



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis hidrogeológico sobre el fracturamiento
anterior y posterior al sismo del 19S 2017 en
casas habitación de Santa María Nativitas,
Xochimilco

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERA GEÓLOGA

PRESENTA

Yessica Ariadne De Anda Clemente

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alberto Arias Paz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Agradecimientos

Al Ingeniero Alberto Arias Paz y por darme las facilidades, el apoyo y la disposición para colaborar en este proyecto.

A mis sinodales, los Ingenieros, José Luis Arcos Hernández y Gabriel Salinas Calleros, a la Doctora Claudia Arango Galván y a el Maestro en Ciencias José Luis Salas Corrales quienes me dieron sus observaciones y ayudaron a mejorar el presente trabajo.

A la comunidad de Santa María Nativitas y San Luis Tlaxialtemalco por darnos acceso al área, acompañarnos en los recorridos y brindarnos hospitalidad durante nuestra estancia.

A Juan Antonio Vanegas por apoyarme en las prácticas para la realización de nuestras tesis y pasar buenos momentos en ellas.

A mis profesores de todos los niveles educativos, de quienes me llevo experiencias, sabiduría, pero, en especial, a mis profesores de la carrera, de quien me llevo el hambre de desarrollar mi carrera y a quienes admiro por su trayectoria.

A con quien compartí prácticas pues son parte importante en la formación y de la diversión de un ingeniero geólogo.

A la Maestra en Ingeniería Isabel Domínguez Trejo por orientarme y auxiliarme cuando y con lo que necesité.

Al D.E. Miguel Ildefonso Vera Ocampo, quien siempre tiene la disposición de apoyarnos en cualquier ámbito, quien te enseña a crecer profesional y personalmente, y a quien después de tanto tiempo de convivencia, ya considero un amigo.

A los integrantes del cubículo 11, Carlos, Stephania y Ulises, con quien pasé tantas cosas y donde además del servicio social hice amigos, con los cuales tuve grandes experiencias y de quien que me llevo aprendizajes.

A mis amigos de carrera que espero lo sigan siendo de por vida, Ana, Claudia, Edgar, Jenny, Juan Brígido, Laura y Manuel, a quien agradezco tantos buenos momentos, risas y de quien me llevo bellísimos recuerdos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por dar a manos llenas educación, entretenimiento, deporte, asistencia médica, por abrirme las puertas al mundo y por un sinfín de oportunidades que ofrece, además de ser la institución donde he pasado los mejores momentos.

Dedicatoria

A mis papás, Rocío Clemente y Armando De Anda, por ser ese apoyo incondicional y por la dedicación que me han dado siempre. Por ser mi inspiración y a quienes admiro tanto por sus logros personales, familiares y profesionales. Por la infinidad de todo tipo de momentos a su lado. Por dar todo para con nosotros. Por amarnos.

A mi hermano, Nael D'Anda, el artista, por escucharme, involucrarse, aconsejarme y estar siempre a pesar de la distancia o actividades. Por ser una gran persona que me inspira por su fuerza y su dedicación. Llegarás muy lejos.

A mis abuelas, por sus palabras y sabiduría, por procurarme, ver por mí y por llevarme en oración.

A José Guillermo Hernández Arellanes por refutarme, debatir mis ideas e inspirarme a hacer las cosas mejor pero, sobre todo por el apoyo, la complicidad, los abrazos, la amistad, el amor y el tiempo. *“En las horas más oscuras me harás levitar”*.

A mis amigos de vida, Karina, David y Daniel, por las risas, los buenos y malos momentos y por ser el apoyo y empuje que necesite cuando lo pedí e incluso cuando no lo hice.

ÍNDICE

Resumen.....	1
Abstract	2
Introducción	3
Objetivo	4
Los sismos.....	4
Generalidades	8
Localidad.....	8
Población	9
Clima.....	10
Temperatura	11
Precipitación.....	12
Geología y geomorfología	15
Correlación estratigráfica.....	18
Afectaciones anteriores al sismo.....	27
Hidrogeología	57
Pozos de la región.....	63
Hidrógrafos	69
Exploración geofísica.....	71
Después del sismo.....	76
Zonas de susceptibilidad	85
Carretera Xochimilco – Tulyehualco	87
Conclusiones	91
Recomendaciones	100
Fuentes de información.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Epicentro e intensidad en zonas aledañas al sismo del 7 de septiembre 2017.	5
<i>Figura 2.</i> Epicentro e intensidad en zonas aledañas al sismo del 19 de septiembre 2017	6
<i>Figura 3.</i> Localidad Santa María Nativitas, Xochimilco.....	8
<i>Figura 4.</i> Clima de Xochimilco.	10
<i>Figura 5.</i> Mapa geológico de zona de estudio y zonas aledañas.	17
<i>Figura 6.</i> Localización de pozos de extracción Nativitas 2, Nativitas 3 y San Luis 20 y la línea de sección trazada para la realización de la correlación.	18
<i>Figura 7.</i> Correlación estratigráfica SW-NE en Santa María Nativitas, Xochimilco.	20
<i>Figura 8.</i> Relieve e hidrografía de Xochimilco, Ciudad de México.	22
<i>Figura 9.</i> Mapa de la zonificación geotécnica de la Ciudad de México y área metropolitana.....	23
<i>Figura 10.</i> Localización de las zonas de transición abrupta.	25
<i>Figura 11.</i> Hundimientos en la carretera Tulyehualco – México.	27
<i>Figura 12.</i> Mapa de zonificación estructural de Santa María Nativitas y alrededores.	51
<i>Figura 13.</i> Roseta de la zona E.	52
<i>Figura 14.</i> Roseta de la zona C.....	53
<i>Figura 15.</i> Roseta de la zona S.....	54
<i>Figura 16.</i> Roseta de la zona W.....	55
<i>Figura 17.</i> Roseta general de Santa María Nativitas.	56
<i>Figura 18.</i> Distribución de presiones de poro durante proceso de consolidación provocado por un abatimiento Δp constante	61
<i>Figura 19.</i> Ubicación de los pozos profundos en Santa María Nativitas y alrededores.	67
<i>Figura 20.</i> Resistividad de rocas, suelos y minerales.....	72
<i>Figura 21.</i> Mapa de localización del tendido para perfiles de TRE.	73
<i>Figura 22.</i> Perfiles de tomografía eléctrica S – N en calle Juárez y E-W en calle Vicente Guerrero, Santa María Nativitas.	74
<i>Figura 22.</i> Tomografía de resistividad eléctrica TRE 01.....	75
<i>Figura 23.</i> Tomografía de resistividad eléctrica TRE 02.....	75
<i>Figura 25.</i> Árboles con inclinación en laderas de terrazas.....	88
<i>Figura 26.</i> Mecanismos de agrietamiento en zonas de transición.	92
<i>Figura 27.</i> Mecanismo de propagación de grietas.	93
<i>Figura 28.</i> Hundimiento en el canal, cerca del embarcadero Zacapa-Nativitas.	93
<i>Figura 29.</i> Hundimiento regional de la Cuenca de México.	97

ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1.</i> Población de Xochimilco a través de los últimos 25 años. <i>Realizada con información del INEGI</i>	9
<i>Gráfica 2.</i> Temperaturas registradas en las estaciones meteorológicas de la UNAM y del SMN, a través de los años (de 1953 a mediados del 2017) en Xochimilco, Ciudad de México.....	12
<i>Gráfica 3.</i> Precipitaciones registradas en la estación meteorológica de la UNAM y del SMN, en Xochimilco, Ciudad de México, a través de los años (de 1953 a mediados del 2017).....	13
<i>Gráfica 4.</i> Evaporaciones registradas en la estación meteorológica del Servicio Climatológico Nacional en Preparatoria No. 1 “Gabino Barreda”, Xochimilco, Ciudad de México a través de los años (de 1953 a mediados del 2017).....	14
<i>Gráfica 5.</i> Hidrógrafo de pozo San Lorenzo Atemoaya 2.	69
<i>Gráfica 6.</i> Hidrógrafo de pozo Noria 7.	69
<i>Gráfica 7.</i> Hidrógrafo de pozo Nativitas 2.	70

Resumen

Una de las principales comunidades de la Ciudad de México que abastecen de agua potable a la población de esta urbe, y que, posee gran cantidad de pozos profundos, es Santa María Nativitas, Xochimilco, donde se realizó el análisis hidrogeológico.

Debido a afectaciones tales como hundimientos diferenciales y fracturamiento que se presentaron en las casas – habitación y que se vieron agravados después del sismo del 19 de septiembre del 2017, se consideró el estudio enfocado en los datos piezométricos y estructurales para la determinación de cambios en el subsuelo.

Este trabajo comprende actividades de campo, recopilación bibliográfica y procesamiento de datos con ayuda del software libre QGIS, para con ello elaborar mapas, correlaciones e interpretaciones que faciliten la integración de la información y permitan la realización de un modelo conceptual final.

Se realizaron visitas a la región afectada en dos ocasiones, antes y después del sismo donde se recorrieron las calles y casas afectadas y se obtuvieron datos geotécnicos.

Se intentó medir el nivel estático y dinámico de 7 pozos en la región, sin embargo, no contaban con la infraestructura necesaria, además se incorporó al trabajo, dos secciones de tomografías de resistividad eléctrica (N-S y E-W) con espaciamiento entre electrodos de cada 10 metros, y a una profundidad de 100 m.

El área de estudio muestra transición súbita entre basalto y material lacustre, en ocasiones se tiene una capa de arenas muy delgada, por lo que se pueden observar pendientes abruptas, además la sobre explotación de los acuíferos de la región aunada al cambio climático que ha afectado la recarga de estos, y el reacomodo de los sedimentos después del temblor, han creado vulnerabilidad en el subsuelo y problemas estructurales en las casas – habitación.

PALABRAS CLAVE: Santa María Nativitas; Xochimilco; Hidrogeología; Hundimiento diferencial; Acuíferos; Pendiente abrupta.

Abstract

The hydrogeological study area of this work is Santa Maria Nativitas, Xochimilco that is a community of Mexico City where there are several wells that supply fresh water to this city.

The houses have problems such as differential subsidence and fracturing soil and they aggravated after the earthquake of September 19, 2017. This analysis was made with piezometer and structural data and parameters for the determination of changes in the subsoil.

The work includes field activities, bibliographic compilation and data processing with free software QGIS, with this software we made maps and correlations and interpretations that facilitate the integration of information and allows to elaborate a final conceptual model.

We visited to the affected region two times, before and after the earthquake, when we saw affected streets and houses and we get valuable geotechnical data.

The work checked seven wells near to study region, but they cannot measure because they do not have the infrastructure, besides electrical resistivity tomographies were included in this work (N -S and E - W) with electrode spacing of every 10 meters, and depth of 100 meters.

The study area shown a sudden transition between basalt and lake material, in somewhere there are very thin sand layers, so that we can see abrupt slopes, besides that overexploitation of the region's aquifers with climate change. All of them have affected the recharge of these, and the rearrangement of the sediments after the earthquake, they have created a vulnerability in the subsoil and the structural problems in the houses.

KEY WORDS: Santa María Nativitas; Xochimilco; Hydrogeology; Differential sinking; Sinkholes; Aquifers; Abrupt slop.

Introducción

Los sismos ocurridos en septiembre del 2017, principalmente el acontecido el 19 de septiembre, ocasionaron grandes afectaciones en el estado de Morelos, estado de México, Ciudad de México y otros estados.

Santa María Nativitas, es una comunidad de Xochimilco que se vio muy afectada por dicho movimiento, sin embargo, ya presentaba fracturas con una orientación preferencial en casas habitación desde antes de este hecho, las cuales eran atribuidas a la extracción de agua, esto dio pie para realizar estudios de la zona, los que, se continuaron después del sismo. Con estos datos se puede tener información útil para la localidad sobre la situación geológica en la que se encuentra la zona y con ello establecer fundamentos técnicos y bases para la futura reconstrucción de las casas.

En esta tesis se contemplan diversos factores que pueden influir en el hundimiento diferencial, y se considera especialmente la hidrogeología y la geología local. El estudio fue organizado en dos etapas, en las que se contó con apoyo de un comité representativo de la comunidad, de personal de la UNAM y del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) cuyo responsable fue el Ing. Rogelio López Ramírez, subjefe de la oficina regional Xochimilco. La primera etapa se realizó para identificar los factores que influyeron en las grietas iniciales, se planeó desarrollar pruebas de bombeo y estudios geofísicos. En la segunda, se recorrió la zona, para inspeccionar los lugares visitados anteriormente en busca de variaciones, y de denotar nuevas afectaciones provocadas por el hundimiento diferencial asociado al sismo.

El trabajo se limita a dar recomendaciones con base en la geología e hidrogeología, con lo que se dará sustento a futuras estudios, sin embargo, son necesarias de discusiones interdisciplinarias para obtener mejores resultados.

Objetivo

Este estudio tiene como propósito precisar los factores que influyeron en el fracturamiento anterior al sismo del 19 de septiembre, así como ubicar las estructuras geológicas secundarias causadas por el evento septembrino para conocer el efecto ocasionado por el comportamiento hidrogeológico en la zona de Santa María Nativitas, Xochimilco.

Para alcanzar el objetivo propuesto fue necesario, establecer características geológicas de la zona de estudio, incluida la estratigrafía, geología estructural y geomorfología. Así como, realizar la caracterización hidrogeológica del acuífero de Xochimilco en su porción central.

Estas actividades se apoyaron con la identificación, distribución y clasificación de los sistemas de fracturas, grietas y todo tipo de estructuras geológicas originadas antes y después del sismo del 19 de septiembre del 2017.

Como objetivos específicos se consideran:

- Delimitar zona de mayor afectación tras el sismo.
- Censar pozos del acuífero y en los alrededores del sitio afectado.

Los sismos

En septiembre del 2017 se presentaron dos sismos de magnitudes superiores a 7, que causaron afectaciones en los estados de Oaxaca, Puebla, Morelos,

Guerrero, Ciudad de México, Estado de México, entre otros, provocando afectaciones en los distintos puntos.

El primer sismo fue el 7 de septiembre a las 23:49:17 hora del Centro con epicentro a 1333 km al suroeste del poblado Pijijiapan en el estado de Chiapas, en el Golfo de Tehuantepec (*Figura 1*) y magnitud de 8.2 a 45.9 km de profundidad. Pese a que las zonas más afectadas por el sismo fueron en los estados de Oaxaca, Chiapas y Tabasco, también fue perceptible en el sur y centro del país. Dicho sismo alertó a la población ante un posible tsunami que posteriormente fue descartado. Se presentaron 4326 réplicas en los quince días posteriores, las de mayor magnitud fueron de 5.8 y 6.1 con diferentes epicentros, pero en el mismo plano de falla de 230 km de longitud.

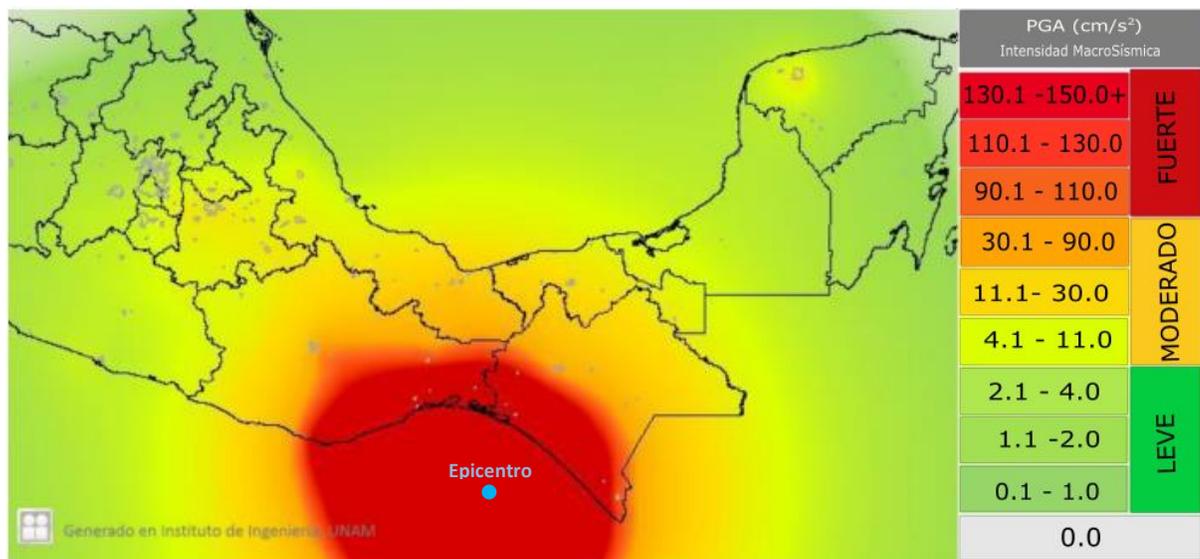


Figura 1. Epicentro e intensidad en zonas aledañas al sismo del 7 de septiembre 2017. Tomada de: *Reporte Especial: Sismo del día 07 de septiembre del 2017*, del Grupo de trabajo del Sismológico Nacional.

A través del mecanismo focal se infiere una falla de tipo normal con rumbo N41°W, echado de 84.8° y un desplazamiento de -94.7 metros. El sismo fue de origen intraplaca muy cerca del límite donde la placa de Cocos se subduce por debajo de la placa de Norteamérica. El Instituto de Ingeniería de la UNAM, igualmente, elaboró un mapa de intensidades donde se aprecia que las ciudades cercanas al Golfo de Tehuantepec presentaron mayores intensidades.

La segunda serie de vibraciones de magnitud 7.1, tuvo origen el 19 de septiembre a las 13:14:40 hora del Centro, con epicentro a 12 km de Axochiapan en el estado de Morelos, casi en los límites con el estado de Puebla y a 120 km de la Ciudad de México a una profundidad de 57 km. Las zonas aledañas al epicentro fueron las más afectadas principalmente en los estados de Puebla, Morelos y Guerrero, pero dejando estragos en otras regiones como la Ciudad de México. En el mapa de intensidades estimada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM se aprecian las mayores intensidades obtenidas en las estaciones sísmicas (*Figura 2*).

