite lacustre de la Laguna de Texcoco para 1847. (Ver figura 2.14). El tercer sistema bordea el edificio volcánico llamado Peñón del Marqués o "Peñón Viejo". Este sistema tiene una orientación NE en el sector norte y SW en el sector sur principalmente, de esta manera bordea casi en su totalidad los alrededores del Peñón del Marqués. Así mismo se forman "escalones" derivado de la tensión formada en los bloques inestables que generan el fracturamiento (Figura 2.17 y 2.18). El cuarto sistema se encuentra en la zona de San Lorenzo Tezonco, con una dirección NE-SW y NS. Estas afectan las colonias de la zona de San Lorenzo Tezonco, entre ellas la colonia Lomas de San Lorenzo (cercana al reclusorio oriente), en la cual en el año 2007, un hombre perdió la vida al producirse un socavamiento de varios metros de profundidad, así mismo, ocasionando una afectación a la vialidad y los servicios básicos durante varios días a los vecinos. (Figura 2.19 y 2.20).

Figura 2.15 NW



Figura 2.16 NW



Figura 2.17 SE



Figura 2.18 NW



Figura 2.19 NE-SW



Figura 2.20 NW



Figura 2.15. Fracturamiento registrado en la calle Primo de Verdad, colonia Jacarandas con una orientación NE-SW y un buzamiento al NW. **Figura 2.16.** Afectación en vivienda por fracturamiento en la calle Claudio Alcocer colonia Santa Martha Acatitla con orientación NE-SW y buzamiento al NW. **Figura 2.17.** Fracturamiento por deslizamiento en bloques inestables en la calle Luis García colonia Santa Martha Acatitla, orientación SW-NE y buzamiento al SE. **Figura 2.18.** Fracturamiento en la Calz. Ignacio Zaragoza, conocida como "zona de vados" derivado del Fracturamiento por deslizamiento en bloques inestables, con una orientación NE-SW con echado al NW. **Figura 2.19** Socavación en el año 2007 sobre la calle de Vistahermosa en la colonia Lomas de San Lorenzo donde una persona perdió la vida (foto proporcionada por CERGI-Iztapalapa, 2014). **Figura 2.20.** Fractura sobre la calle Guadalupe Victoria, perpendicular a la calle Vistahermosa donde ocurrió el socavón del año 2007, presenta una orientación NE-SW y un echado al NW.

2.5 Afectaciones por los sismos del mes de septiembre del 2017

El 19 de Septiembre de 2017 se reportó uno de los mayores sismos del que se tenga registro en México, con una magnitud de 7.1 en los límites de los estados de Puebla y Morelos, a 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos (SSN, 2017).

Debido a la ubicación geográfica de la Ciudad de México, sobre sedimentos blandos de los antiguos lagos que existieron en la cuenca, existió una correlación entre los daños ocurridos y las zonas donde se produjeron las mayores aceleraciones espectrales². Información generada por los Institutos de Geofísica e Ingeniería de la UNAM, muestran que las mayores aceleraciones espectrales se tienen al poniente de la cuenca, donde se ubican la mayoría de edificios colapsados o fuertemente dañados. También existe una correlación entre esta aceleración y los espesores de los sedimentos lacustres, la cual en la zona poniente tienen un espesor de 10 a 30 m. Por lo que, la interacción y amplificación de las ondas sísmicas en esta región provocaron daños (UNAM, 2017)³.

De acuerdo al boletín No.318/17, emitido el 21 de septiembre, por la Secretaría de Gobernación, se reportaron 273 fallecidos en los estados afectados, teniendo 137 en la Ciudad de México. En

² Aceleración espectral: valor que mide la relación entre fuerzas inerciales impuestas a la estructura, y el desplazamiento

³<http://ciencia.unam.mx/leer/652/-que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico>

cuanto al número de inmuebles afectados en la Ciudad de México⁴, tiene un total de 7,774 de los cuales: 370 edificios multifamiliares, 7,223 viviendas unifamiliares y 173 edificios de 8 unidades habitacionales.

En Iztapalapa, el panorama no fue distinto. A lo largo de toda la alcaldía se reportaron inmuebles colapsados, como el ocurrido en Paseo de las Galias, en Lomas Estrella, donde fallecieron 4 personas; en la U.H. Concordia Zaragoza fueron desalojados edificios por riesgo de colapso, viviendas, escuelas y mercados severamente dañados; vialidades con reportes de activación del sistema de fracturamiento, principalmente en la franja que circunda la Sierra de Santa Catarina y el Peñón del Marqués (Dirección de Protección Civil, 2017).

Un reporte preliminar de afectaciones en viviendas emitido por la Dirección de Protección Civil de la Alcaldía Iztapalapa en 2017, mostró un universo de 20,516, de las cuales: 13,287 se recomendó reparar, 5,430 reforzar, 1,120 reconstruir y, 679 reubicar. La distribución de mayores daños en las viviendas se localizaron en: sector norte a los alrededores del Peñón del Marqués y U.H. Ermita Zaragoza; al centro de la alcaldía en la U.H. Santa Cruz Meyehualco y Santa María Aztahuacán; finalmente al sur en las colonias El Molino, U.H. Cananea, La Planta (Figura 2.21, 2.22 y 2.23).



Figura 2.21. Izquierda. Calle Liborio Crespo dañada por activación de fracturamiento a causa del sismo de 2017.
Figura 2.22. Derecha. Calle Circunvalación en Santa María Aztahuacán afectada por la activación de una fractura.

⁴Resultados del censo y de la validación de la Comisión para la Reconstrucción de los inmuebles dañados en el pasado sismo del 19 de septiembre de 2017. Disponible en [<https://reconstruccion.cdmx.gob.mx/censo>] consultado el 25 de enero de 2021.



Figura 2.23. Fracturamiento con un escalonamiento vertical a causa del sismo en calle Pintapan, U.H. Cananea.

Capítulo 3 Escala de Intensidad del Fracturamiento

3.1 Propuesta metodológica

A partir del sismo del 19 de septiembre de 2017 y el fracturamiento del suelo registrado en la alcaldía Iztapalapa desde los años sesentas, se desarrolla la presente clasificación del fracturamiento, propuesta por el grupo de trabajo de la Subdirección del Centro de Evaluación de Riesgos (SCER), con la metodología “Escala de Intensidad de Fracturamiento”, la cual, clasifica la magnitud o severidad de una fractura en la vialidad, asignando un color a cada escala (verde, amarillo, naranja y rojo).