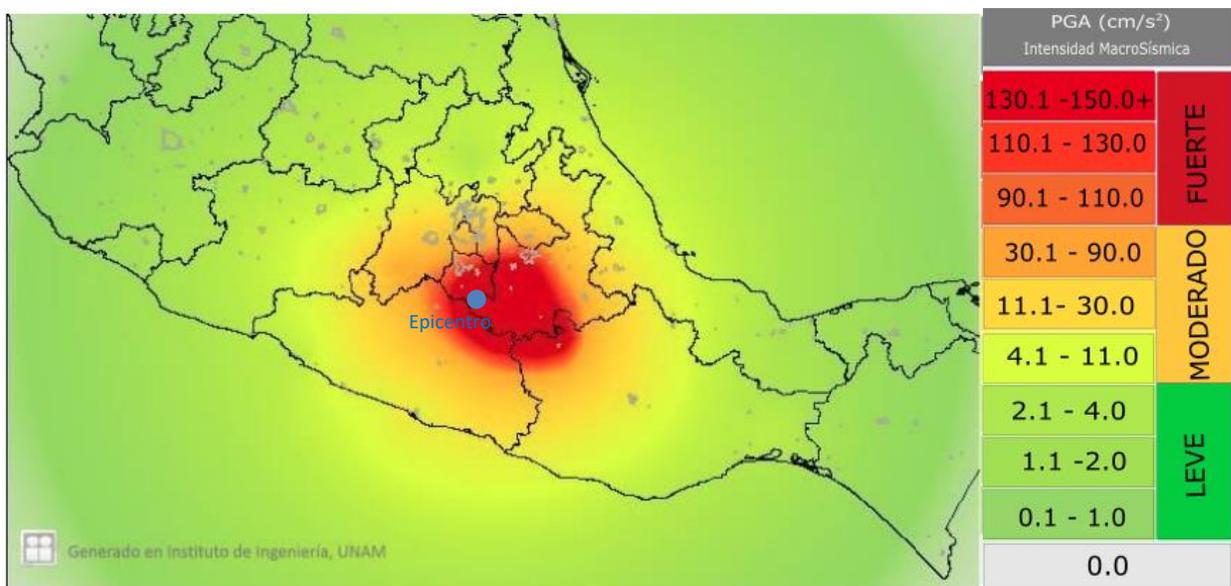


Figura 2. Epicentro e intensidad en zonas aledañas al sismo del 19 de septiembre 2017
 Tomada de: *Reporte Especial: Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1) del Grupo de trabajo del Sismológico Nacional.*

El mecanismo focal del sismo, obtenido del SSN, muestra una falla de tipo normal, con rumbo S22°E con echado de 46° un desplazamiento de -93 metros. Al igual que el sismo de días anteriores, todas las condiciones son típicas de un sismo intraplaca, que se presentó a consecuencia de la subducción entre la placa de Cocos y la de Norteamérica al SW del país.

En conjunto, los sismos habrían resentido y colapsado algunas estructuras pues las zonas afectadas eran coincidentes. Sin embargo, el principal causante de daños en la Ciudad de México, y en este caso en Xochimilco, fue el segundo evento sísmico pues por su cercanía con el epicentro, la intensidad fue mayor.

Generalidades

Localidad

Xochimilco se encuentra al sur de la Ciudad de México, y colinda con las delegaciones Tlalpan, Coyoacán, Iztapalapa, Tláhuac y Milpa Alta. Tiene una extensión de 12,517 hectáreas, de las cuales el 80% es área ecológica y el otro 20% es considerado área urbana.

La altitud promedio es de 2,240 m.s.n.m. y presenta elevaciones que van desde 2,420 hasta 2,710 m en los volcanes inactivos Teuhtli y Tzompole, y los cerros Xochitepec y Tlacualleli.

La zona de estudio en la que se enfocó el trabajo corresponde a la porción urbana de la comunidad Santa María Nativitas (*Figura 3*), al centro geográfico de la delegación Xochimilco. Topográficamente corresponde con la transición entre la zona plana de lo que fuera el antiguo lago de Xochimilco, también ya en zona urbana, y una pendiente suave que se vuelve abrupta hacia el sur.

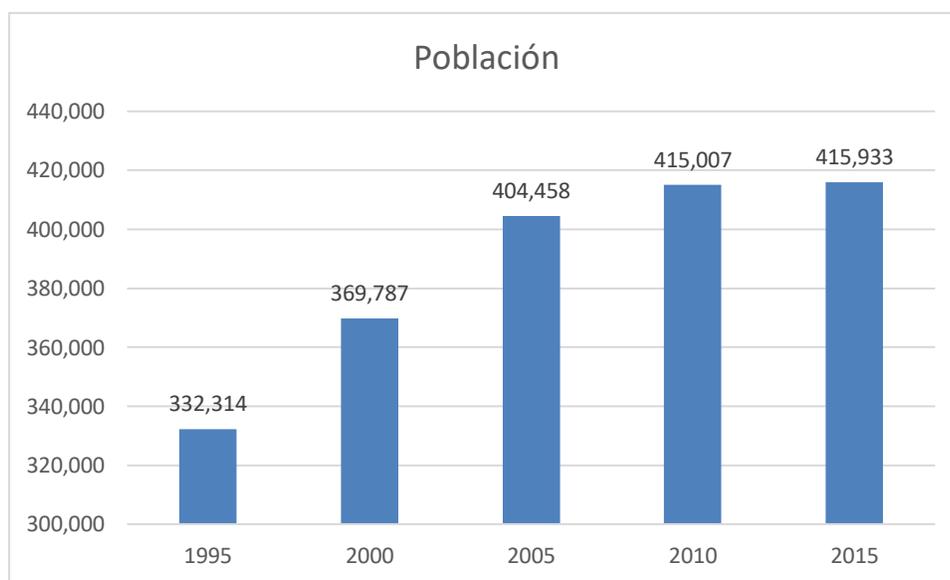


Figura 3. Localidad Santa María Nativitas, Xochimilco.
Google Maps 2018

Al norte se encuentra la carretera Xochimilco - Tulyehualco, número 113, que atraviesa la localidad de este a oeste, y los embarcaderos de trajineras, que además de ser patrimonio cultural, son de gran importancia en la economía del lugar.

Población

Con la información del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) se realizó la gráfica 1 de población de Xochimilco durante el periodo comprendido entre 1995 a 2015, con datos cada 5 años. En los primeros 4 años tabulados, se observa un incremento considerable en la demografía. En el último año, aunque la población siguió en aumento, la cantidad de acreción es considerablemente menor a la observada en anteriores años, algunas de las posibles razones que generaron dicha reacción fueron los programas de planificación familiar establecidos, la migración interna, entre otras condiciones.



Gráfica 1. Población de Xochimilco a través de los últimos 25 años.
Realizada con información del INEGI.

Clima

En general, según la clasificación de Köppen (1900), modificada por García (1988) para las condiciones de la República Mexicana, el clima de Xochimilco es templado subhúmedo con lluvias en verano (*Figura 4*), que presenta menores temperaturas hacia el sur, y diversos grados de humedad de norte a sur.

Santa María Nativitas presenta el mismo clima que el resto de la delegación, con humedad media y una pluviosidad cercana a los 800 mm por año.

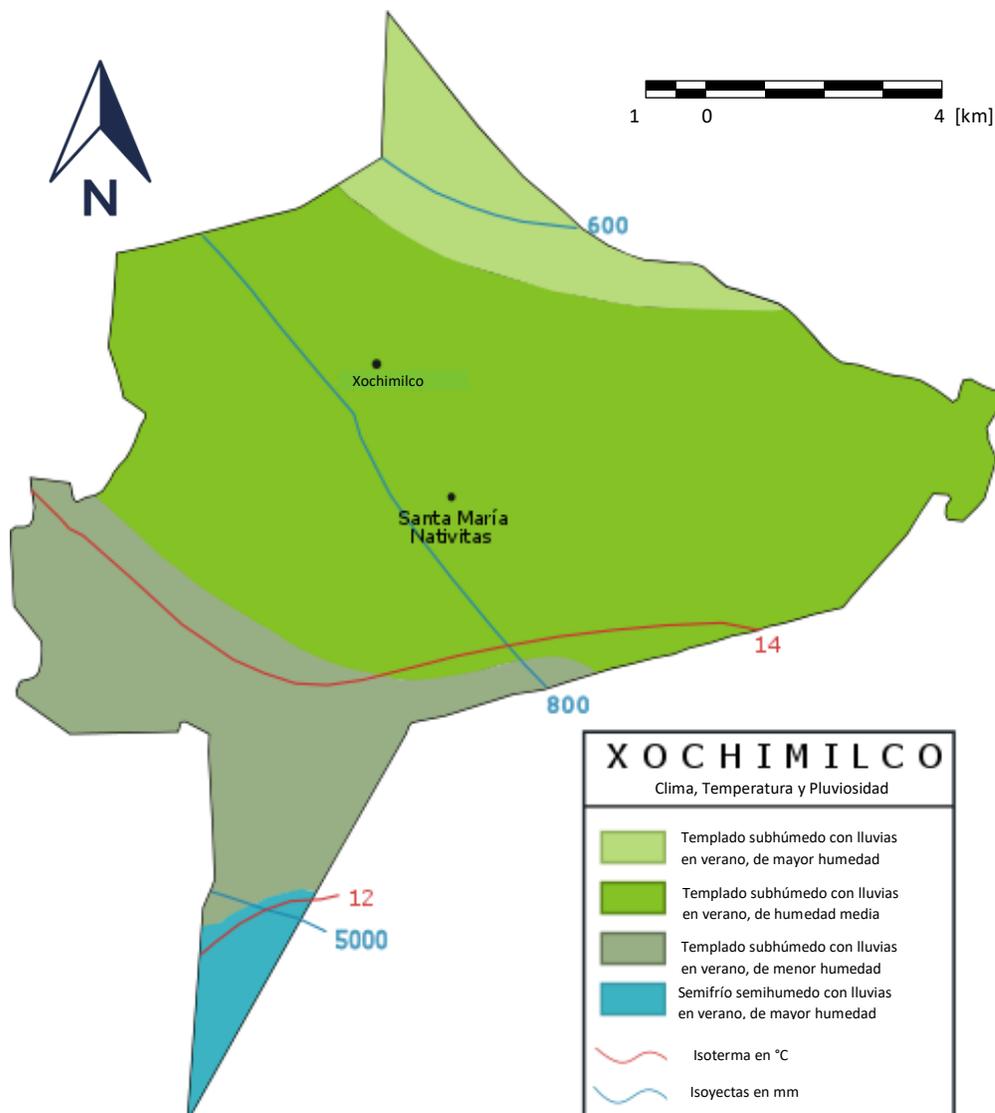


Figura 4. Clima de Xochimilco.

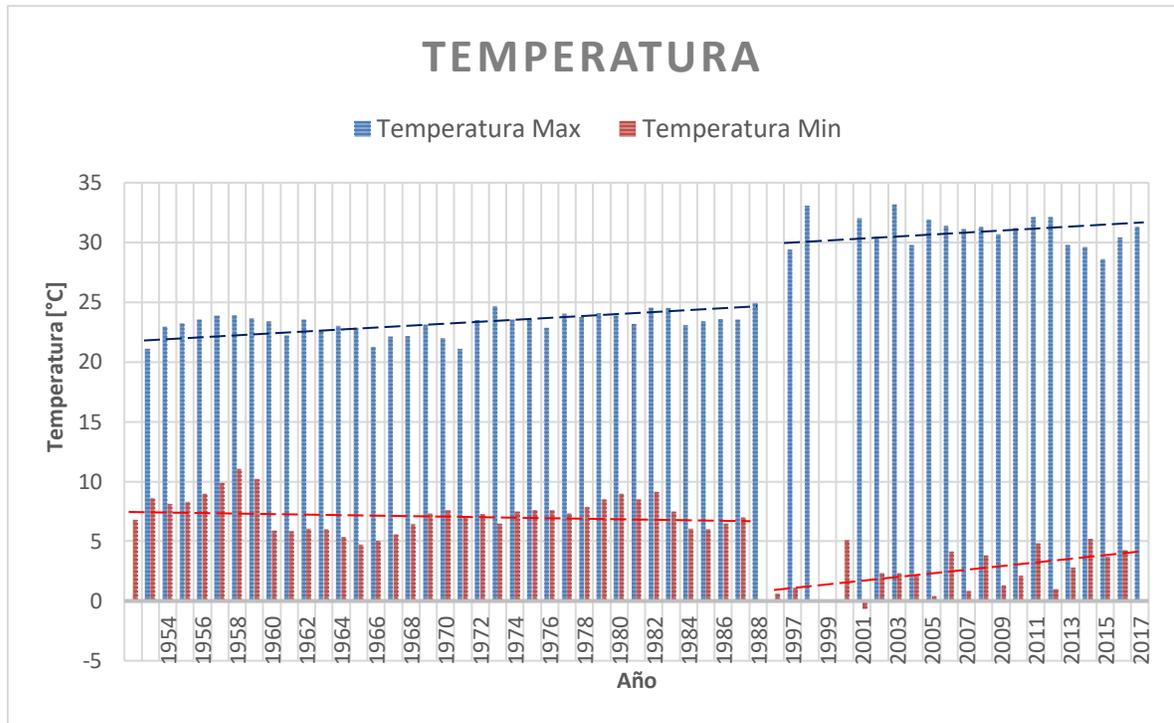
Tomado de Embarcadero Puente de Urrutia con aplicación de ecotecnias.

Temperatura

Aproximadamente a un kilómetro al noroeste de Santa María Nativitas se ubica la estación climatológica 9034 – Muyuguarda perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional, que es la más próxima a la zona de estudio, después de tener 67 años de servicio (43.8 efectivos), en 1988 suspendió sus actividades, por lo que ese año del registro es el más actualizado.

La Universidad Nacional Autónoma de México tiene diversas estaciones, la más cercana al área de estudio, aproximadamente a 6 km, de igual manera al NW, se encuentra en la Escuela Nacional Preparatoria No. 1 “Gabino Barreda” el que comenzó su actividad a finales de 1996 y hasta la fecha se mantiene en operaciones, suspendiéndolas durante 1999 y principios del 2000.

Al conjuntar y normalizar ambas bases de datos se percibe que las temperaturas ahora son más extremas, pues de tener un intervalo entre las l máxima y mínima, de 12 °C en 1953, sólo 64 años después este parámetro fue de más del doble, con hasta 30 °C de diferencia entre dichas tendencias (*Gráfica 2*).

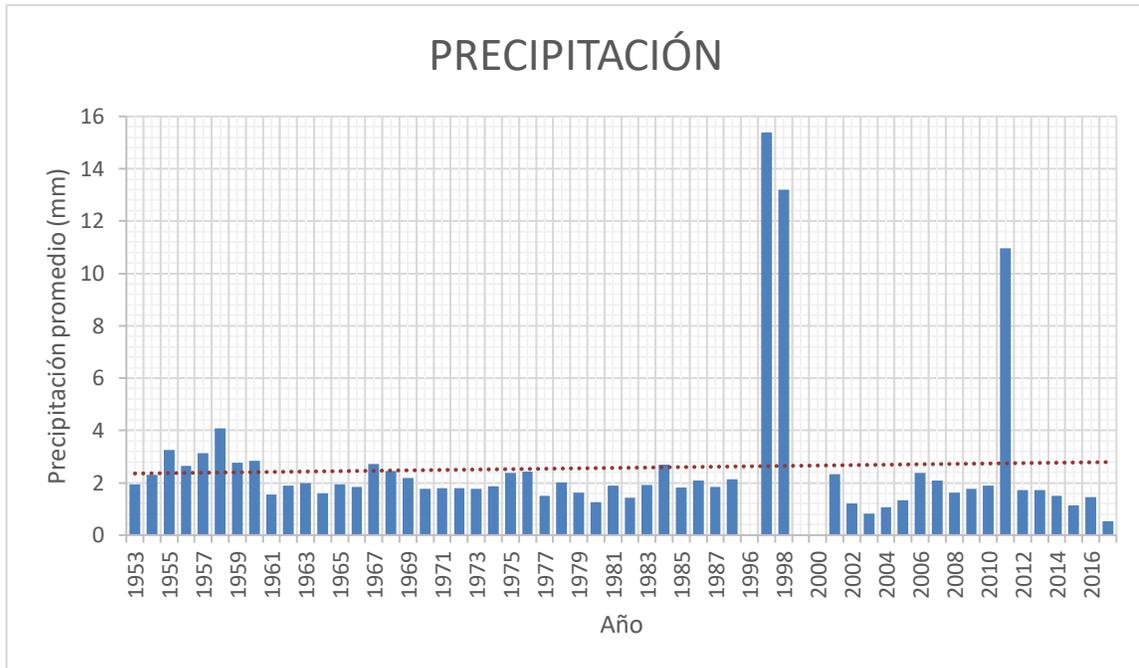


Gráfica 2. Temperaturas registradas en las estaciones meteorológicas de la UNAM y del SMN, a través de los años (de 1953 a mediados del 2017) en Xochimilco, Ciudad de México.

Precipitación

Con los datos recolectados de las estaciones meteorológicas pertenecientes a las instituciones antes mencionadas, de igual forma se pudo obtener la precipitación, la que se concentra especialmente durante los meses de junio a septiembre con lluvias intensas, y disminuyen o son nulas el resto del año. La línea de tendencia muestra un ligero incremento (Gráfica 3), debido a 3 años en los que acontecieron lluvias anormales, no obstante, se observan menores promedios en los últimos años.

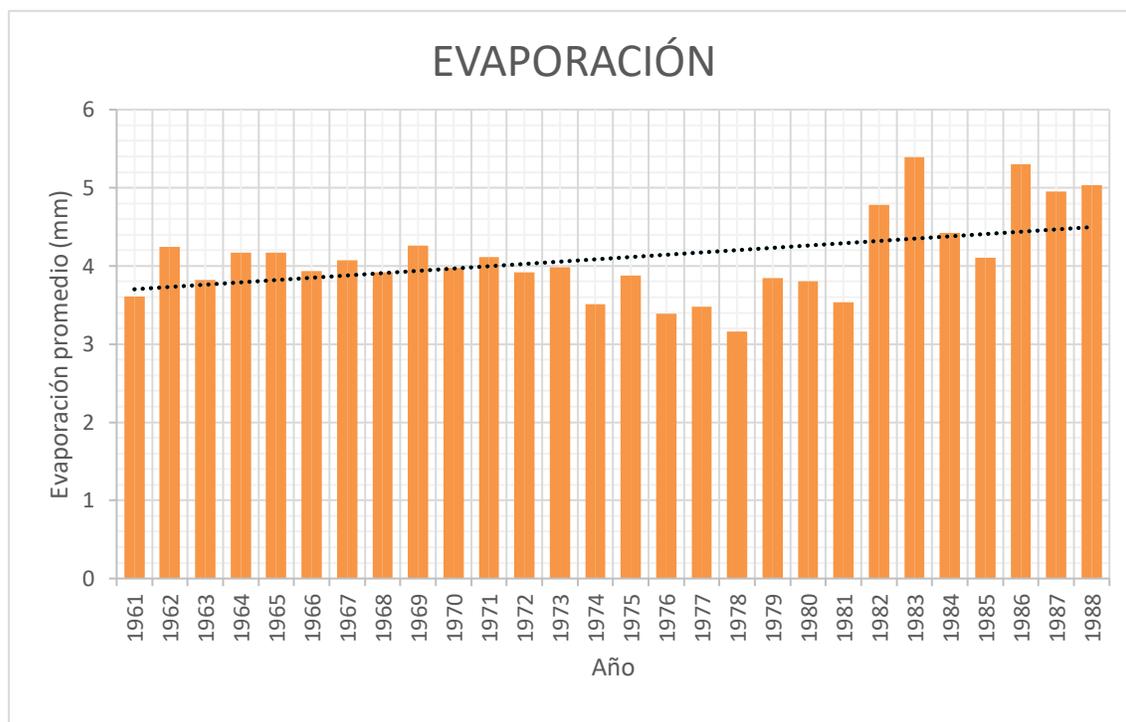
Esto a su vez se complementa con la información proporcionada por personas mayores que han vivido en la comunidad durante toda su vida, quienes mencionan la disminución considerable de la precipitación y que tienen como consecuencia, la reducción de la escorrentía por las laderas.



Gráfica 3. Precipitaciones registradas en la estación meteorológica de la UNAM y del SMN, en Xochimilco, Ciudad de México, a través de los años (de 1953 a mediados del 2017).

A partir de su base de datos, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (2007), reporta que la precipitación acumulada anual en Xochimilco fue de 838 mm en el periodo de 1951 a 1980, y durante el periodo de 1981 a 2007 se redujo a 681 mm, es decir, 17 % menos. En este último lapso, el 90% de la precipitación ocurrió durante los meses de mayo a octubre; además, para la temporada de estiaje (noviembre a abril), la precipitación media mensual fue de 13 a 11 mm, y para la temporada de lluvia (de mayo a octubre), de 118 a 100 mm (Navarrete, Jiménez, Navarro, Domínguez, 2013).

Por otro lado, los datos de evaporación se obtuvieron del Servicio Climatológico Nacional que sirven de referente a pesar de considerar un lapso corto. En la gráfica (*Gráfica 4*), se muestra la evaporación promedio anual con un ligero incremento en la evaporación, probablemente asociado al cambio de temperaturas, al crecimiento de la urbanización y construcción de casas, vías de comunicación, drenajes y otras obras. Para este parámetro no se contaron con datos recientes.



Gráfica 4. Evaporaciones registradas en la estación meteorológica del Servicio Climatológico Nacional en Preparatoria No. 1 “Gabino Barreda”, Xochimilco, Ciudad de México a través de los años (de 1953 a mediados del 2017).

El incremento demográfico, en conjunto con el aumento de temperatura, ha traído consigo una mayor demanda del recurso hídrico tanto para necesidades domésticas como para la pequeña agricultura en la zona y zonas aledañas, por lo que, al no haber suficiente precipitación y presentarse mayor evaporación, ejerce una mayúscula explotación del acuífero y disminuye su recarga.

Geología y geomorfología

La Ciudad de México está ubicada en una subcuenca a aproximadamente 2200 msnm, que se encuentra delimitada con numerosos aparatos volcánicos y sierras que van desde los 3490 hasta 5450 msnm por ello es una cuenca endorreica, ocupada anteriormente por el Lago de Texcoco (CIGSA, 2000).

A partir de evidencias geológicas, se estima que la cuenca antes de ser cerrada naturalmente por la erupción basáltica de la sierra Chihinautzin hace aproximadamente 600,000 años, drenaba hacia el Océano Pacífico. Según Mooser (1956), el basalto de olivino y piroxenos y la andesita basáltica creados por la actividad del grupo volcánico "Chichinautzin" fueron desplazados formando depósitos lacustres, esto se complementó con los depósitos de la formación Tarango, integrados por arena con intercalaciones de lahares pumíticos.

La intensa actividad volcánica provocó la creación de capas duras de material volcánico que cubrieron, en forma de mantos, toda la cuenca. Adicionalmente, se experimentaron grandes periodos de sequía, que dejaron a la cuenca con un nivel muy bajo de agua. Se estima que la velocidad de depósito de estos sedimentos fue de un metro por cada cuatro mil años (Guevara, B., 2015). Esta sucesión de eventos formó una secuencia ordenada de estratos de arcilla blanda, separados por lentes duros de limos y arcillas arenosas, además de costras secas y arenas basálticas y pumíticas.

La geomorfología de la zona volcánica corresponde a formas irregulares de flujos de lava, conos volcánicos y otras formaciones volcánicas poco erosionadas, este relieve es conocido como malpaís. Mientras la zona de lago

que se encuentra al norte tiene morfología de llanuras lacustres, en dicha área se encuentran las chinampas.

Las rocas ígneas de composición basáltica, se encuentran preferentemente en bloques amorfos, pero también se distinguen cuerdas, surcos acordonados y otras formas caprichosas debidas al tipo de solidificación, además de presentar vesículas y oquedades, se encuentra ampliamente fracturada, siendo posterior al enfriamiento, principalmente generadas por procesos de compresión, y con apertura de hasta 2 m, estrechándose hacia la profundidad y en promedio 40 m de longitud (Enciso, 1994).

Con base en las cartas geológicas E14-A39 y E14-A49 del INEGI se realizó un mapa geológico del área de estudio y zonas aledañas (*Figura 5*).

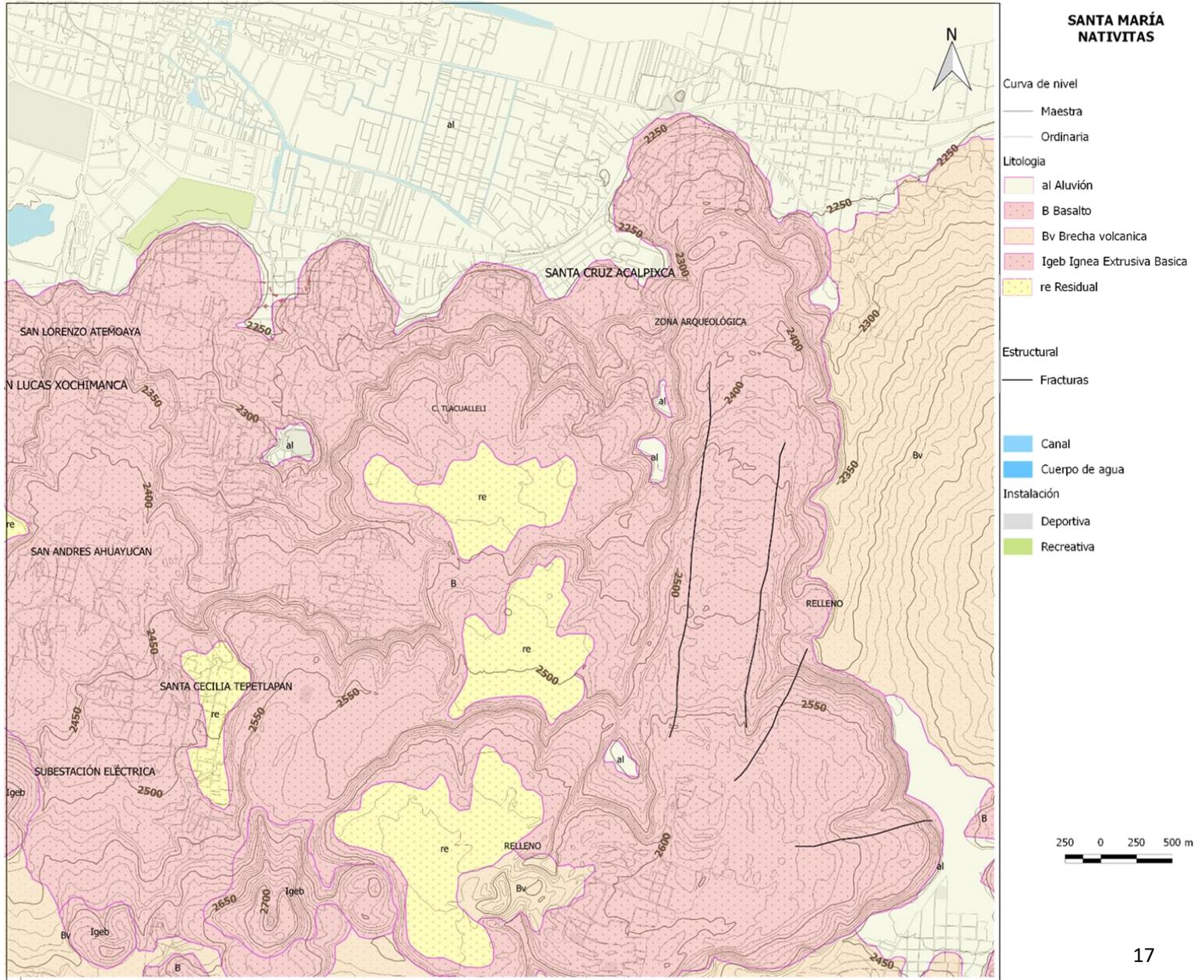


Figura 5. Mapa geológico de zona de estudio y zonas aledañas. Realizado con QGis a partir de cartas geológicas de INEGI.

Correlación estratigráfica

Mediante la gestión de representantes de la comunidad, fue posible obtener detalles constructivos de algunos de los pozos, así como sus cortes litológicos con lo que se logró realizar correlaciones estratigráficas y con ello conceptualizar el modelo geológico local.

Los pozos con los que se realizó la correlación estratigráfica fueron: Nativitas 3, Nativitas 2 y San Luis 20 (Figura 6), con 350 m y 1500 m de distancia entre ellos respectivamente. La ubicación de estos pozos es en la zona de transición.

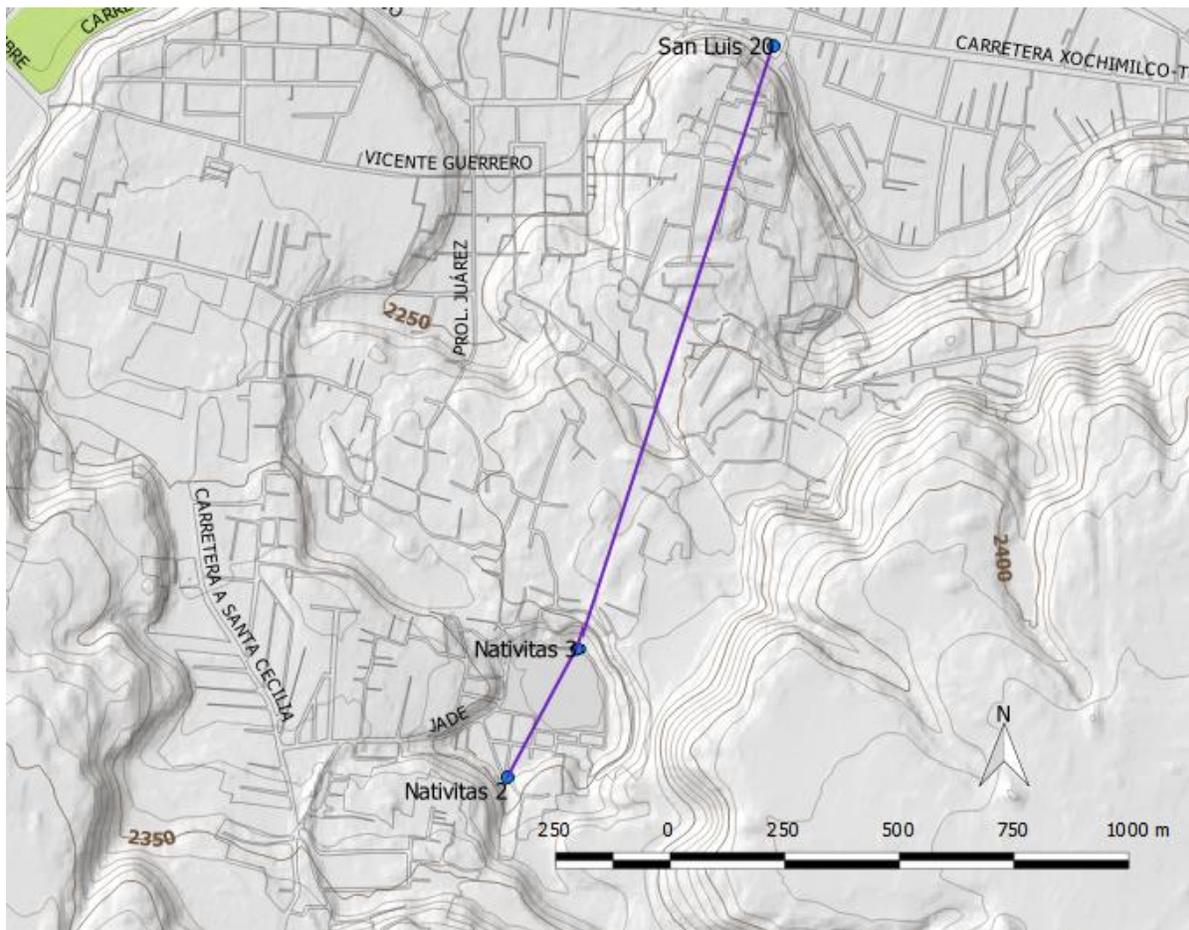


Figura 6. Localización de pozos de extracción Nativitas 2, Nativitas 3 y San Luis 20 y la línea de sección trazada para la realización de la correlación.

En la sección que está orientada suroeste-noreste (*Figura 7*), se observa que hay intercalaciones de rocas clásticas (arcilla e intercalación de arenas con gravas) con rocas ígneas extrusivas (basalto, ceniza y escoria), por ello se deducen episodios volcánicos, mientras la variación de granulometría se atribuye a periodos de cambio en el tirante de agua y energía del antiguo lago. Se presentan acuñamientos de las litologías en diferentes direcciones, debido a esto se consideran dos fuentes volcánicas principales. Cerca de los 80 m de profundidad, se observa un lente de arenas con grava, entre dos litologías ígneas. La discontinuidad entre las litologías crea pendientes muy abruptas, que se incrementan a mayor profundidad, principalmente entre los pozos Nativitas, y un cambio de pendiente muy notorio hacia el pozo San Luis 20. En esa misma zona, se observa mayor volumen de rocas ígneas pues es más cercana a la fuente principal de procedencia.

El nivel freático en la zona suroeste está localizado en la ceniza y en la zona noreste, asciende hasta llegar a una capa de arcilla.

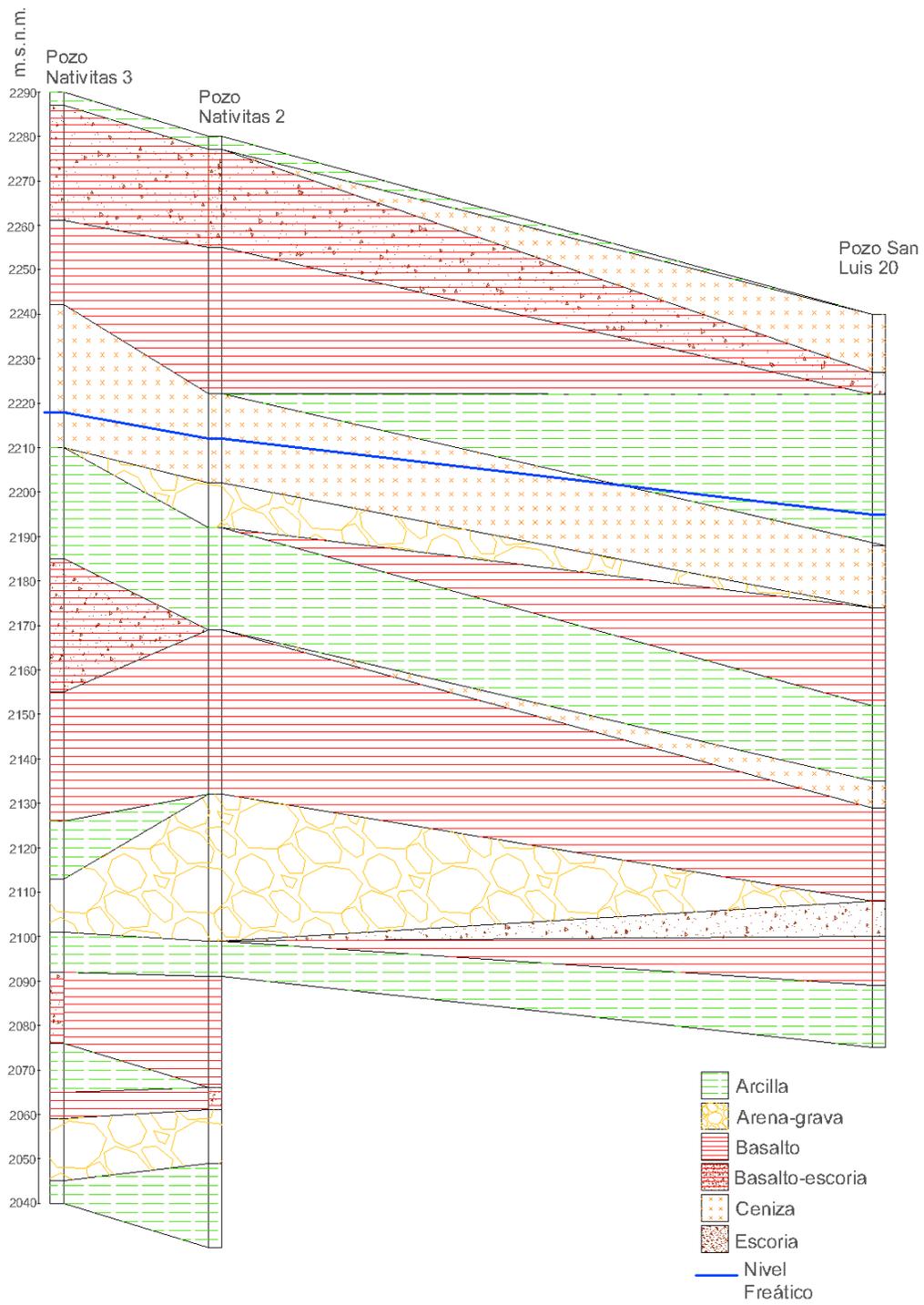


Figura 7. Correlación estratigráfica SW-NE en Santa María Nativitas, Xochimilco. Con base en los datos obtenidos de los pozos Nativitas 3 y 2, y San Luis 20.