La metodología “Escala de Intensidad del Fracturamiento” fue propuesta y aplicada en todo el territorio de la Alcaldía Iztapalapa en 2018, teniendo como información inicial, la obtenida por el grupo del SCER donde desempeño funciones desde el año 2011. Desde los inicios del entonces CERG (ahora SCER), en 2007, hemos desarrollado conocimiento para la identificación y monitoreo de fenómenos geológicos a partir del trabajo de campo, estudios geofísicos, uso de imágenes de satélite para medir la subsidencia (interferometría), nivelaciones topográficas en vialidades para medir desplazamientos y uso de drones para conocer la evolución de los sistemas de fracturamiento. Para la presente metodología, realicé el trabajo auxiliado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para dimensionar y zonificar la problemática del fracturamiento. Posteriormente, por medio de un análisis cualitativo determinamos los rangos de cada escala de intensidad del fracturamiento. La mayor parte de la información y datos presentados en este capítulo fueron generados por y para la Alcaldía Iztapalapa, quien cuenta con los derechos de la misma.

Inicialmente, para cuantificar el número de grietas por medio de esta metodología, se realizó un levantamiento en territorio con la finalidad de conocer el estado de las vialidades y espacios públicos dañados por este fenómeno. Como primer acercamiento a la dimensión de afectación por sismo y fracturamiento, se identificó en gabinete por medio de sobreposición de las siguientes capas de información:

- i. La ubicación de afectaciones en viviendas por el sismo del 19 de septiembre de 2017.** Por medio de un análisis “Densidad de kernel⁵” se obtuvo la concentración de casas afectadas en un espacio determinado, en este caso, los cerca de 114 km² del territorio de la alcaldía Iztapalapa (Figura 3.1). Esta información se obtuvo de la georeferenciación del censo de viviendas afectadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017, realizado por la entonces Dirección de Protección Civil en el año 2017.

⁵Densidad de Kernel: Método de estimación de densidad de datos sin comportamientos estadísticos paramétricos (continuas, simétricas y positivas)

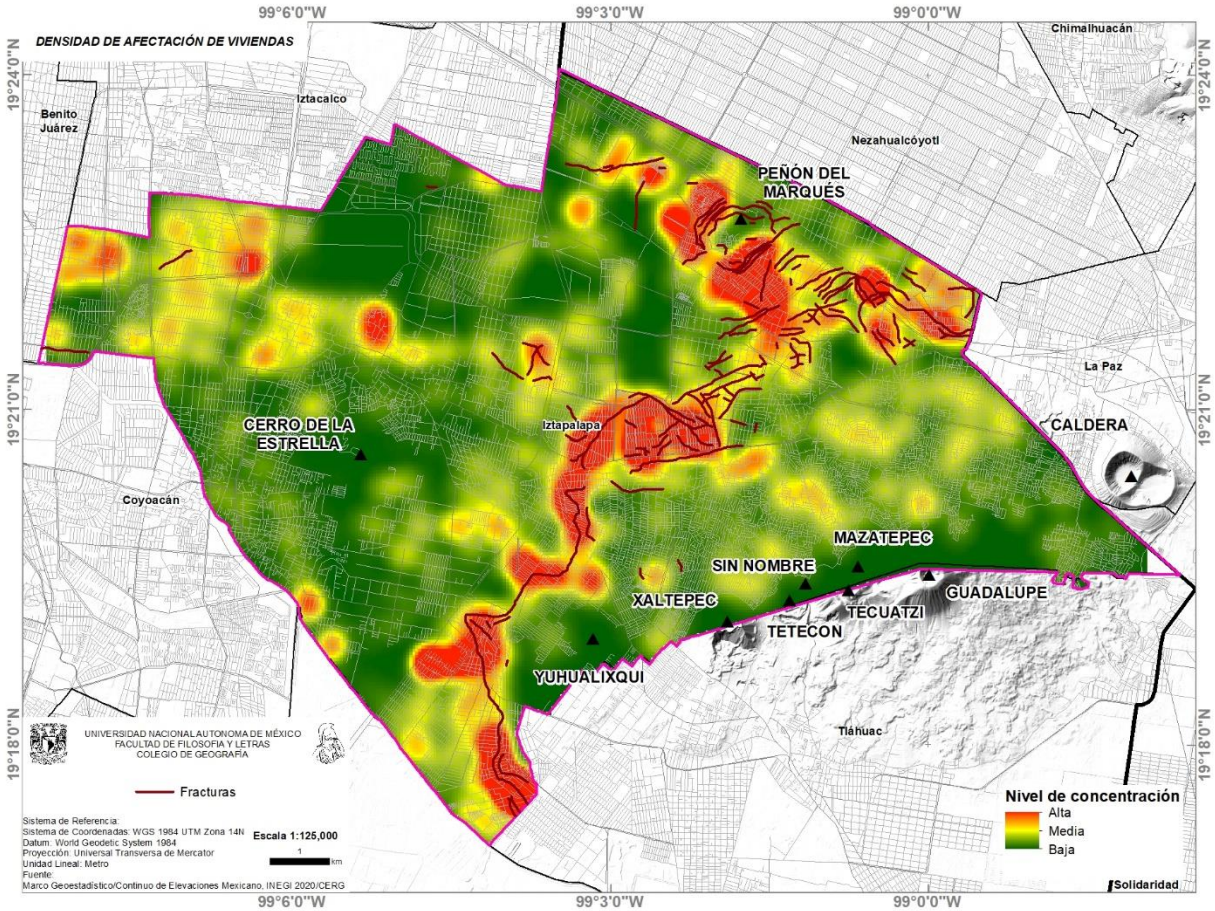


Figura 3.1. Concentración de viviendas dañadas, los colores rojos muestran la mayor concentración puntos y los colores verdes las de menor o nula concentración (elaboración propia con datos de la Dirección de Protección Civil, 2017).

ii. **La Vulnerabilidad Geológica al Fracturamiento (VGF)⁶.** Se refiere a un indicador que manifiesta la potencialidad del terreno a deformarse y fracturarse obtenido a partir de: 1) los mecanismos de fracturamiento (génesis del fracturamiento); 2) la densidad del fracturamiento (densidad de lineamiento); 3) las unidades morfogénicas (geomorfología); y, 4) el gradiente de subsidencia (variación de subsidencia a partir de una imagen satelital). Estas variables fueron elaboradas y procesadas a partir del reservorio de datos del Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos (Figura 3.2).

⁶ Metodología propuesta por el CERG.