En la estratigrafía anterior, se identifica de manera específica lo que sucede de manera regional en Xochimilco, pues su morfología contrasta desde la planicie lacustre hacia una abrupta zona serrana en la parte sur conformada por una serie de derrames basálticos, brechas y tobas que se presentan también en el subsuelo intercalándose e interdigitándose con materiales de origen lacustre; la interacción de ambas es a través de una zona de transición muy estrecha que finalmente juega un papel importante en el funcionamiento hidrogeológico y en su comportamiento geotécnico.

Además, topográficamente, la comunidad se localiza en la zona más baja de la delegación (*Figura 8*), y aunque su mayor parte se ubica en la zona de transición, también hay algunas áreas que se encuentran asentadas en zona volcánica y lacustre, además se observa un cambio de pendiente abrupto, claramente

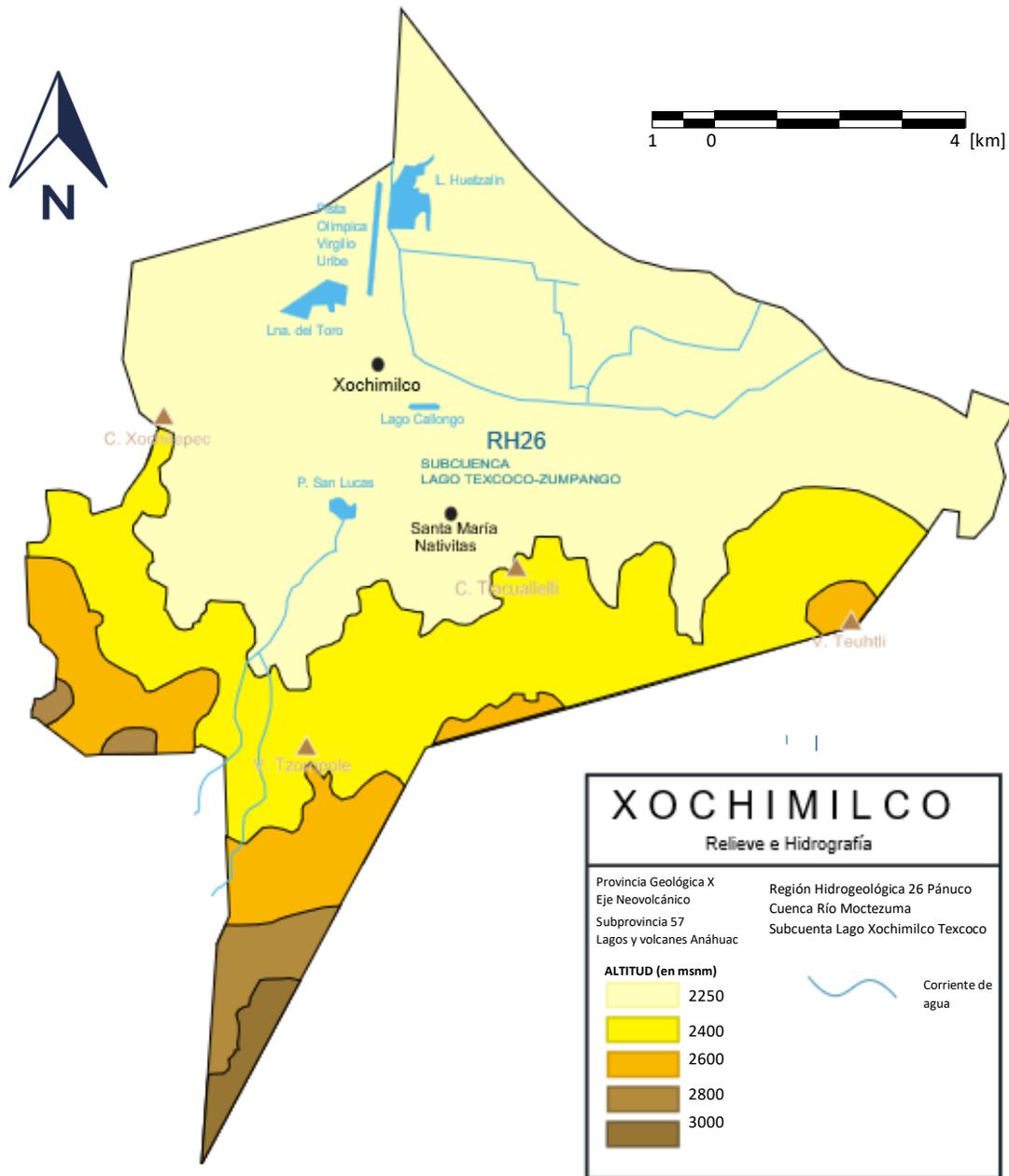


Figura 8. Relieve e hidrografía de Xochimilco, Ciudad de México.

Especifica algunas corrientes y cuerpos de agua.

Tomado de Embarcadero Puente de Urrutia con aplicación de ecotecnias

Debido a las condiciones litológicas y topográficas, la Ciudad de México se divide geotécnicamente en 3 zonas relacionadas con el comportamiento de parámetros sísmicos y las propiedades del subsuelo (Figura 9). Según esta

- c) La capa dura que separa las dos formaciones arcillosas.
- d) La formación arcillosa inferior con arcillas más consolidadas.
- e) Los depósitos profundos constituidos por materiales granulares.

Estratigrafía de la Zona de Transición

- a) Transición entre zonas deltaicas interestratificada con material aluvial y lacustre.
- b) Transición abrupta.

Zona de Lomas

- a) Está relacionada a materiales rocosos consolidados geotécnicamente estables. En el área de estudio corresponde con la zona de serranía y generalmente está exenta de problemas de consolidación del terreno y/o fracturamiento.

La Zona de Transición es el área geológica en la que gradualmente hay un cambio de litología, esto no es observable en el sitio de estudio, pues se interponen capas de basalto y sedimentos lacustres. Por ello se propone nombrar al área Zona Abrupta debido a la nula o delgada zona de transición.

La Zona Abrupta, es la zona que mayor atención atrae pues las mayores afectaciones se han dado en ella. Esta área, como se describió, se denomina de tal manera por la presencia de lacustres en contacto directo con los derrames basálticos, además de caracterizarse por una elevada pendiente, antiguamente, en la zona, se presentaban descargas naturales importantes de agua subterránea en el área de Xochimilco. El cambio drástico de una litología a otra con diferentes características trae consigo problemas que surgirán con el tiempo, sin embargo, al alterar el entorno de manera antropogénica o natural, trae como consecuencia la consolidación de los materiales lacustres y el rompimiento de la zona abrupta,

lo cual acelera los cambios en la roca, y trae afectaciones principalmente en las casas-habitación por el hundimiento diferencial. En la Ciudad de México existen diversas áreas con este rasgo (*Figura 10*).

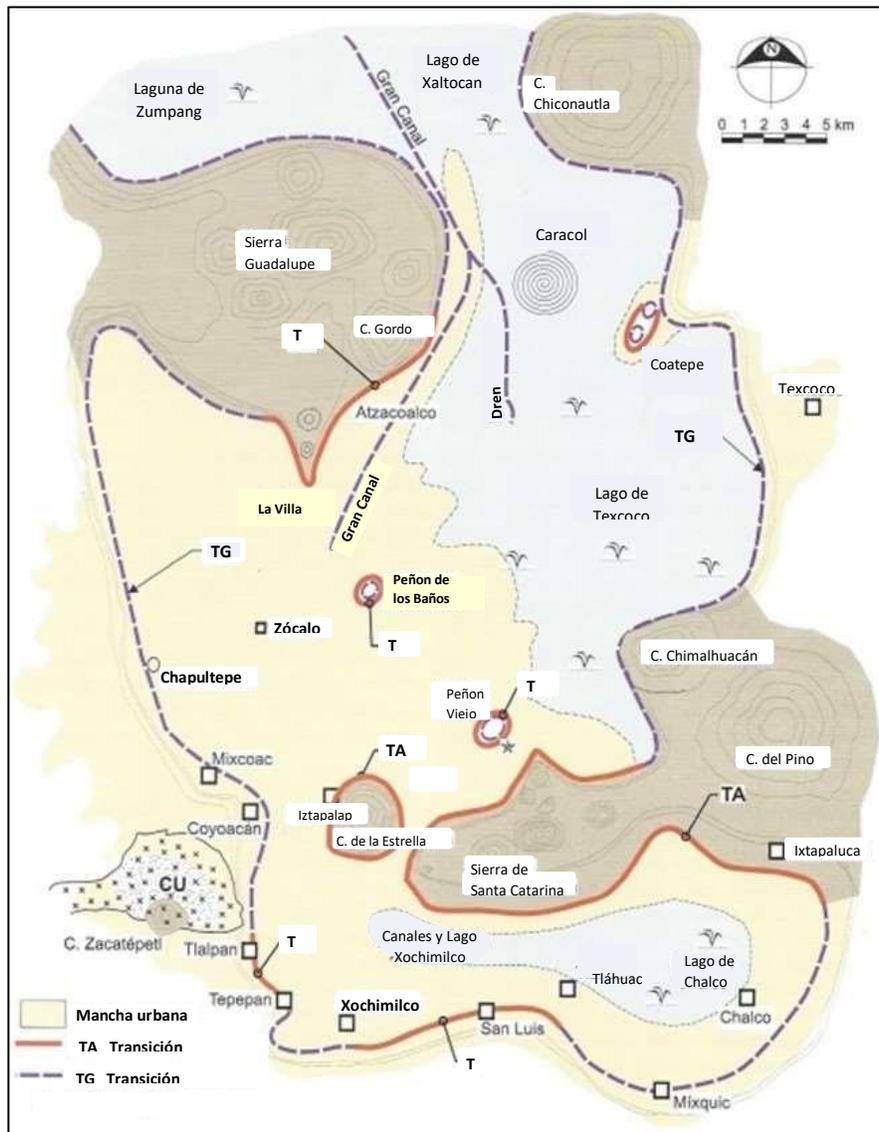


Figura 10. Localización de las zonas de transición abrupta.
Tomada de *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*, 2005.

El centro y la mayor parte de la Ciudad de México se emplazan en zona de lago, sin embargo, al sur, la presencia de material volcánico comienza a aflorar. Xochimilco presenta ambas morfologías, que se distinguen por la pendiente, la antigua vegetación nativa, presencia de agua y uso de suelo, pues a pesar de contar con pavimento y modificaciones antropogénicas, dichas características dan indicios del contacto litológico, además entre ambas zonas hay una diferencia de cerca de 800 m de elevación.

La zona lacustre de Santa María Nativitas, también conocida como chinampera, ha sido rellenada en diversas ocasiones tratando de prevenir inundaciones, sin embargo, este desastre no ha podido ser totalmente solucionado, pues diversos factores influyen en ello. El principal, no es de índole geológico, pues se debe al mal abastecimiento de los canales.

En la zona abrupta de la comunidad, anteriormente, se registraron hundimientos de distinto tamaño, los que no presentan un patrón determinado, aunque principalmente surgieron en la zona de transición y en la lacustre, con una profundidad de hasta 5.30 m y diámetros de 70 cm. Estas geometrías, tienen distinto origen, el principal se atribuye a la extracción de agua continua y excesiva, y el segundo motivo se debe a la fuga de agua de las tuberías que debido a la fuerza que ejerce el agua sobre la roca, abre cavernas, en ambos casos al no haber material que sostenga la parte superior, se provocan los colapsos. Uno de estos hundimientos, tuvo lugar en el canal, cerca del embarcadero Zacapa-Nativitas, de aproximadamente 3 m de longitud, por el que se infiltró el agua, y dejó seca una parte del canal. Como ese caso, se han presentado más en la zona de la carretera Tulyehualco – México, con diferente tamaño y profundidad, y otras ocasiones, además del hundimiento se observan inclinaciones hacia el norte (*Figura 11*)



Figura 11. Hundimientos en la carretera Tulyehualco – México.
Tomada de: Informativo Anáhuac. Por Daniel Flores. Enero 17, 2017

Afectaciones anteriores al sismo

Al realizar una primera visita de campo, se observaron fracturamientos y hundimientos en los pisos y los muros de las casas. En las siguientes fotografías se presentan gráficamente los datos de ubicación y mediciones obtenidos de las fracturas en las casas – habitación visitadas.

Las fracturas que están rellenas de manera antropogénica o por sedimentos muy recientes están señaladas en las tablas como Aperturas*.

Casa 1		
Coordenadas	14Q 0490111	UTM 2127545
Dirección	Camino Viejo a San Lorenzo No. 5-2, Colonia: Pueblo de Santa María Nativitas	

DATOS ESTADÍSTICOS

La casa está ubicada en la parte baja del cerro, zona donde comienza la inclinación con 9°.

No.	Rumbo	Salto [cm]
1	NW 22°	1
2	NW 26°	-----
3	NW 28°	-----
4	NW	-----
5	NW 74°	-----



Fotografía 1.
Calle Camino Viejo a San Lorenzo.

No.	Longitud [m]
1	1.27
2	0.46
3	1.2
4	1.01
5	0.7
6	0.72
7	1.67
8	1.23
9	0.25

No.	Apertura [cm]
1	2.5
2	3.5
3	3.3
4	4
5	3.8
6	4

DATOS SECUNDARIOS

Fracturas en la sala, en el piso

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NW 30°	7.2	1.7
2	NW 32°	2.8	2



Fotografía 2. Fractura en piso de la sala (izquierda) y habitación continua (derecha).

En la pared

No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	5.06	1.5



Fotografía 3. Fractura en la pared de la sala.

Fractura en el segundo piso en la pared de las escaleras.



No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	4	2.5

Fotografía 4. Fractura en la pared de las escaleras.

Fractura en el patio lateral

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	NW 35°	11.1	4.5, 3, 3.8



Fotografía 5. Fractura en el patio lateral de la casa

Fracturas en el patio delantero de la casa.

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NW 40°	12	3
2	NW 48°	2.5	1.5
3	NW 38°	1.6	2.5



Fotografía 6. Fractura en la pared exterior de la casa.

En la parte trasera de la casa hay un patio en el cual están presentes, sobre la pared, bloques de andesita con textura porfídica y un diámetro general de 1.25 [m]. no se sabe si son parte del basamento o rodados.

Casa 2		
Coordenadas	14Q 0490183	UTM 2127795
Dirección	Narciso Mendoza No.5 Esquina con Av. Benito Juárez, Colonia: Pueblo de Santa María Nativitas	

DATOS ESTADISTICOS

Cuadrante de 6.13 X 4.06 [m] (patio frontal de la casa). Fracturas dentro del cuadrante.

No	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]	Salto [cm]
1	NW 40°	2.15	0.6	-----
2	NW 70°	2.5	2	-----
3	EW	5.9	9.5	1.5
4	NW 40°	2.15	1.5	-----
5	NW 34°	1.2	2	-----
6	NW 80°	3.57	2.5	-----
7	NW 75°	5.9	7	-----
8	EW	3.7	3	-----
9	NW 80°	2.03	2	-----
10	NE 15°	1.04	2	-----
11	EW	1	2	-----
12	SW 72°	1.47	1.8	-----
13	NE 3°	1.6	2.5	-----
14	NW 45°	0.6	0.4	-----
15	NW 45°	1.72	4.5	-----
16	NW 4°	3.18	7	-----

NOTA: La fractura 3 es la fractura principal.

DATOS SECUNDARIOS

Fractura en la pared de la cocina

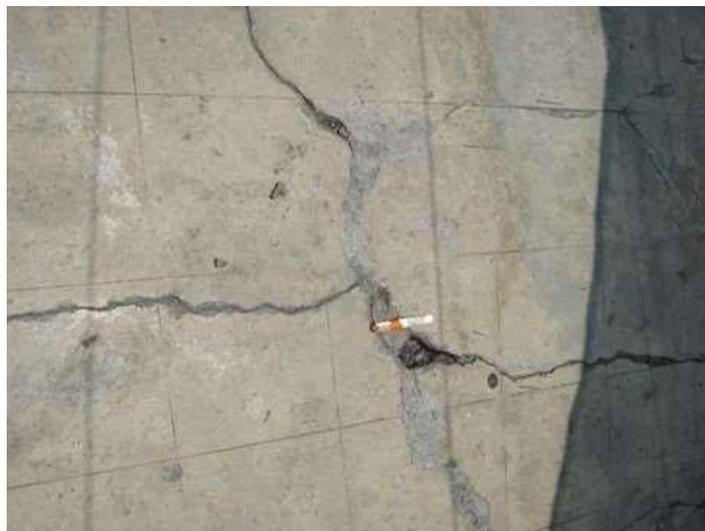
No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	2.6	0.5



Fotografía 7. Fractura en la pared de la cocina.