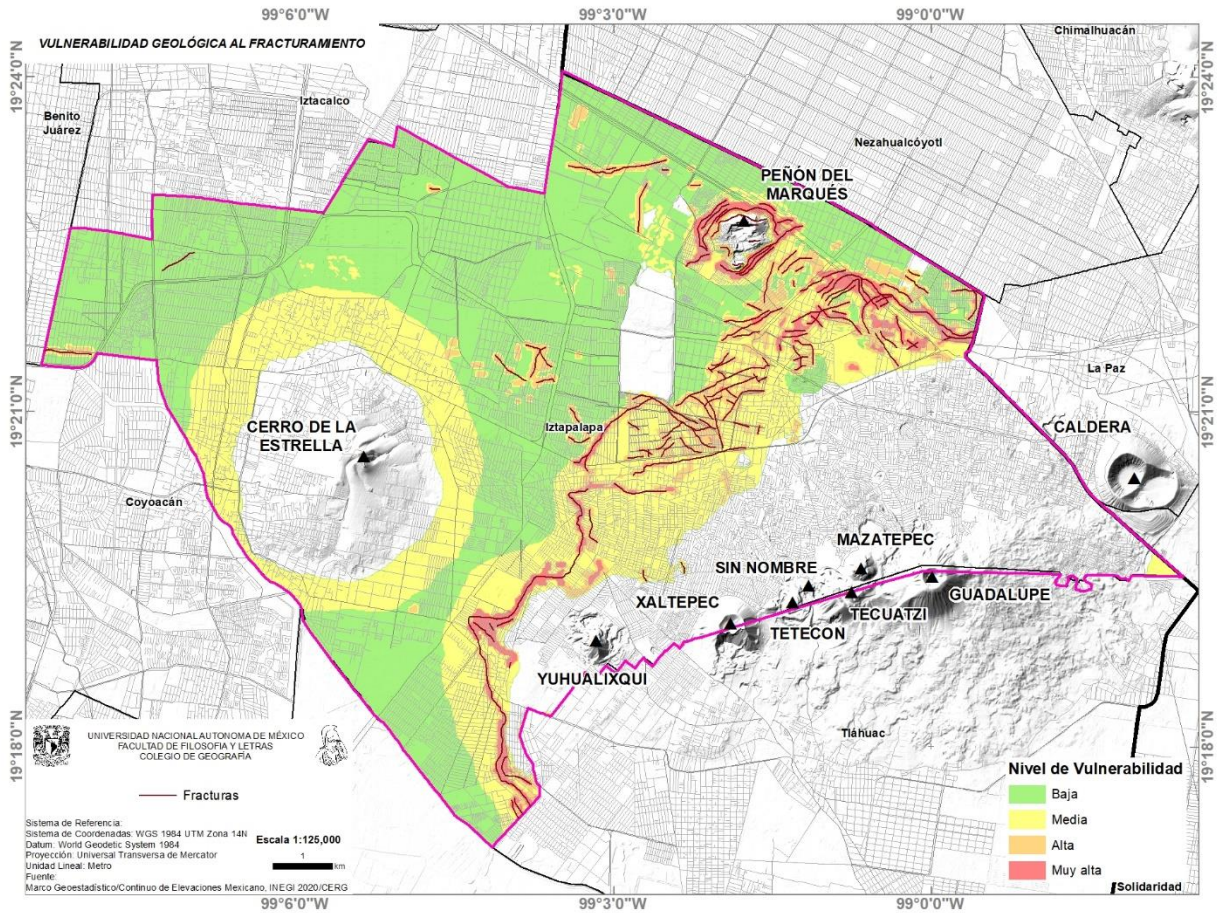


Figura 3.2. Nivel de vulnerabilidad geológica al fracturamiento (elaboración propia con datos del Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos, 2018).

A partir de este análisis de capas de información, se delimitaron zonas denominadas “Polígonos de fracturamiento”, definidas por su alta concentración de daños en viviendas por el sismo, su alto o muy alto nivel de Vulnerabilidad Geológica al Fracturamiento y su delimitación administrativa⁷. En estos polígonos se realizó el levantamiento a detalle en campo. Para ello, se dividió el territorio en 10 polígonos (Tabla 3.1), con la finalidad de diagnosticar de manera pronta las colonias más afectadas. (Figura 3.3)

Tabla 3.1. Nombre de los Polígonos de fracturamiento y número de colonias en cada uno

Polígono de fracturamiento		Número de colonias
1	Ermita Zaragoza	7
2	Peñón del Marqués	9
3	Pueblo de Santa Martha Acatitla	4
4	Santa María Aztahuacan	6
5	Santa Cruz Meyehualco	5

⁷ La Alcaldía Iztapalapa se divide en 13 Direcciones Territoriales

Polígono de fracturamiento		Número de colonias
6	Santa Cruz Quetzalcóatl	4
7	Los Ángeles Agrarista	5
8	San Lorenzo Tezonco	9
9	Ejército Constitucionalista	6
10	Albarradas	11
Total		66

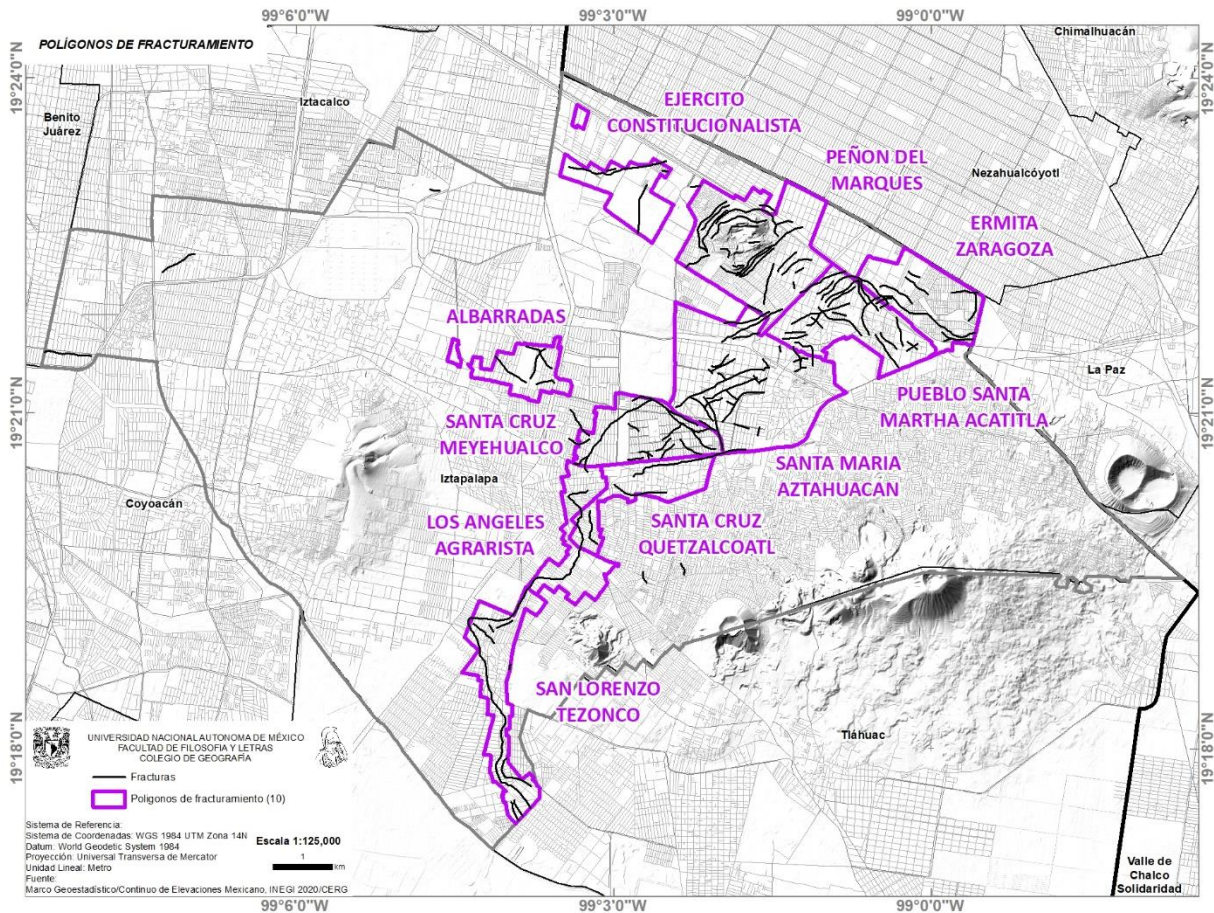


Figura 3.3. Distribución de los polígonos de fracturamiento (elaboración propia con datos del Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos, 2018).