Fractura en el piso de la cocina.

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NW 45°	2.15	2.5



Fotografía 8. Fractura en el piso de la cocina.

Fractura en la pared de los cuartos.

No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	2.84	0.8



Fotografía 9. Fractura en la pared entre habitación y baño.

Fracturas en el piso del primer cuarto

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NW 69°	0.7	0.5
2	NW 25°	1.9	0.5



Fotografía 10. Fractura en el piso de cuarto.

Fracturas en el piso y la pared del segundo cuarto.

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	-----	2.65	1
2	-----	1.05	2.8
3	NW 30°	3.1	1.5



Fotografía 11.
Fracturamiento en el piso de la cocina y en la pared de la segunda habitación.



Fotografía 12. Fractura en el piso del patio.

Casa 3		
Coordenadas	14Q 0490106	UTM 2127545
Dirección	Av. Benito Juárez No. 23, Colonia: Pueblo de Santa María Nativitas	

Fractura en la fachada de la casa (banqueta).

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NW 80°	1.72	7.5



Fotografía 13. Fractura en la banqueta.

Fracturas en la pared de la oficina.

No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	3.14	3.5
2	2.17	0.1
3	0.52	5
4	0.35	2
	0.45	0.1
	0.36	0.1



Fotografía 14. Fracturas en la pared de la oficina.

DATOS ESTADISTICOS

Cuadrante de 4.10 x 3.80 [m] (sala)

Fractura general (1).

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NW 30°	3.19	0.4

Segmento No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	0.46	0.2
2	0.12	0.2
3	0.13	0.2
4	0.14	0.2
5	0.17	0.2
6	0.2	0.2
7	0.14	0.2
8	0.1	0.2
9	0.2	0.1
10	0.17	0.1
11	0.37	0.3
12	0.21	0.3
13	0.12	0.1
14	0.22	0.1
15	0.13	0.1
16	0.13	0.2
17	0.48	0.3
18	0.3	0.1

DATOS SECUNDARIOS

Fractura general del piso de la entrada de la sala.

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NW 54°	1.03	0.2



Fotografía 15.
Fractura en el piso de la sala.

Segmentos de la fractura

No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	0.1	0.1
2	0.36	0.1
3	0.23	0.1
4	0.1	0.1
5	0.34	0.1
6	0.23	0.1

Fractura en la pared de la sala.

No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	4	0.2



Fotografía 16. Fractura en la pared de la sala.

Fracturas en las paredes del Primer cuarto.

No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	2.5	0.5
2	0.7	0.4
3	0.45	0.1



Fotografía 17. Fractura en la pared de la habitación

Fracturas en las paredes del Segundo cuarto.

Fractura general en pared amarilla.

No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	2.6	0.4
2	1.07	0.4



Fotografía 18. Fractura en la pared de la habitación

Segmentos de la fractura

No.	Longitud [m]
1	0.57
2	0.48
3	0.6
4	0.45
5	0.24
6	0.16
7	0.24
8	0.23
9	0.33
10	0.06
11	0.38
12	0.14
13	0.28



Fotografía 19. Fachada principal de casa 3

Fractura en pared azul.

No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	1.07	0.4

Fracturas en la terraza.

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	SE 08°	2.96	2
2	SE 06°	0.76	
3	NW 7°	0.48	0.5
4	NW 60°	0.89	0.5
5	SE 02°	2.96	0.4
6	NW 70°	0.52	0.6
7	NE 25°	0.49	0.1
8	E-W	2.96	0.4
9	SW 06°	0.76	0.4
10	NW 17°	0.48	0.5
11	NW 60°	0.89	0.3
12	SE 02°	0.65	0.4
13	NW 70°	0.52	0.6
14	NE 25°	0.49	0.5

Fractura en la pared del Tercer cuarto.

Pared amarilla.

No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	2.67	0.5

Fractura en la pared de la escalera.

Fractura general: 4.90 m de largo, 0.6 cm de apertura

No	Longitud [m]
1	0.71
2	0.68
3	0.012
4	0.29
5	0.84
6	0.77
7	1
8	0.9
9	0.37
10	0.3

Fracturas en la pared de tabique, plata baja.

No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	3.33	0.1
2	1.15	0.2
3	0.9	0.2
4	1.13	0.2
5	0.57	0.3
6	0.45	0.2
7	0.4	0.2



Fotografía 20. Fractura en la pared de la fachada

Casa 4		
Coordenadas	14Q 0490157	UTM 2127835
Dirección	1ra Cerrada de Juárez, Colonia: Pueblo de Santa María Nativitas	

DATOS ESTADISTICOS

Cuadrante de 4.43 x 4.9 [m] (patio). Fracturas dentro del cuadrante:

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura [cm]	Escalón [cm]
1	NW 34°	2.78	2	5.5
2	SE 85°	1.66	2.2	2
3	NW 20°	0.55	2.5	1.5
4	SW 65°	0.5	1.5	-----
5	NW 27°	0.51	1	-----
6	NW 30°	2.66	0.5	-----
7	NW 25°	0.6	0.5	-----
8	SW 65°	0.43	0.8	-----
9	SW 25°	0.6	1	-----
10	NW 60°	1	0.5	-----
11*	NE 8°	2.5	4.3	-----



Fotografía 21. Fracturas en el piso del patio



Fotografía 22. Escalón de falla en el patio

DATOS SECUNDARIOS

Fracturas en la pared.

No	Longitud [m]	Apertura *[cm]	Salto [cm]
1	3.25	1	3
2	1.78	3.5	-----



Fotografía 23. Fracturas en la pared.

Fracturas en la cocina-comedor.

No .	Rumbo	Longitud [m]	Apertura [cm]	Salto [cm]
1	SE 88°	1.26	0.8	--
2	NS	1.5	1	-----
3	NW 36°	1.95	0.9	-----
4	NW 72°	1.45	0.3	-----
5	EW	0.65	1	-----
6	NW 70°	0.49	1.5	1
7	NW 2°	1.3	2	1.8
8	NW 80°	1.7	2.5	1
9	NE 25°	1.98	0.5	-----



Fotografía 24. Fracturas en el piso de la sala.

Fracturas en la pared detrás de la estufa.

No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	0.68	1.2



Fotografía 25. Fractura en pared detrás de la estufa.

Fracturas en la pared detrás de la alacena.

No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	0.64	0.3

Casa 5		
Coordenadas	14Q 0490431	UTM 2127895
Dirección	Vicente Guerrero No. 4, Colonia: Pueblo de Santa María Nativitas	

DATOS ESTADISTICOS

Cuadrante de 2.90 x 3.82 [m] (patio). Fracturas dentro del cuadrante

:

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura*[cm]	Escalón [cm]
1	SE 73°	1	1.5	1.3
2	SE 25°	0.83	0.8	0.7
3	NE 81°	1.81	2.5	0.5
4	NE 10°	1.7	0.6	-----
5	NW 60°	1.23	0.5	-----
6	NW 75°	0.5	0.7	-----
7	SW 70°	0.45	3	-----
8	EW	0.63	1	-----
9	NW 7°	2.9	3	5
10	NW 1°	2.9	7.5	-----



Fotografía 26. Fracturas en el patio de la casa.

DATOS SECUNDARIOS

Fracturas en el patio.

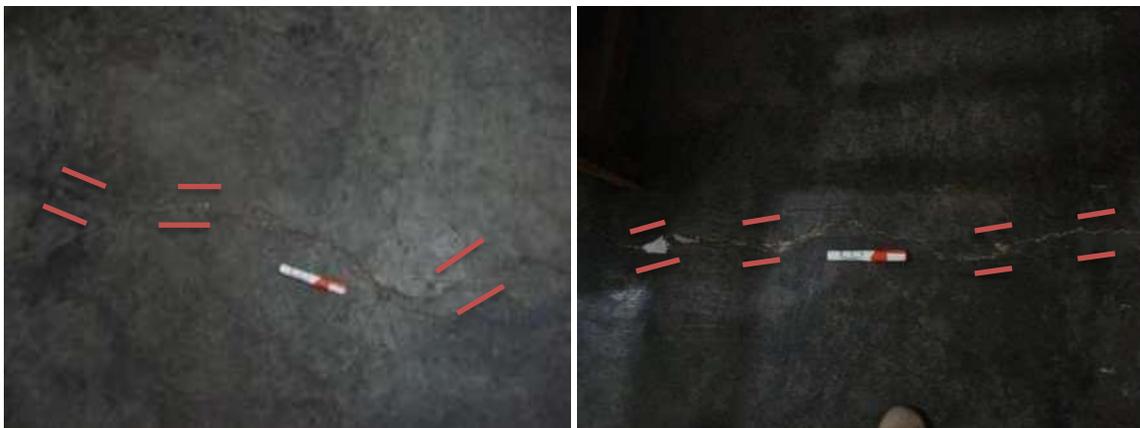
No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NS	0.37
2	NW 30°	1.25



Fotografía 27. Fracturas en el patio

Fracturas en el piso de la cocina.

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NS	1.6	2
2	NW 65°	1.46	0.6
3	NW 07°	1.07	1.3
4	NE 50°	0.72	1.2
5	NW 10°	1.25	0.9



Fotografía 28. Fractura en el piso de la cocina.

Fracturas en el consultorio.

NOTA: las fracturas 10 y 11 están cerca del televisor.

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NW 15°	4.2	4
2	NE 10°	4.1	0.7
3	EW	0.6	0.5
4	NE 55°	1.47	0.4
5	NW 15°	0.5	1.2
6	NW 30°	0.27	0.2
7	NW 55°	0.8	0.3
8	NW 5°	0.55	0.3
9	NW 35°	0.85	0.4
10	NW 40°	2.75	1.5
11	NW 65°	1.7	2.5



Fotografía 29. Fractura en el piso del estudio.

Fracturas en el piso de comedor.

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	NE 10°	1.7	1.6
2	NS	1.9	1.7



Fotografía 30. Fractura en el piso del comedor.

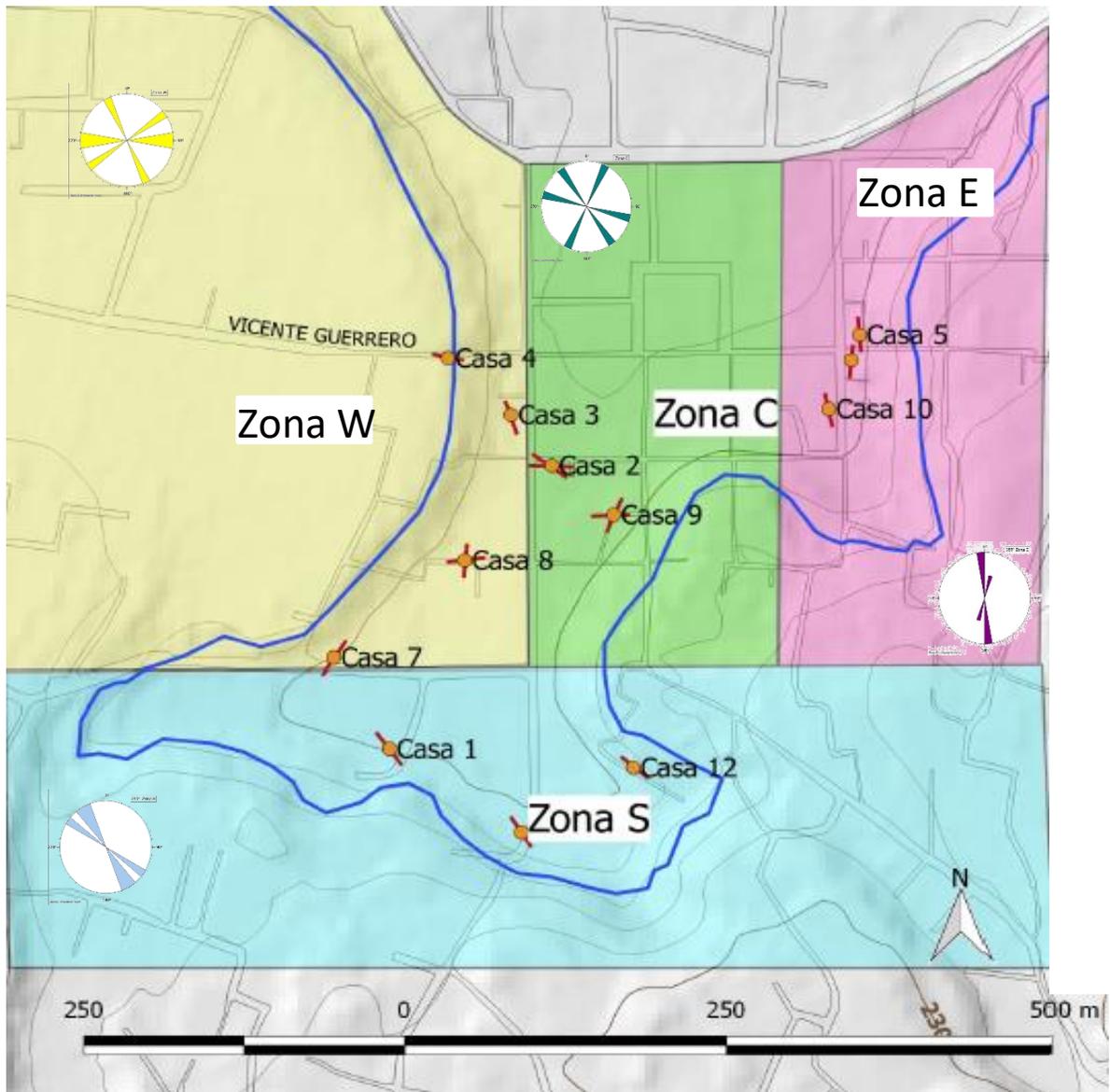
Fracturas en la pared del cuarto.

No .	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	2.78	0.1
2	1.15	0.1
3	0.44	0.2



Fotografía 31. Fractura en las paredes del cuarto.

De acuerdo a las tendencias y ubicación, se delimitó la comunidad en 4 principales áreas de acuerdo a la orientación preferencial (Figura 12). La división del área se realizó de manera visual, donde la línea azul representa la posible zona de contacto que contempla el cambio abrupto de pendiente, las pequeñas líneas en las casas muestran la orientación de las fracturas, y los diferentes espacios rectangulares de colores representan las zonas de tendencia estructural. A partir del análisis de los datos de campo y las áreas señalas, se realizaron rosetas y tablas:



La línea azul es el contacto entre unidades litológicas.

ZONA E

La zona se encuentra en áreas de basalto, de transición abrupta y en menor proporción en material lacustre.

Las casas con afectaciones se encuentran principalmente en la zona de transición.

Teniendo dos familias de fracturas (*Figura 13*), la más abundante tiene rumbo al N85°W.

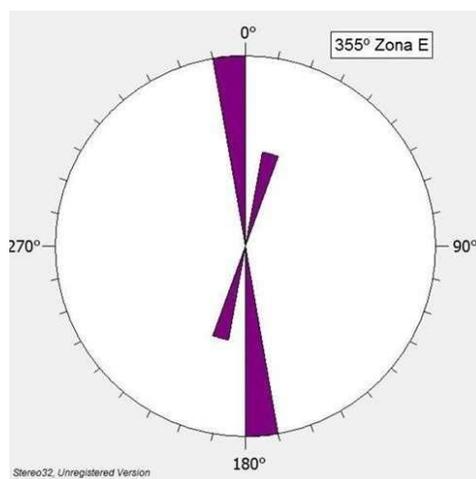


Figura 13. Roseta de la zona E.

Tabla 1. Fracturas en zona E.

ZONA	CASA	Fractura Preferencial (AZM)	Mayor longitud (m)	Mayor Salto (mm)	Mayor apertura (mm)	Cantidad de Fracturas
E	5	355°	2.9	5	7.5	29
	10	355°	5.09	0.8	6	69
	11	15°	6.50	11	10	27

ZONA C

El área está ubicada principalmente en la zona lacustre y al sureste se encuentra una zona de basalto, entre las que se localiza la transición.

No existe una tendencia general, pues las fracturas de cada casa tienen diferente disposición (*Figura 14*). En la casa 2, las fracturas tienen rumbo hacia el NW, mientras en la casa 9, el rumbo es hacia NE.

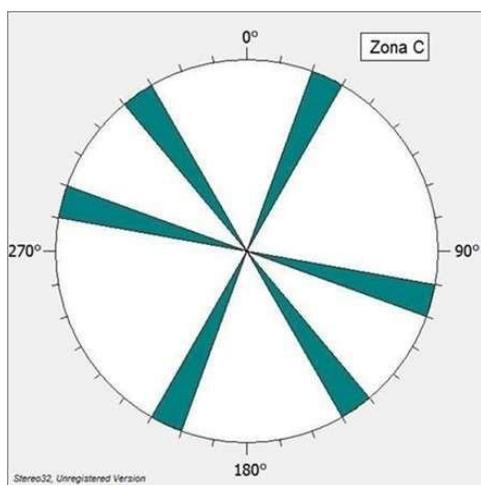


Figura 14. Roseta de la zona C

Tabla 2. Fracturas en zona C

ZONA	CASA	Fractura Preferencial (AZM)	Mayor longitud (m)	Mayor Salto (mm)	Mayor apertura (mm)	Cantidad de Fracturas
C	2	280° y 320°	5.9	1.5	9.5	20
	9	25°	3.47	2.2	3.5	24

ZONA S

En esta zona, se presentan bloques de andesita con textura porfídica y diámetro general de 1.5 m. No se sabe si son parte del basamento o rodados, pero se comenta que, al construir la casa, la predominancia era de dicha roca.

La tendencia general de las fracturas es hacia el NW (*Figura 15*).