3.2 Escala de Intensidad del Fracturamiento

Para lograr una clasificación del fracturamiento, se desarrolla la presente metodología “Escala de Intensidad de Fracturamiento”, la cual, como se mencionó en el punto 3.1, clasifica la magnitud o severidad de una fractura en la vialidad, asignando un color a cada escala, definiéndose por características del comportamiento de la grieta (desplazamiento vertical), la dimensión (zona de afectación), daños en viviendas y/o equipamiento e infraestructura. A partir de estas características, se definieron cuatro escalas, siendo la de escala uno romano (I) la de

menos intensidad (color verde), seguido por la escala II (color amarillo), escala III (color naranja) y por último, la escala IV (color rojo), la de mayor intensidad.

La siguiente tabla (tabla 3.2) muestra en orden ascendente cada una de las escalas antes expresadas, así como las dimensiones y unidades de medida utilizadas en los parámetros de desplazamiento vertical y zona afectada.

Tabla 3.2. Síntesis de la metodología “Escala de Intensidad de Fracturamiento” propuesta por la Subdirección del Centro de Evaluación de Riesgos (SCER)

Escala	Desplazamiento vertical (cm)	Zona afectada (m)	Daño en viviendas	Daño en equipamiento e infraestructura
I	Sin desplazamiento	< 1	Sin afectación	Agrietamiento leve en banquetas, guarniciones, pavimento
II	1 a 10	1 a 5	Agrietamiento perceptible en bardas y muros	Agrietamiento desarrollado en banquetas, guarniciones, pavimento
III	11 a 50	6 a 20	Fuerte agrietamiento en bardas y muros	Fuerte rompimiento de banquetas, guarniciones y pavimento
IV	> 50	> 20	Daños estructurales severos	Daños estructurales severos

A partir de la tabla, se describe cada una de las escalas de intensidad (escala I a escala IV) con las variables que la componen (Figura 3.4):

- **Escala I:** No tiene desplazamiento vertical, la zona afectada debe ser menor a 1 metro con respecto a la grieta, no habrá afectación a las viviendas y las banquetas, guarniciones y pavimento tendrán un agrietamiento leve.
- **Escala II:** El rango del desplazamiento vertical será de 1 a 10 cm, tendrá una zona afectada de 1 a 5 metros con respecto a la grieta, el daño en viviendas ya es perceptible en sus muros y bardas, mientras que en banquetas, guarniciones y pavimento el agrietamiento ya está desarrollado.
- **Escala III:** Tendrá un desplazamiento vertical de 10 a 50 cm, con una zona de afectación de 5 a 20 metros con respecto a la grieta, además, en las viviendas se registra un fuerte agrietamiento en sus bardas y muros, finalmente en guarniciones, banquetas y pavimento se observa un evidente fuerte rompimiento.
- **Escala IV:** Debe tener un desplazamiento vertical mayor a 50 cm, con afectaciones en un rango de 50 metros con respecto a la grieta, en las viviendas se observan daños estructurales severos, también en guarniciones, banquetas y pavimentos.



Figura 3.4. Ejemplo de cada una de las escalas de intensidad del fracturamiento en vialidades: Escala I. Maximiliano Mariles, Jacarandas, Escala II. Calle 63, U.H. Santa Cruz Meyehualco, Escala III. Liborio Crespo, Santa Martha Acatitla Sur, Escala IV. Pintapan, U.H. Cananea.

3.3 Brigadas en campo

Para realizar el levantamiento en campo, fue necesario integrar grupos de diversas disciplinas (Geógrafos, Ing. Geólogos, Ing. Civiles, Ing. Geofísicos, Arquitectos), que formaron parte de la Dirección General de Obras y Desarrollo Urbano, Dirección General de Servicios Urbanos, así como enlaces de las diversas Direcciones Territoriales involucradas. El levantamiento en campo se realizó en un periodo de 3 meses (octubre – diciembre 2018). Se realizó cartografía a partir de las actividades realizadas por área (figura 3.5).

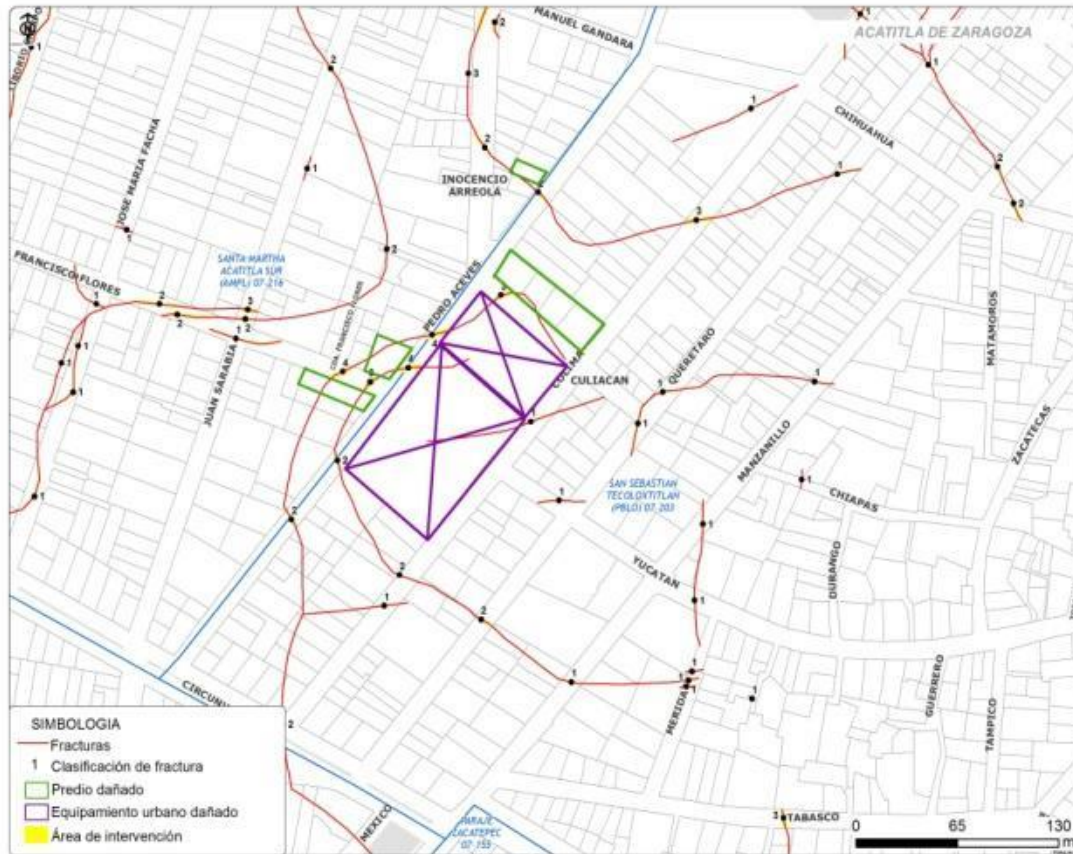


Figura 3.5 Cartografía de fracturas, predios y equipamiento dañado en trabajo de campo realizado por el personal del SCER (Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos, 2018).

3.4 Resultados

Los resultados del levantamiento territorial con la metodología “Escala de Intensidad del Fracturamiento” manifiestan 2,433 puntos de vialidades o espacios públicos que presentan alguna escala de fracturamiento (Figura 3.6). Se realizó el trabajo cartográfico en un caminamiento de 394.59 km lineales en las calles de la alcaldía (SCER, 2018). El total de puntos, se distribuye en la tabla 3.3:

Tabla 3.3. Resultado del levantamiento territorial con la metodología “Escala de Intensidad del Fracturamiento” por escala, número de puntos y porcentaje

Escala	Puntos	Porcentaje
I	1,234	50.7%
II	837	34.4%
III	285	11.7%
IV	77	3.2%
Total	2,433	100%

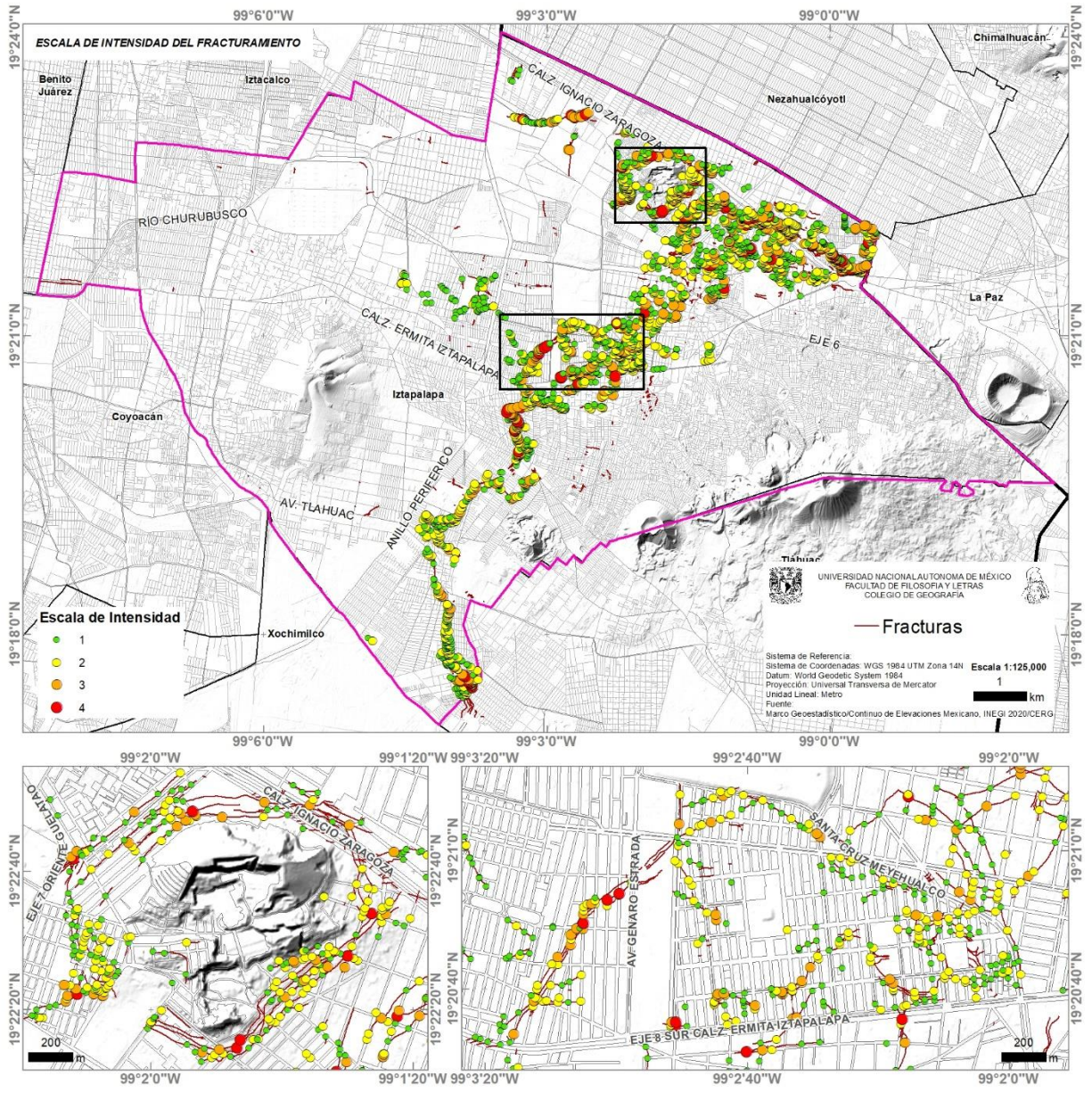


Figura 3.6. Distribución espacial de los puntos con la metodología “Escala de Intensidad del Fracturamiento” (elaboración propia con datos del Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos, 2018).

En cuanto a los “Polígonos de Fracturamiento”, la clasificación de grietas por cada polígono, se muestra en la tabla 3.4:

Tabla 3.4. Número de puntos por “Polígono de Fracturamiento” y escala de intensidad del fracturamiento

Polígono de fracturamiento		Número de colonias	Escala I	Escala II	Escala III	Escala IV	TOTAL
1	Ermita Zaragoza	7	116	126	69	20	331
2	Peñón del Marqués	9	199	166	56	11	432
3	Pueblo de Santa Martha Acatitla	4	218	105	32	11	366
4	Santa María Aztahuacán	6	112	87	25	4	228
5	Santa Cruz Meyehualco	5	155	124	31	5	315
6	Santa Cruz Quetzalcóatl	4	110	57	18	6	191
7	Los Ángeles Agrarista	5	66	35	25	6	132
8	San Lorenzo Tezonco	9	164	114	17	10	305
9	Ejército Constitucionalista	6	28	12	11	4	55
10	Albarradas	11	66	11	1	0	78
Total		66	1,234	837	285	77	2,433

Espacialmente, los puntos por polígono se distribuyen de forma heterogénea. La mayor cantidad se encuentra en el polígono de fracturamiento Peñón del Marqués (432 puntos), asociándose con el mecanismo de fracturamiento deslizamiento en bloques (ver figura 2.14). Los polígonos Ermita Zaragoza y Pueblo Santa Martha Acatitla, con 331 y 366 puntos respectivamente, se encuentran en la zona de deformación diferencial principalmente. El polígono de Santa Cruz Meyehualco cuenta con 315 puntos, influenciado por la alta heterogeneidad de materiales. En cuanto a San Lorenzo Tezonco, con 305 puntos, se encuentra en una zona de materiales colapsables y un mecanismo por definir. Finalmente, con menos de 300 puntos se encuentran los polígonos de Santa María Aztahuacán, Santa Cruz Quetzalcóatl, Los Ángeles Agrarista, Ejército Constitucionalista y Albarradas (Figura 3.7).