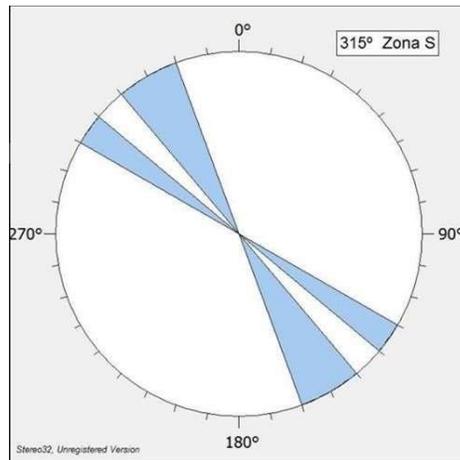


Figura 15. Roseta de la zona S

Tabla 3. Fracturas en zona S.

ZONA	CASA	Fractura Preferencial (AZM)	Mayor longitud (m)	Mayor Salto (mm)	Mayor apertura (mm)	Cantidad de Fracturas
S	1	330°	16.7	1	4	11
	6	325°	3.35	1.3	2.5	21
	12	305°	4.21	0.5	2.2	17

ZONA W

El área está situada en zona de transición y de material volcánico.

Las casas 4 y 8, a pesar de no ubicarse en las mismas condiciones litológicas, las fracturas tienen rumbos similares, próximos al Este franco. Las casas 3 y 7 se encuentran en la parte baja de la pendiente abrupta, y sus fracturas tienden a ser perpendiculares (Figura 16).

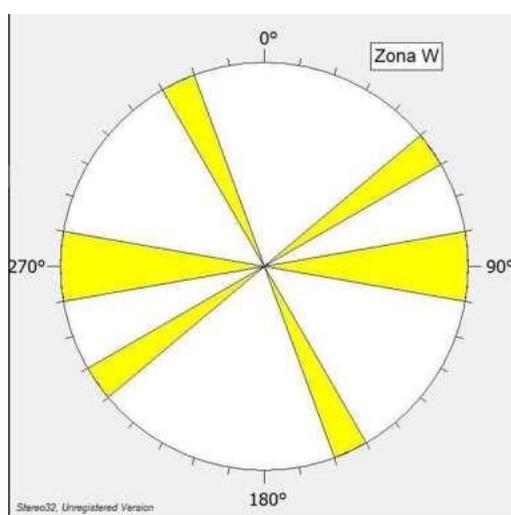


Figura 16. Roseta de la zona W

Tabla 4. Fracturas en zona W.

ZONA	CASA	Fractura Preferencial (AZM)	Mayor longitud (m)	Mayor Salto (mm)	Mayor Apertura (mm)	Cantidad de Fracturas
W	3	335°	3.19	0.3	0.4	17
	4	275°	2.78	5.5	2.5	20
	7	55°	3.72	1.02	2	17
	8	85°	6.35	0.5	5	13

A grandes rasgos, se observan las familias preferenciales del fracturamiento de las casas 1, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12 siguen la tendencia del contacto estimado entre los derrames de lava y los depósitos lacustres con las que se percibe que se originan por esfuerzos de extensión relacionado con la subsidencia del terreno. Dichas casas se ubican en las zonas de los deslaves. Las fracturas de las casas 3, 5, 10 y 11 tienen una tendencia N-S; y las de las casas 1, 6 y 12 la tienen NW-SE, por último, la casa 7, presenta fracturas que tienden al NE-SW. Mientras que las fracturas en las casas 2, 8 y 9, que se presentan en la zona baja y las de la casa 4, en la zona alta, presentan tendencia N-S y E-W que pueden estar asociadas a fallas o la morfología del basamento.

A partir de los datos obtenidos, se realizó una roseta general (*Figura 17*) que indica la tendencia de la zona. Se observan que la mayor frecuencia en la orientación de las fracturas es al NW-SE con tendencia al Norte franco.

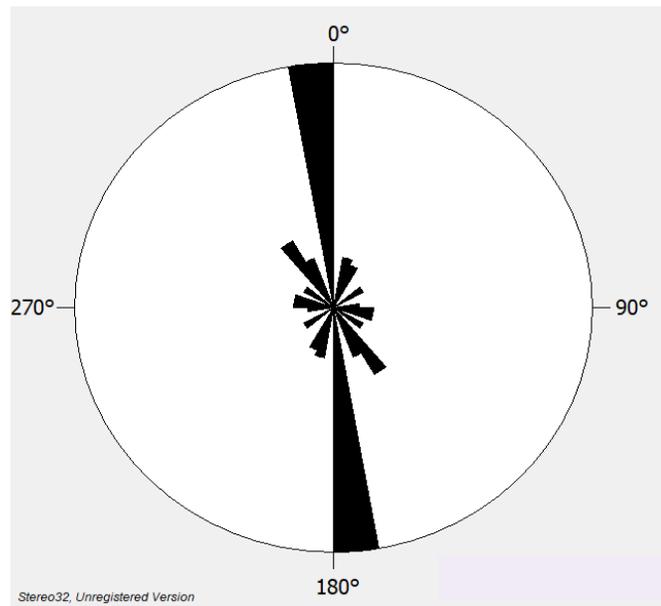


Figura 17. Roseta general de Santa María Nativitas.

Hidrogeología

La Ciudad de México se asentó en parte de la cuenca, lo que antiguamente era un sistema lagunar conformado por cinco grandes lagos: Texcoco, Tenochtitlán, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco-Chalco, y era una zona de alta precipitación y sin salidas naturales, que, por su elevación drenaban principalmente al lago de Texcoco. Esto desde un principio trajo problemas, pues edificar en toda esta zona se dificultaba debido a que el tirante de agua era de hasta 15 metros, sin embargo con ayuda de chinampas se pudo tener un crecimiento urbano, además Nezahualcóyotl mando a construir un acueducto y un dique (*El Albarradón*) que separara los lagos y fue una manera de prevenir inundaciones y evitaron que el agua salobre y dulce se mezclara, pues mientras el agua del lago de Texcoco, según Humboldt, tenía una salinidad similar a la del mar, el agua de Xochimilco era de excelente calidad para uso y consumo, debido a su composición ambas han tenido diferentes usos. El agua de Texcoco permitió que con la evaporación se aprovechara la sal, y la de Xochimilco ha sido empleada para beneficio de la ciudad, pero a medida que las necesidades de la ciudad han cambiado, se han modificado las cualidades del vaso lacustre.

El lago de Xochimilco se alimentaba del agua de los manantiales que bajaban de la sierra Chichinauhtzin y el volcán Teuhtli, pero a partir de 1930, cuando la necesidad de abasto de agua se presentó, estos se canalizaron para abastecer a la población de la ciudad aunado a la creación del Gran Canal de Desagüe que termino de desecar los vasos lacustres, así fue como Xochimilco sufrió la pérdida de su balance ecológico y por ende se vio limitada por el compromiso de los recursos hidráulicos en beneficio de las zonas urbanas, lo que provocó la desaparición de los manantiales y seguido de cambio en el nivel de los canales. Por ello, perdió gran área hasta que, en 1980, aguas tratadas

que bajan de la Sierra de las Cruces y de los alrededores de Tlalpan comenzaron a rellenar los canales que actualmente se conocen.

El acuífero de la zona sur del Valle de México ha sido dividido en tres subsistemas de acuerdo con su ubicación y tipo de roca que lo conforman: (1) Zona Metropolitana, que incluyen Xochimilco; (2) Valle de Chalco y (3) Ex lago de Texcoco. La sección que corresponde al acuífero que incluye la zona de Xochimilco, se encuentra constituido por materiales granulares de permeabilidad media y baja.

Los valores de profundidad del nivel estático (NE) obtenidos por la red de pozos del DDF, durante el mes de julio de 1991, con valores mayores entre 180 y 70 m, se localizan al oriente de la sierra de las Cruces, al sur de Xochimilco, y se deben a la topografía en los flancos de la sierra. (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaria General de Obras, DDF, 1992).

En 1998, la población de la ciudad había crecido en demasía lo que exigía mayor demanda de agua, pero debido al hundimiento que se ocasionaba en la zona centro, se redujo considerablemente la extracción en dicha área, y se explotó a una mayor velocidad el acuífero de la zona de Xochimilco, que para 1991 ya presentaba un abatimiento de 1 m pues de los 40 m³/s del agua subterránea que se extraía, cerca del 7 % provenía del acuífero de la zona de Xochimilco, lo que provocó en algunas zonas la subsidencia por la consolidación de arcillas superficiales con una media de 15 cm por año. Sin embargo, desde 1940, la extracción comenzó a intensificarse y como muestra de ello, fue la reducción, y con el tiempo desaparición, de los manantiales que recargaban los canales.

El subsuelo de la Ciudad de México se conforma de material granular, fracturado, compuesto de gravas y arenas intercaladas con productos volcánicos, y sobre el

acuífero encuentra material arcilloso, por ello funciona como acuitardo, de extensión natural regional, que presenta una baja permeabilidad de 10^{-7} a 10^{-9} m/s.

Según Ruvalcaba (2009), a nivel subterráneo, la Ciudad de México, se distinguen dos acuitardos y un acuífero:

Acuitardo superior: Está formado por depósitos lacustres del Cuaternario. Tiene un espesor medio de 20 m, mientras en la zona montañosa es de 2 m y se incrementa a 60 m hacia la planicie lacustre. Las arcillas funcionan como un acuitardo debido a su alta compresibilidad con gran cantidad de agua. Éstas confinan el acuífero principal subyacente bombeado, que transmite agua muy lentamente. El hundimiento se atribuye a esta condición. Anteriormente era explotado para abastecer a la ciudad. La conductividad hidráulica (K) varía de 0.0864 a 0.000864 m/d, con un coeficiente de almacenamiento (S) constante de 0.012.

Acuífero Principal: Tiene un espesor aproximado de 400 m, a partir de los depósitos lacustres del Cuaternario y su frontera inferior corresponde a la cima de la secuencia estratigráfica del acuífero profundo. Es de tipo confinado por las zonas montañosas y semiconfinado hacia la parte central de la planicie por el acuitardo superior. Se extiende en toda la planicie lacustre de Xochimilco hasta la zona montañosa del sur, se compone de las siguientes unidades hidrogeológicas:

- Depósitos aluviales del Cuaternario (Qal)
- Depósitos lacustres del Plioceno Inferior (Tpla)
- Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb)
- Rocas volcánicas basálticas-andesíticas del Plioceno Superior (Tpba)

Las rocas volcánicas se encuentran de manera somera en las sierras de Chichinautzin, Santa Catarina y el cerro de la Estrella.

Presenta una conductividad hidráulica (K) de 0.0001296 hasta 30.24 m/día y el coeficiente de almacenamiento (S) es constante e igual a 0.20. Se estima que a este acuífero se infiltran 119 millones de metros cúbicos al año (3.78 m³/s) y se extraen 140 millones de metros cúbicos (4.4 m³/s) por medio de 79 pozos.

El acuífero se ha estado explotando intensivamente por varias décadas.

Acuífero profundo: Subyacente al acuífero principal, está compuesto por rocas volcánicas estratificadas y fracturadas que son poco permeables debido a la compresión litostática, sin embargo, hay pozos que extraen agua de esta capa. Tiene espesor promedio de 200 m, contiene materiales volcánicos permeables. La conductividad hidráulica (K) es de 31.97 m/d y el coeficiente de almacenamiento (S) de 0.05.

Debido a que las condiciones naturales han cambiado y a la demanda intensiva de agua, cerca del 50 % de la población de la Ciudad de México no cuenta con el agua suficiente para satisfacer sus necesidades y por lo menos otras 40 colonias corren riesgo de inundaciones cada periodo de lluvia.

En la antigüedad, el brote de agua que surgía del subsuelo de la región de Xochimilco aportaba grandes volúmenes del recurso, ya que también se encuentra en una zona principal de recarga, por lo que generó dotación hasta para el abastecimiento del centro de la Ciudad de México, después de que ésta presentara hundimientos por la explotación local de sus acuíferos, debido a que la extracción de agua del subsuelo provoca siempre la consolidación de los estratos afectados a causa de que el peso sobre un cierto nivel es compartido por los sólidos y el agua (Hernández, 2003). El hundimiento que presenta Santa María Nativitas es similar al caso del centro de la ciudad.

A continuación, se exponen las bases teóricas que sustentan el fenómeno del hundimiento regional apoyándose con un modelo, conformado de un estrato drenado por su base y sometido a una pérdida de presión constante, el cual considera un depósito de arcilla compresible, homogéneo e isotrópico de espesor H , apoyado sobre un estrato de arena y sometido originalmente a una distribución hidrostática de presión (Figura 18). Supóngase que, por efecto del bombeo, en la capa permeable inferior se genera una pérdida de presión Δp , constante y que permanece inalterada la posición del nivel freático respecto a la superficie del terreno. A raíz de esta alteración del equilibrio, se inicia un proceso de consolidación en la formación compresible al transcurrir un cierto tiempo t . Durante un lapso amplio de extracción de agua, la distribución de presiones (abatimiento de presiones futuras), tiende a ser lineal con la profundidad. (Marsal, 1969 en García 2013)

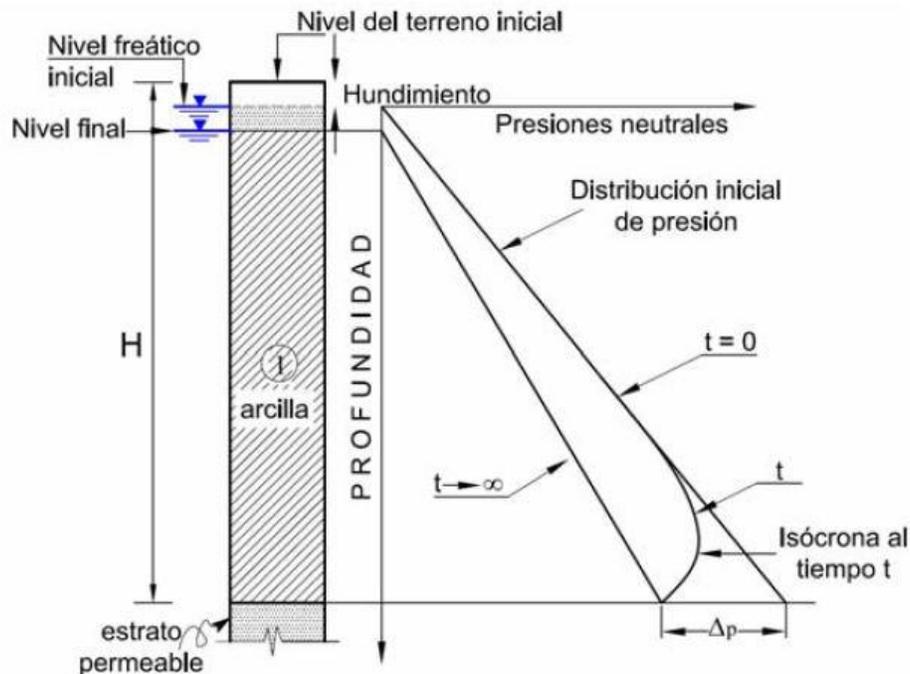


Figura 18. Distribución de presiones de poro durante proceso de consolidación provocado por un abatimiento Δp constante (Marsal y Mazari, 1959 en García, 2013)

De acuerdo con Marsal (2016), considerando un incremento medio de esfuerzos efectivos, el exceso de presión hidrostática media en el manto compresible, relación entre esfuerzos y deformaciones, y el hundimiento total por consolidación, se obtiene una ecuación que involucra únicamente las deformaciones del suelo causadas por la consolidación primaria:

$$\lambda = \frac{H}{1 + e_i} a_v \frac{\Delta p}{2} \left[1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T) \right]$$

Donde:

λ = hundimiento total

H = *espesor del manto de arcilla*

e_i = *relación de vacíos inicial*

a_v = *coeficiente de compresibilidad*

Δp = *Depresión*

$$M = \frac{\pi}{2} (2m + 1)$$

$$T = \frac{c_v t}{H^2}$$

m = *la serie de números naturales*

c_v = *coeficiente de consolidación*

t = *tiempo transcurrido*

Sin embargo, este tipo casos considera una columna de gran espesor de material compresible, por lo que no es totalmente aplicable a la zona de estudio, debido a que como se ha descrito anteriormente, existe un contacto de material lacustre con basalto que crea un comportamiento diferente.

Pozos de la región

En las cercanías de Santa María Nativitas se encuentran 7 pozos para la extracción de agua, de los cuales se obtuvo información deficiente en una inspección. A continuación, se describen:

Pozo Nativitas 1. El pozo no presenta equipamiento y tiene un ademe de 12" de diámetro y una profundidad de 200.54 m. Después de sólo 4 años de operación, en 1992, este pozo fue clausurado debido a que en sus cercanías se encuentra la escuela secundaria No. 250 que presentó daños visibles de fracturamiento, que motivó incluso un estudio de mecánica de suelos por la empresa denominada GEOTEC. Con lo que se concluyó que eran afectaciones a consecuencia de la subsidencia ocasionada por la extracción de agua de este pozo.

En los primeros 14 metros se encuentran sedimentos de origen lacustre, que anteceden a 126 metros de productos volcánicos, principalmente de basalto y tobas de espesores variables de 15 hasta 54 m; de los 140 a los 200.45 m hay productos sedimentarios, como arcillas, gravas y arcillas con arena, con una intercalación de los 147 a los 164 m de toba.

En el 2017, el nivel estático fue medido a una profundidad de 43.03 m. Debido a que es una captación monitoreada, se observó una recuperación después de que, en el 2010, fue de 59.1 m.

Pozo Noria 7. Pozo no sondeable por las condiciones del sistema, sin embargo, en el 2010, tenía un nivel estático de 65.5 m. Presenta tubería de descarga de 8". No fue posible determinar su caudal instantáneo en campo, pero se tienen reportes de noviembre del 2016 donde se registran 55 lps.

El pozo se encuentra con predominante material volcánico, en el primer metro y medio hay una delgada capa de ceniza, lo posterior se resume en grandes volúmenes de basalto con una ligera intercalación de una capa de arcillas de 8.5 m de espesor, que inicia a los 45.5 m de profundidad.