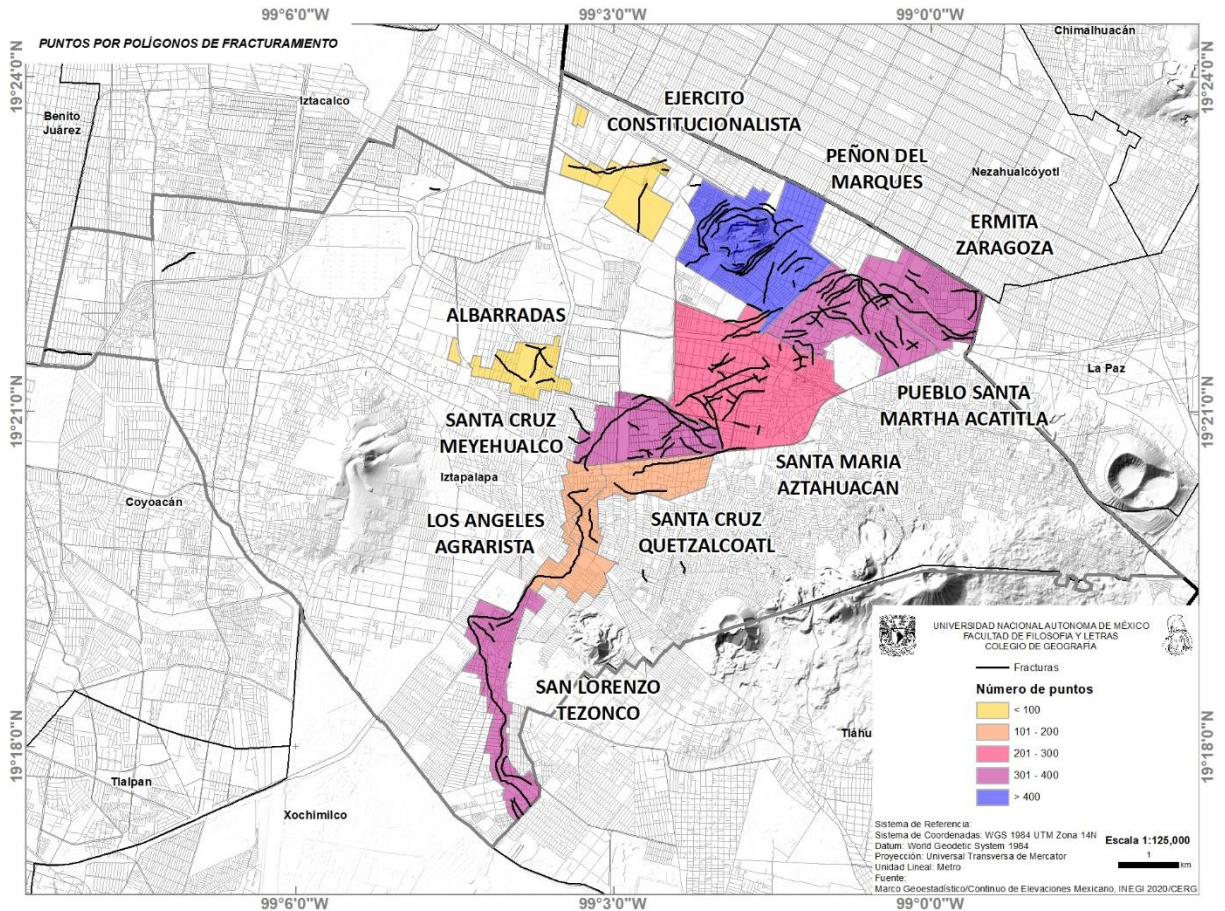


Figura 3.7. Número de puntos por polígono de fracturamiento (elaboración propia con datos del Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos, 2018).

Cabe mencionar que este fenómeno geológico es dinámico, por lo que el resultado arroja una condición inicial. Dicho fenómeno tiende a generar propagación o “ramificación” por lo que el número podría incrementar. Así mismo, el escalonamiento vertical en superficie puede aumentar o disminuir a mediano o largo plazo (algunos años), por lo cual, puede presentar variaciones la escala de intensidad de fracturamiento. Finalmente, la ocurrencia de un sismo, es factor para modificar la escala de intensidad, ya sea por el desplazamiento vertical, o la zona afectada.

Como se mencionó en el punto 2.4, la distribución del fracturamiento se presenta con una orientación preferencial al sur, centro y noreste, siendo esta última la zona más afectada por la presencia del fenómeno. Como se muestra en la figura 3.6, el conjunto de puntos identificados se distribuyen al sur en colonias como La Planta, U.H. Cananea y El molino; al centro en colonias como U.H. Santa Cruz Meyehualco, Jacarandas y Ejidos de Santa María Aztahuacán; y, al noreste, en colonias como Santa Martha Acatitla, Pueblo de San Sebastián Tecoloxtitlán y U.H. Ermita Zaragoza.

3.5 Programa “Acupuntura Urbana”

A partir de la cuantificación de puntos de fracturamiento con la “Escala de Intensidad del Fracturamiento”, la alcaldía inició el primero de mayo del año 2019, el programa “Acupuntura urbana”, el cual se encarga de la mitigación de fracturas en las áreas afectadas por este fenómeno,

aplicando la técnica caja de arena disipadora de deformaciones desarrollada por investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Figura 3.8). Esta caja de arena, tiene como finalidad eliminar el escalón en una vialidad y reemplazarlo por una superficie inclinada tolerable.