Pozo San Luis 19. No fue posible sondear para medir el nivel estático o dinámico. La tubería de descarga es de 8" y opera todo el año con un caudal de 29 lps. Por información verbal con base en la última medición de pozos, el nivel estático y dinámico es de 50 y 56 m, respectivamente. La cámara de bombeo se localiza a los 70 y 80 m.

El pozo tiene una profundidad de 101.20 m donde predominan el basalto después de los 9 m, y anterior a éste se encuentra una capa de cenizas y de escoria.

Pozo Nativitas 2. Sin acceso a pozo. Presenta un diámetro de descarga de 8", ademe de 16" y bomba sumergible. De acuerdo con SACMEX, el pozo tiene una profundidad de 250 m con nivel estático a 77.5 y dinámico a 79.8 m, El caudal registrado fue de 50 lps. Un informe actualizado recibido en noviembre de 2016 indica un caudal de 79 lps.

El registro litológico muestra que los primeros 3 m corresponden con material de origen lacustre, debajo se localizan derrames basálticos que en conjunto con escoria basáltica alcanzan los 54 m, desde esa profundidad hasta los 80 m hay presencia de ceniza, continua una capa de arcilla-arena hasta los 105 m, para proseguir con basalto-escoria y basalto hasta los 164 m, seguido de materiales lacustres que van desde arenas-gravas hasta arcillas-arenas alcanzando los 198 m, se continúa con basalto-escoria, que profundiza 214 m; arcilla-arenas y gravas

arenas hasta el final del pozo, con delgada capa de basaltos con espesor desde los 225 m hasta 231 m.

Pozo Nativitas 3 (Joya de Vargas). Sin acceso para realizar pruebas. El diámetro de descarga de 8" con bomba sumergible. Información del SACMEX indica una profundidad total de 250 m con niveles de 74.96 m y 76.5 m al nivel estático y dinámico, respectivamente. Se tiene registro de un caudal de 60 lps para noviembre de 2016 en una línea de descarga de 8". Datos de SACMEX indican que el corte litológico de este pozo corresponde de manera muy similar a Nativitas 2 hasta los 78 m, sin embargo, las capas presentes son más delgadas, además, la existencia de arenas es casi nula, sólo presentes en conjunto con las gravas, interdigitadas entre el material volcánico.

Pozo S-5 San Lorenzo Atemoaya. De acuerdo con el SACMEX cuenta con una profundidad total de 200 m y niveles de 114.8 m y 119.4 m de estático y dinámico, respectivamente. Cuenta con bomba sumergible, con tubería de descarga de 8" y de ademe de 16". Registró un caudal de 40 lps. Para noviembre de 2016, se registró un caudal de 65 lps.

El registro de corte litológico indica un material de origen arcilloso los 2 primeros metros y posteriormente un derrame de basalto hasta la profundidad total.

Pozo San Luis 20. Pozo no sondeable. El diámetro de la tubería de descarga es de 8" con bomba sumergible y ademe de 18". Opera con un caudal de 53 lps durante todo el año, abasteciendo a pipas mediante una garza. La profundidad total, de acuerdo con información de SACMEX indican que es de 165 m y está telescopiado a partir de los 60 m. Registró un nivel estático de 35.7 m y dinámico de 38.8 m.

Los reportes indican una profundidad de 165 m. Los primeros 18 m son cenizas y escorias que continúan con 34 m de estratos de arcillas, seguidas de capas de 14 m y 22 m de ceniza y basalto respectivamente, y hasta los 105 m presencia de arcillas, antecedidas por una secuencia ígnea de ceniza, basalto y escoria hasta los 151 m, para finalizar con arcillas hasta el fondo del pozo.

A pesar de que el SACMEX menciona la realización de mediciones periódicas en los pozos, por las condiciones de los mismos se percibe una realidad diferente pues no cuentan con la infraestructura para dicha medición, incluso algunos no cuentan con medidores de flujo. Como adicional, se observa que los pozos que abastecen los alrededores de Santa María Nativitas operan prácticamente todo el día, sin mantenimiento constante ni tiempo de recuperación, que agotan el recurso hídrico y deterioran rápidamente el equipo.

No fue posible contar con una historia piezométrica para realizar análisis de la evolución de los niveles de saturación de la localidad, ni se tuvo el permiso para realizar pruebas de bombeo y obtener parámetros hidráulicos del acuífero y los aforos originales, tampoco fue posible interpretarlos por contener datos deficientes o incompletos.

La información de la localización de pozos profundos aledaños a la zona de estudio (*Figura 19*) y la zona de medición de fracturas en casas habitación y calles, fue ubicado en un sistema de información geográfico denominado QGIS de acceso libre.

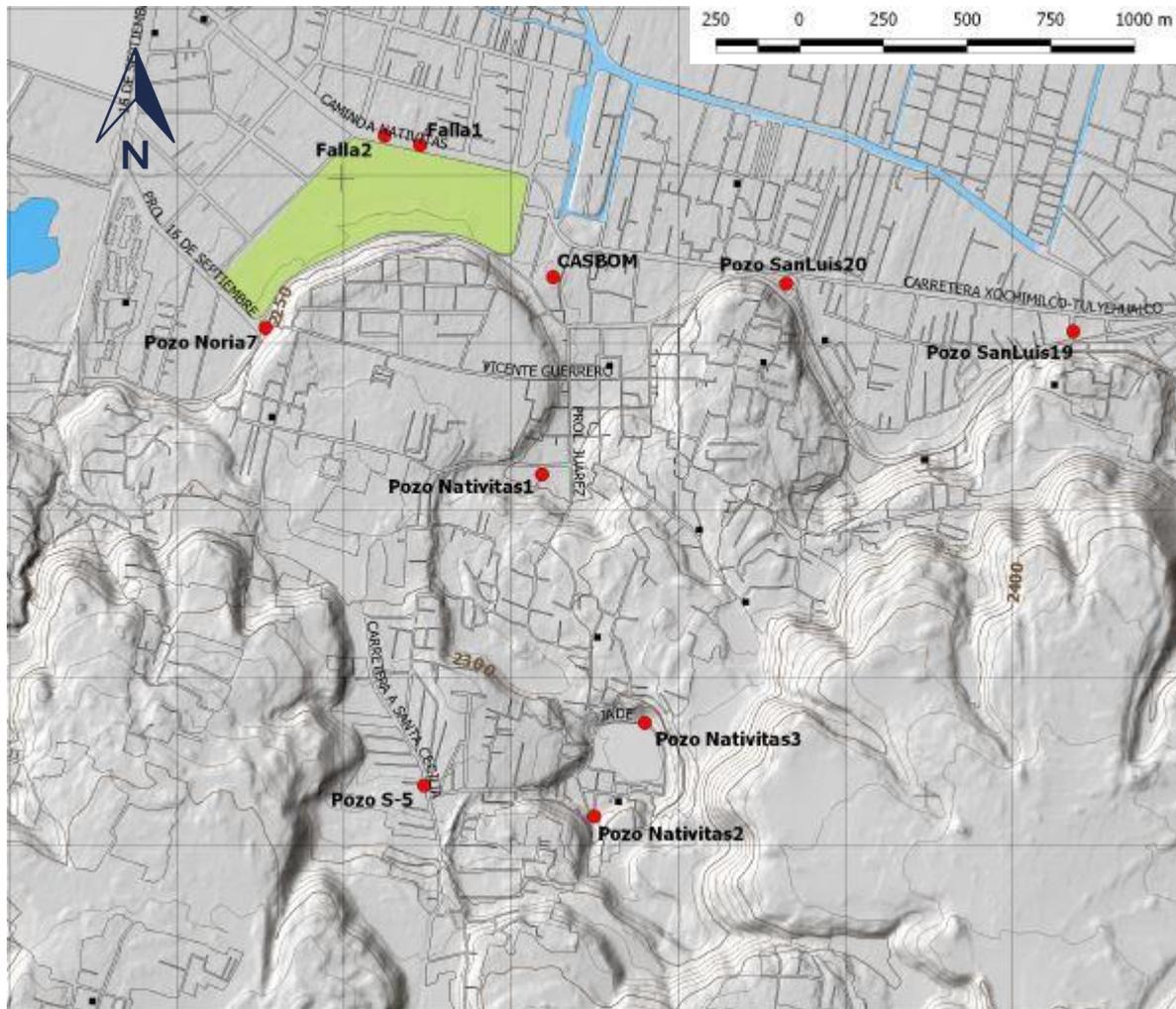


Figura 19. Ubicación de los pozos profundos en Santa María Nativitas y alrededores.
Realizado por Sergio Macías Medrano.

La consolidación y reacomodo del suelo que se produce por la extracción intensiva de agua causa el fracturamiento y hundimiento de la infraestructura tanto en casa – habitación y en vialidades; pero debido a la falta de estudios que traten los efectos de la extracción, no es posible precisar la velocidad de consolidación.

Contrario a las hipótesis que relacionan un constante hundimiento del terreno, nivelaciones detalladas realizadas en los alrededores de Xochimilco por la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal, señalan que en la década de los 1980s el hundimiento del suelo era del orden de -0.49 a -0.25 m/año, y para la década

de 1990s la velocidad de hundimiento era menor, de -0.28 a -0.22 m/año. Esta tendencia continúa, y para el año 2000 los valores reportados son de -0.18 m/año, con valores positivos de 0.02 m/año (Ángeles-Serrano et al. 2006).

A partir de relación de las cargas hidráulicas, se observa que el flujo va de la sierra Chichinautzin a favor de la zona de planicie, es decir con orientación sur a norte. Los derrames de basalto, que también abarcan la zona de estudio, son fracturados y con poros, lo que los vuelve permeables y permiten alimentar a profundidad los mantos. Pues la recarga vertical se ha visto influida por la disminución de lluvias y por el aumento de temperaturas que conlleva una mayor evapotranspiración.

La descripción general de los pozos en Santa María Nativitas y comunidades aledañas se muestra a continuación (Tabla 5):

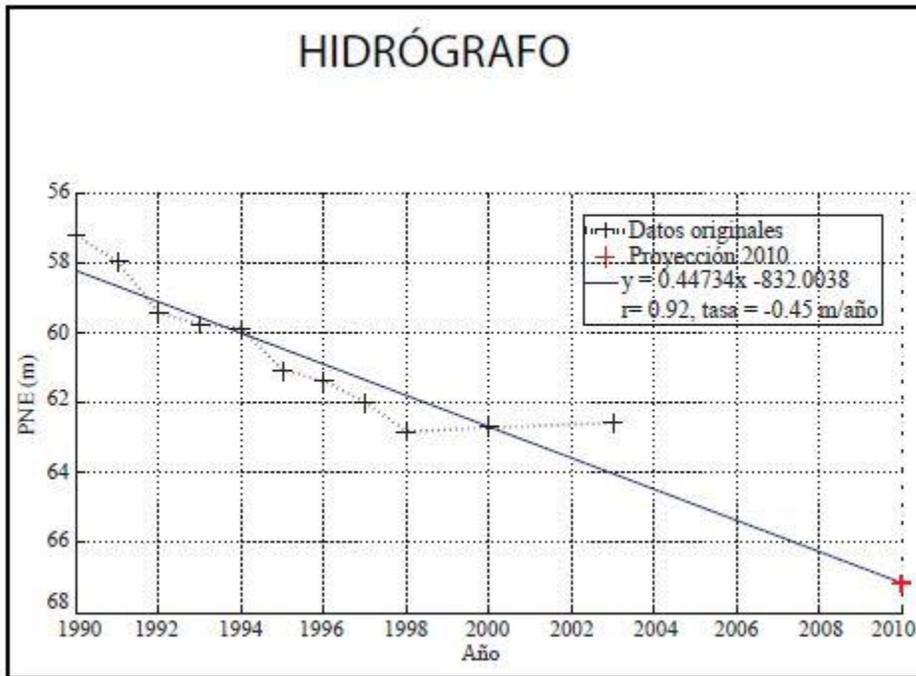
Tabla 5. Pozos en Santa María Nativitas y alrededores.

Pozo	Profundidad [m]	Nivel Estático [m] (2010) *	Nivel Estático [m] (2017)	Litología
Nativitas 1	200.45	59.1	43.03	Toba
Noria 7	65.5	63.2	-	Basalto
San Luis 19	101.20	38	50	Basalto
Nativitas 3	250	68	74.96	Toba
Nativitas 2	250	72	77.5	Toba
S-5	200.50	66.9	114.8	Basalto
San Luis 20	165	45	35.7	Arcilla

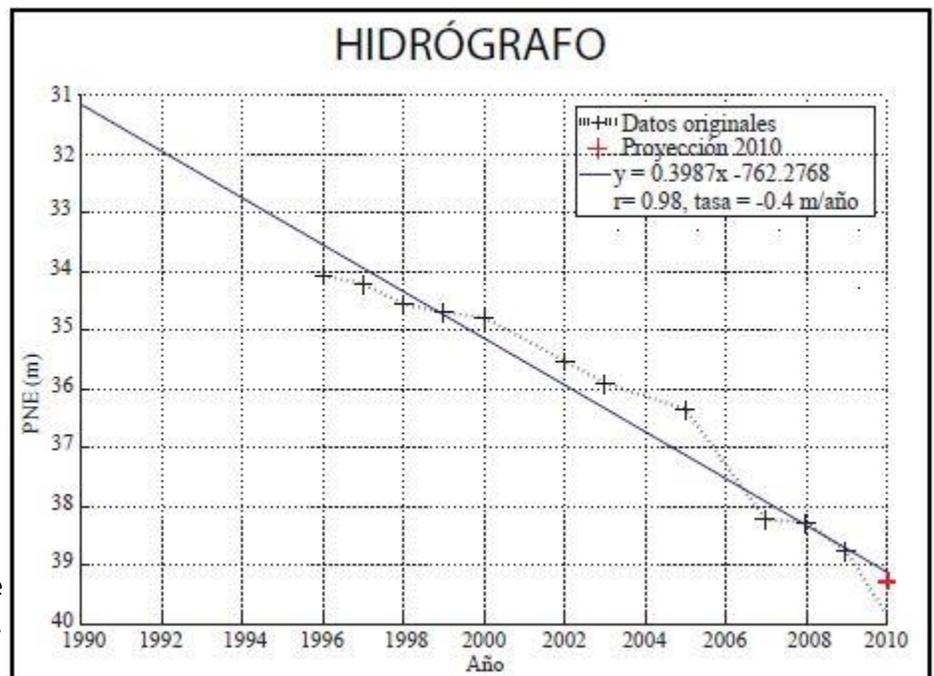
* Datos de proyecto CONACYT: *Nivel de riesgo en la Ciudad de México en función de las características hidrogeológicas de la ZMCM y de fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos.*

Hidrógrafos

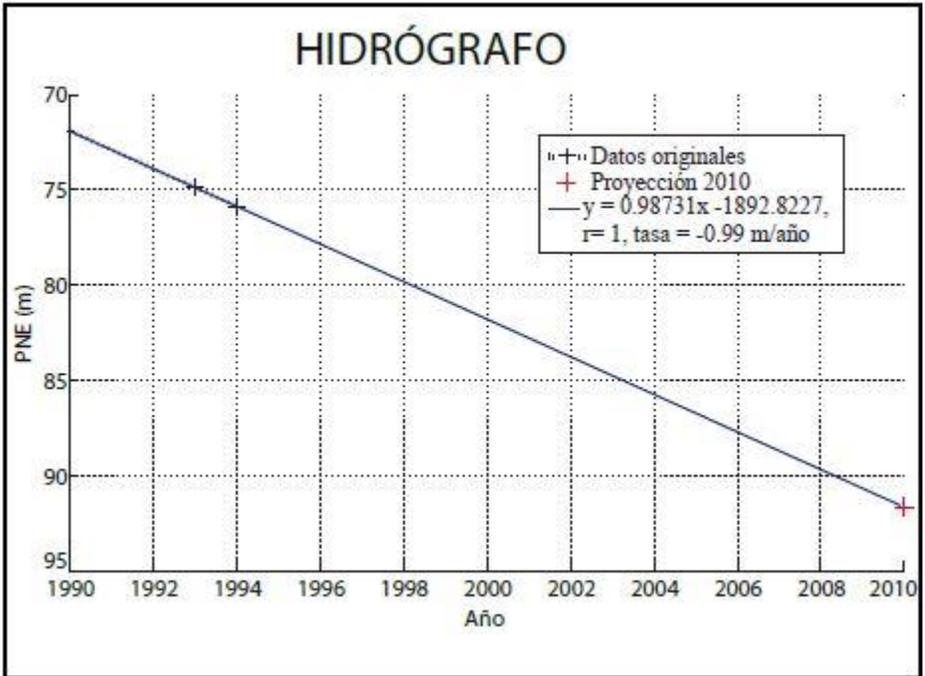
Los mismos archivos del proyecto CONACYT que ayudaron a la descripción de los pozos, presentaban hidrógrafos (de *Gráfica 5* a *Gráfica 7*) de algunos de los pozos antes mencionados, con los que se calculó la tasa de abatimiento anual promedio.



Gráfica 5.
Hidrógrafo de pozo San Lorenzo Atemoaya 2.



Gráfica 6. Hidrógrafo de pozo Noria 7.



Gráfica 7. Hidrógrafo de pozo Nativitas 2.

Los pozos de los que se obtuvo la información, se encontraban activos en los años que se tomaron los datos, se ubican principalmente en las zonas de transición, y muestran una tendencia de aumento en la profundidad a los niveles estáticos, con las que se obtienen tasas desde menos 40 cm hasta llegar aproximadamente a menos un metro por año. Sin embargo, las gráficas se realizaron con los escasos y antiguos datos, los que se extrapolaron para, de acuerdo a su comportamiento, obtener una proyección para el año 2010, pero esta se vio sobrepasada, debido a que los niveles estáticos para ese año tuvieron cambios mayores a los esperados.