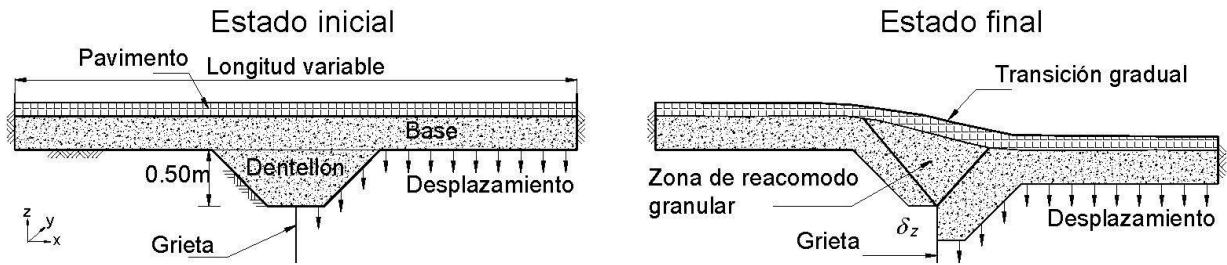


Figura 3.8 Caja de arena disipadora de deformaciones. (II UNAM, 2019)

La emisión de la nota técnica No. G-09 “Recomendaciones para la construcción de cajas de arena disipadoras de deformaciones para grietas con escalón” establece el procedimiento constructivo para la intervención de las fracturas (Figura 3.9), mediante la construcción de cajas de arena: 1) chica, con una profundidad de 0.5 m; y, 2) grande, con una profundidad de 1 m.



Figura 3.9 *Izquierda.* Construcción del cajón de arena disipador de deformaciones en fractura de la calle 19 entre Av. 4 y Av. 6, Col. U.H. Santa Cruz Meyehualco. *Derecha.* Estado final de la intervención con la colocación de la carpeta asfáltica.

Conclusiones

En la alcaldía Iztapalapa, como en la Ciudad de México, las actuales políticas de explotación de los mantos acuíferos para la obtención de agua potable, la heterogeneidad geológica y morfológica, así como el crecimiento de la población, han condicionado la subsidencia y el fracturamiento del suelo. Desde el siglo XX, estos fenómenos han afectado edificaciones, vialidades, redes hidráulicas y espacios públicos. Así mismo, la consolidación de las arcillas en la planicie lacustre ha modificado el comportamiento mecánico de las mismas, que pueden originar cambios en la respuesta del suelo ante las ondas sísmicas.

A partir de la construcción de pozos de extracción de agua potable en la zona oriente de la Ciudad de México, la alcaldía Iztapalapa ha sufrido un aumento en la subsidencia del suelo, donde se tiene registro de valores de hasta 39 cm/año. Esta problemática se agrava en las zonas de transición, generalmente asociados en las zonas del borde de los edificios volcánicos con los depósitos de la planicie lacustre. En esta zona se concentra la mayor parte del fracturamiento del suelo que se encuentra en la alcaldía.

El presente informe, sólo muestra el producto del levantamiento de la metodología “Escala de Intensidad de Fracturamiento” siendo el objeto de estudio del mismo. La “Escala de Intensidad del Fracturamiento” logra puntualizar la distribución de sitios afectados por el fracturamiento, esta severidad se asocia de manera directa con los daños que se encuentran en la superficie, sobre todo en viviendas y vialidades. Por lo anterior, esta propuesta metodológica pretende ser de utilidad, no solo por la localización del fenómeno, dado que este ya se tiene de trabajos académicos y gubernamentales previos. El aporte metodológico, radica en la facilidad de toma de datos, así como su interpretación, asignando un color (verde, amarillo, naranja y rojo) respecto a la escala de intensidad. Sin embargo, requiere una actualización periódica dada la dinámica geológica de la Ciudad de México.

A partir del sismo del 19 de septiembre del 2017, se activaron diversas fracturas, o se propagaron sistemas de fracturamiento inactivos. Por lo cual, el diagnóstico realizado en el año 2018 bajo esta metodología, establece una cuantificación de daños, que dio paso a la implementación del programa “Acupuntura Urbana” con un método de mitigación geotécnica, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Actualmente, se desconoce a largo plazo las consecuencias de la extracción de agua del subsuelo, sin embargo a corto y mediano plazo, el problema de la subsidencia y fracturamiento persiste, por lo que se requieren políticas y programas como el propuesto e implementado por la Alcaldía Iztapalapa. Si bien, se disipa el escalón vertical del fracturamiento mediante una caja de deformación dando mayor durabilidad a las intervenciones realizadas en vialidades, se requiere la búsqueda de alternativas de las políticas hídricas con la finalidad de disminuir el impacto de la extracción de agua.

Para mejorar el análisis sobre el problema de la subsidencia provocado por el agua de agua, se requiere contar con información actualizada de la ubicación y volumen de extracción de los pozos con los que cuenta el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y la Comisión Nacional del Agua.

Así mismo, sería conveniente contar con la información del censo de viviendas afectadas por el sismo realizado por el Gobierno de la Ciudad de México a partir del año 2018 por medio de la Comisión de Reconstrucción. Contar con la ubicación y el dictamen emitido por las autoridades correspondientes podría vincular los sitios en los cuales se ejerce el programa “Acupuntura Urbana” con los trabajos de reconstrucción de viviendas para atender de forma integral la problemática.

Finalmente, la metodología de “Escala de Intensidad del Fracturamiento” genera una oportunidad de homologar los criterios para definir la magnitud del fenómeno de fracturamiento, con la finalidad de tener un inventario nacional e incluirlo en los atlas de riesgos.

Referencias bibliográficas

Alcaldía Iztapalapa. “Análisis de los mecanismos de fracturamiento del subsuelo que afectan a la Delegación Iztapalapa, utilizando una base de datos estructurada para la toma de decisiones”. Informe Final, Avances de la colaboración Delegación Iztapalapa - Centro de Geociencias, UNAM. México. Diciembre. 2008

Alcaldía Iztapalapa. “Atlas de Riesgos y Vulnerabilidades de Iztapalapa”, 2011.

Alcaldía Iztapalapa. “Atlas de Riesgos y Vulnerabilidades de Iztapalapa”, 2014.

Alcaldía Iztapalapa. “Diagnóstico y políticas de protección civil para Iztapalapa”. Presentación en mesa de Energía, Asamblea Legislativa de la Ciudad de México. Diciembre 2015.

Alvarado, Tezozómoc, F. (1944). “Crónica mexicana”. Editorial Leyenda, S.A., México

Auvinet, G., et. al. (2014) “Avances sobre el agrietamiento del suelo asociado al hundimiento regional en el Valle de México” XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Noviembre 2014

Auvinet, G., Sánchez, J. (2019) “Nota técnica No. G-09 Recomendaciones para la construcción de cajas de arena disipadoras de deformaciones para grietas con escalón”. Comité de Grietas de la Ciudad de México. Elaborada para el Instituto de Seguridad de las Construcciones del Gobierno de la Ciudad de México. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 2019

Cabral-Cano, E., et. al. (2008). “Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City”. En boletín GSA, Vol. 120, No. 11/12, Noviembre/Diciembre 2008. Pp. 1556-1566

Cabral-Cano, E., et. Al. (2011). “Subsidencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México”. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 63. No.1. México

Carreón-Freyre, D. (2011) “identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del distrito federal” .Informe para la incorporación a la Academia de Ingeniería. Abril 2011.

Carreón-Freyre, D., et. al. (2017) “Posible influencia de la subsidencia y fracturamiento en la Ciudad de México en las construcciones dañadas por el sismo del 19 de Septiembre de 2017“. Reporte especial. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Septiembre. México, 2017

Centro de Geociencias, UNAM, Convenio de colaboración con la Delegación Iztapalapa 2008-2012

Centro Nacional de Prevención de Desastres. “Análisis de la vulnerabilidad física a la subsidencia, hundimiento y agrietamiento en la Ciudad de México”. Reporte de Actividades. Actividad 4. Mayo 2017. México [https://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/15a%20SESI%C3%93N%20ORDINARIA/An%C3%A1lisis%20de%20la%20vulnerabilidad%20f%C3%ADsica/Reporte%20CENAPRED_UNAM_Actividad%204_v1.pdf]

Compañía Mexicana de Aerofoto, S.A. de C.V.

Demant, A. et. al., (1976) “El Eje Neovolcánico Transmexicano”, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Congreso Latinoamericano de Geología, 3, Acapulco, Excursión 4, 37 p.

De Cserna, Z. D., et. al. (1988). “Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México”. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Boletín, 104, 71. México

Díaz - Rodríguez, J.A., et. al. (2006). “Los suelos lacustres de la Ciudad de México”. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2).México.

Dirección General de Servicios Urbanos, Alcaldía Iztapalapa, 2014

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Censo de Población y Vivienda 2020

Ezcurra, E. (1992). “Crecimiento y colapso en la Cuenca de México”. Ciencias Vol. 25. Enero. México.

Ezcurra, E. et. al. (2006). “La Cuenca de México”. Ed. Fondo de Cultura Económica. Secc. de Obras de Ciencia y Tecnología. México.

Ezcurra, E. (2003). “De las chinampas a la megalópolis”. Ed. Fondo de Cultura Económica. Colección la ciencia para todos. 91. 3ra. Reimpresión. México.

Galloway, D., et. al. (1999). “Land Subsidence in the United States”. U.S. Geological Survey (USGS) Circular 1882. Estados Unidos.

Garay, E. (1975). “Morfología de la región volcánica Chimalhuacan-Cerro de la Estrella / Sierra de Santa Catarina y Fracturas del fraccionamiento Los Olmos- Delegación de Tláhuac”. Tesis de Licenciatura. FFyL. Geografía. UNAM. México.

García-Soriano, D. (2015) “Cartografía y peligros geomorfológicos en la Delegación Iztapalapa, D.F., México”. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, 2015

García-Soriano, D., et. al. (2020) “Geomorphological hazards susceptibility in high-density urban areas: A case study of Mexico City” En Journal of South American Earth Sciences. Vol. 102. Junio 2020. Estados Unidos. Pp. 1-11

Gutiérrez - MacGregor, M.T., et. al. (2005) “La cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales”. Temas Selectos de Geografía de México (I.8.1), Instituto de Geografía, UNAM, México

Gutiérrez - MacGregor, M.T., et. al. (2002) “Geohistoria de la Ciudad de México”. Temas Selectos de Geografía de México (I.4.2), Instituto de Geografía, UNAM, México

- Gutiérrez - MacGregor, M.T., et. al. (2010) “Evolución del crecimiento espacial de la Ciudad de México en relación con las regiones geomorfológicas de la Cuenca de México”. En *Estudios sobre los remanentes de cuerpos de agua en la Cuenca de México*. Geografía del Siglo XXI. Serie de libros de investigación; 77, Instituto de Geografía, UNAM, México
- Hiriart, F. et. Al. (1969). “El hundimiento de la CM”. En: El Hundimiento de la CM Proyecto Texcoco, SHCP, NAFINSA. México.
- Hiriart, F. (1952). “Contribución de la Comisión Federal de Electricidad a la solución del problema de abastecimiento de agua a la ciudad de México”. Comisión federal de Electricidad.
- Lesser, J. et. Al. (1998). “El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje”. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. 13. Septiembre-Diciembre. México
- López-Quiroz, P., et. al. (2009). “Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry”. En Journal of Applied Geophysics. Vol. 69, No. 1. September 2009. Estados Unidos. Pp. 1-15
- Lugo Hubp, j. (2011). “Diccionario Geomorfológico”. Geografía para el siglo XXI. No. 7. UNAM. México. Pp. 375-376
- Lugo-Hubp, J. (1990). “El relieve de la República Mexicana”. Revista mexicana de ciencias geológicas, vol. 9, no 1, p. 82.
- Lugo-Hubp, J., et. al. (1994). “Geomorfología de la sierra de Santa Catarina, D.F.” México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 11, No. 1, México
- Marsal, R. J., et. al. (1959). “El subsuelo de la Ciudad de México”. Parte A. Estratigrafía y propiedades. México
- Millán, S. J. (1993). “Estudio geotécnico para el conjunto habitacional que se construirá en la cantera del Peñón Viejo, Iztapalapa, Distrito Federal” Estudios y Proyectos de Ingeniería Civil elaborado para la Dirección de Vivienda del Departamento del Distrito Federal. Julio 1993.
- Montero, G. I. A. (2002). “Huizachtepetl. Geografía Sagrada de Iztapalapa”. Editado por Delegación Iztapalapa. México
- Ordoñez, E. (1895). “Las rocas eruptivas del suroeste de la Cuenca de México”. Instituto Geológico de México, Boletín 2, 46p. México.
- Rodríguez, J. A. D. (2006). “Los suelos lacustres de la Ciudad de México”. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Vol. 6, No.2.
- Romero-González, L. (2020) “Riesgo por hundimiento y agrietamiento en Iztapalapa, CDMX” Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, 2020
- Santoyo, E., et. al. (2005). “Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México”. Publicaciones TGC, México.

Secretaría de Protección Civil del Distrito Federal. "Estudio geológico de grietas y zonas de hundimiento en la colonia Consejo Agrarista Mexicano, Delegación Iztapalapa". Informe final. Diciembre 2013.

Servicio Sismológico Nacional (2017), "Reportes Especiales de los Sismos del 9 de septiembre de 2017 y 19 de septiembre de 2017". México [<http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/>]

Sierra, J. (1984) "Historia de la navegación en la Ciudad de México". Departamento del Distrito Federal. Colección Distrito Federal. No. 7 México.

Soms - García, (1986) "La hiperurbanización en el valle de México". vol. I y II. UAM. México.

Strozzi, t., et. Al. (2001). "Land Subsidence Monitoring with Differential SAR Interferometry". En Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 67, No. 11, Noviembre 2001. Pp. 1261-1270

Strozzi, t., et. Al. (2003). "Jerssar interferometry for land subsidence monitoring". IEEE Transactionson Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41. July. Estados Unidos.

Vázquez - Sánchez, et. al. (1989). "Geología de la cuenca de México". Revista de la Unión Geofísica Mexicana. V. 28.No. 2. Abril. México