Exploración geofísica

Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

La tomografía eléctrica es una técnica geofísica para el estudio del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico característico del mismo dentro de un ámbito espacial limitado, a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno o desde perforaciones (Ibarra y Ramos, 2015)

Los intervalos de resistividades eléctricas de acuerdo con el tipo de roca, descritos textual y gráficamente (*Figura 20*) por Loke y Dhali (2002), son:

Las rocas ígneas y metamórficas: Típicamente tienen altos valores de resistividad. La resistividad de estas rocas es muy dependiente del grado de fracturamiento y del porcentaje de fracturas rellenas con agua subterránea. Así, una roca dada puede tener un rango de resistividad de cerca de los 1000 a 10 millones $\Omega\cdot m$ dependiendo de si la roca está mojada o seca.

Rocas sedimentarias: Son usualmente más porosas y tienen alto contenido de agua, normalmente tienen bajos valores de resistividad comparada con las rocas ígneas y metamórficas. Los valores de resistividad son de 10 a cerca de 10 000 $\Omega\cdot m$ con la mayoría de los valores por debajo de 1000 $\Omega\cdot m$ - Los valores de resistividad son ampliamente dependientes de la porosidad de las rocas y salinidad del contenido de agua.

Los sedimentos no consolidados generalmente tienen valores de resistividad más bajos que las rocas sedimentarias, con intervalo de valores de 10 a menores que 1000 $\Omega\cdot m$. Los valores de resistividad dependen de la porosidad (asumiendo que todos los poros están saturados), así como de contenido de arcilla. El suelo arcilloso

normalmente tiene valores de resistividad más bajos que los suelos arenosos. Sin embargo, se observan valores de sobreposición en los valores de resistividad de las distintas clases de rocas y suelos, esto es porque la resistividad de una roca o suelo en particular depende del número de factores como la porosidad y el grado de saturación de agua y la concentración de la sal disuelta.

La resistividad del agua subterránea varía de 10 a 100 $\Omega\cdot m$, dependiendo de la concentración de sales disueltas.

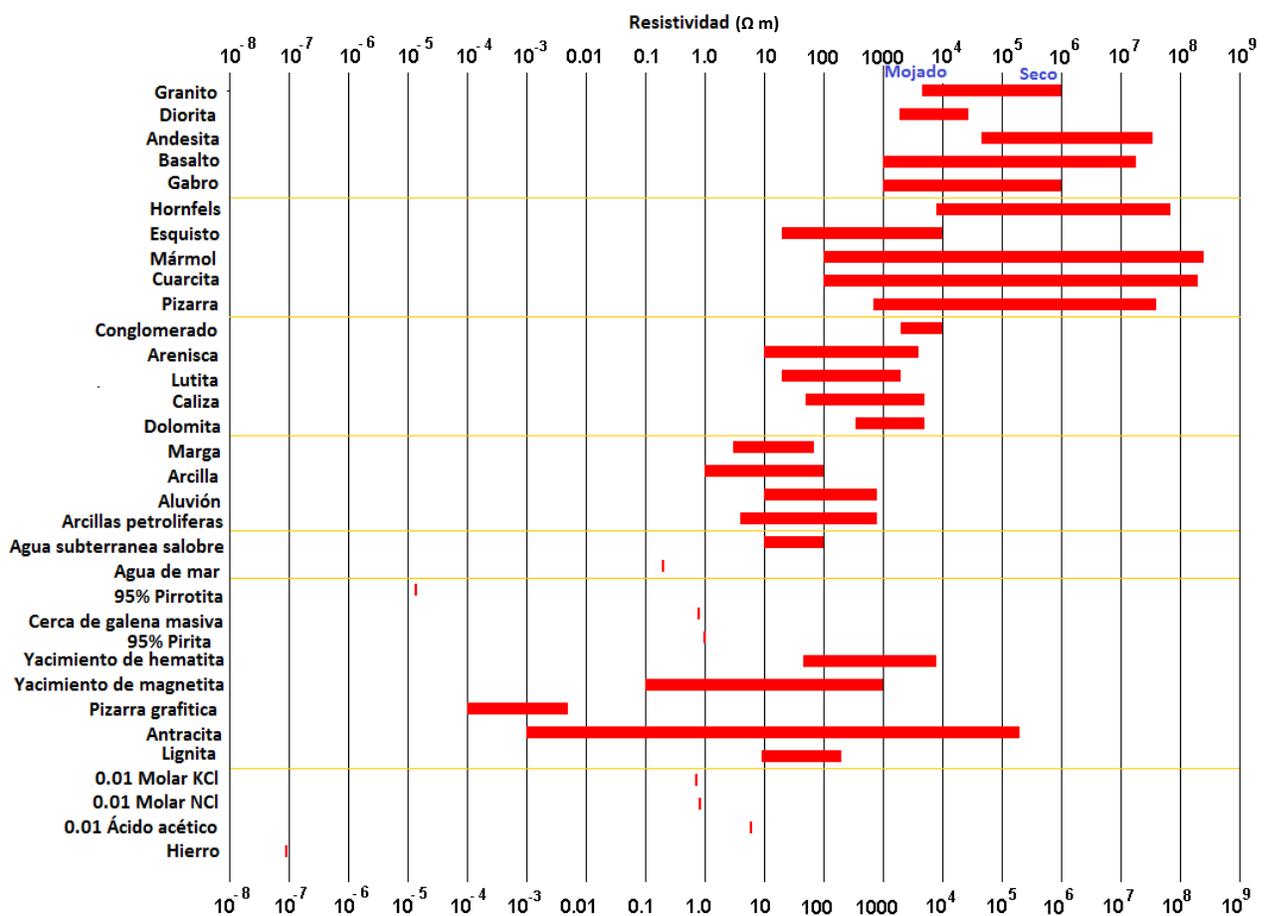


Figura 20. Resistividad de rocas, suelos y minerales.

Tomado de Loke, 2002.

En las tomografías de resistividad eléctrica realizadas en Santa María Nativitas (*Figura 21*) por el Grupo de Exploración del Departamento de Geomagnetismo y Exploración

del Instituto de Geofísica de la UNAM y descritas y analizadas por Vázquez Barrena (2018, en proceso), se observan dos unidades, una de baja resistividad localizada en la parte más somera, mientras la unidad de alta resistividad se encuentra principalmente en el área más profunda y en los extremos E-W (Figura 23) de la TRE, además se muestra entre la calle Benito Juárez y Camino Viejo a San Lorenzo, una discontinuidad horizontal en la sección S - N (Figura 24).

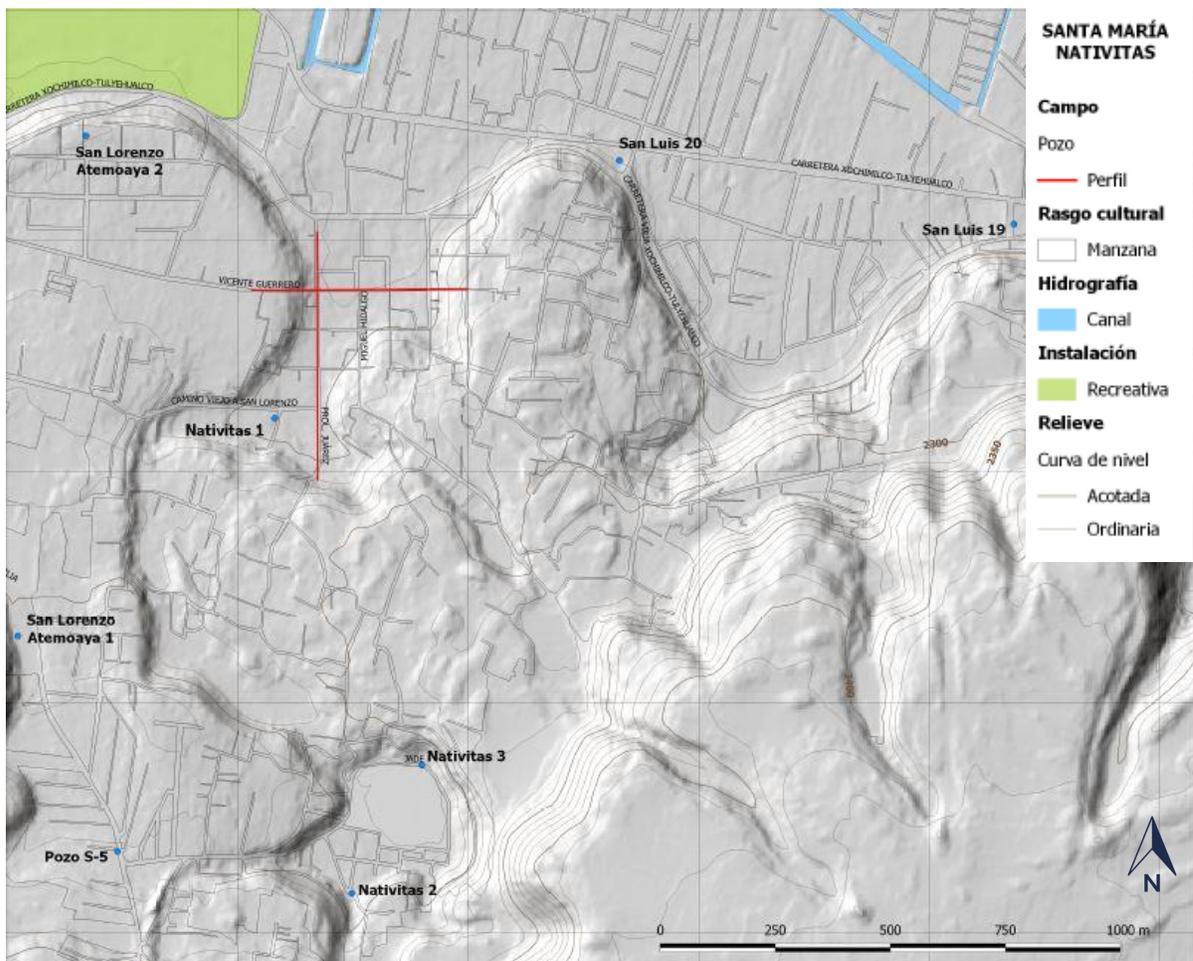


Figura 21. Mapa de localización del tendido para perfiles de TRE.

Las líneas perpendiculares rojas muestran la ubicación de los sondeos para realizar el estudio geofísico.

Realizado por Sergio Macías Medrano.

La gran mayoría de casas fracturadas se encuentran en las unidades de resistividades bajas, a excepción de las casas 5 y 11, que se encuentran sobre la unidad de mayor resistividad (Figura 22).

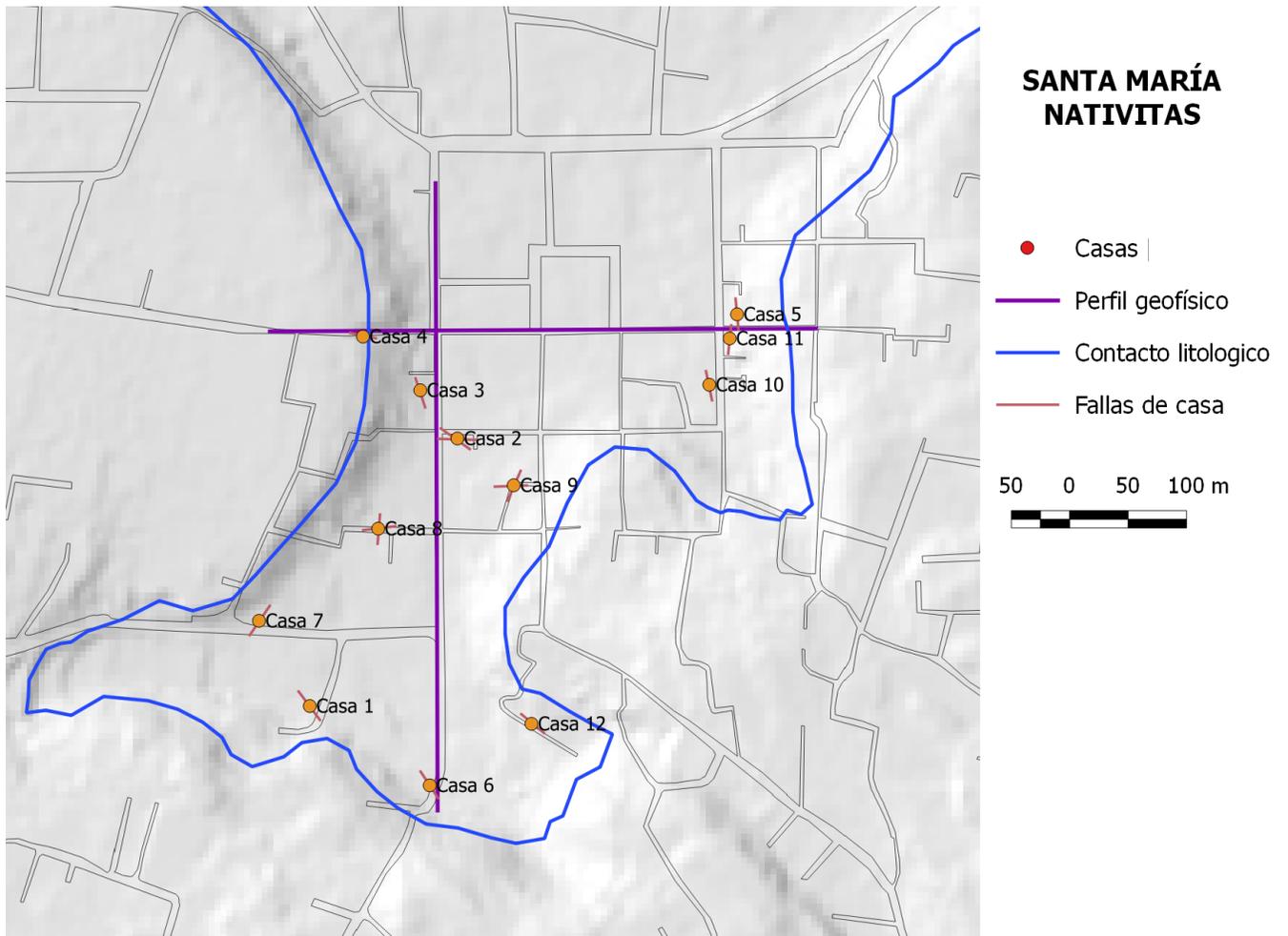


Figura 22. Perfiles de tomografía eléctrica S – N en calle Juárez y E-W en calle Vicente Guerrero, Santa María Nativitas.

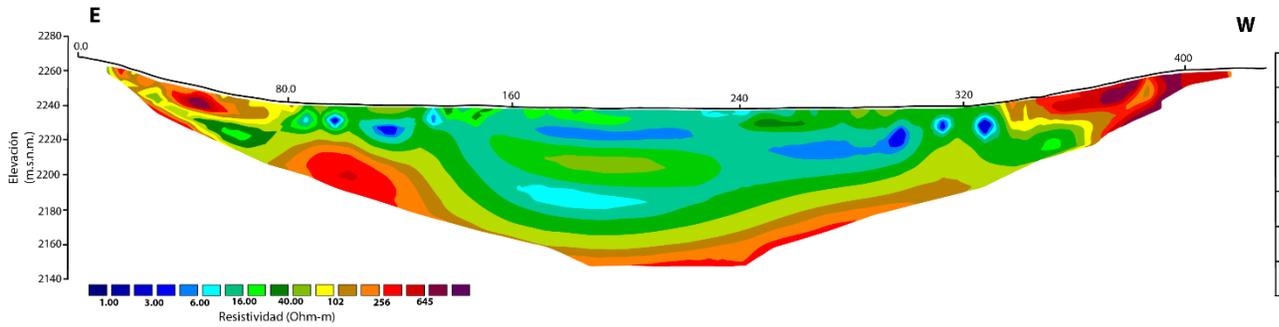


Figura 23. Tomografía de resistividad eléctrica TRE 01.

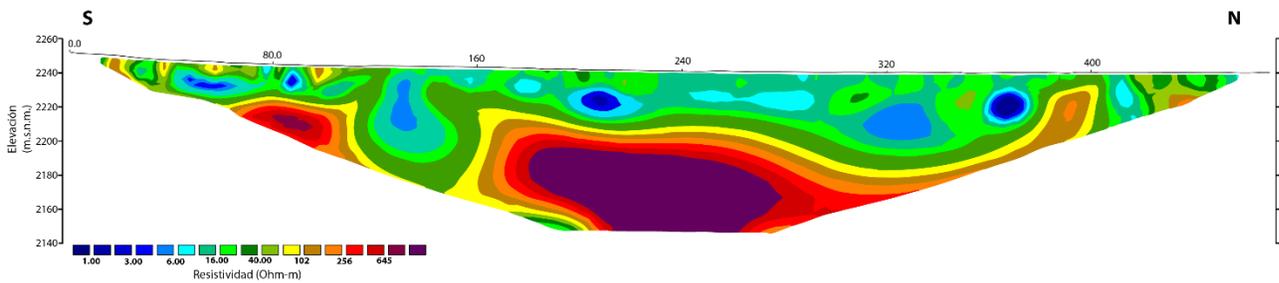


Figura 24. Tomografía de resistividad eléctrica TRE 02

Con los valores de resistividad eléctrica, a la topografía y a los datos en campo, se interpreta dos unidades (Tabla 6)

Tabla 6. Unidades Geoeléctricas.

Unidad geoelectrica	Rango de resistividades (Ohm-m)	Posible asociación litológica
U1	5 -40	Materiales granulares de relleno
U2	100 - 600	Rocas volcánicas

Después del sismo

En Santa María Nativitas, 700 casas fueron dañadas por el sismo, de las cuales 190 edificaciones fueron clasificadas con código rojo (para derrumbe) por el daño estructural que mostraban, y por el incremento en la inclinación.

El 15 y 16 de febrero del 2018 se realizó nuevamente una visita a campo en la cual, se volvió a contar con el apoyo de la comunidad para recorrer los puntos anteriormente inspeccionados.

Aunque la profundidad en ciertos casos no pudo ser medida por el espesor de la fractura, o el dato no era certero debido a que los habitantes rellenaban las cavidades, se tiene seguridad de que las fracturas son más profundas que solamente la afectación al piso.

A continuación, se muestra gráficamente, el seguimiento que se dio a las fracturas después del sismo:

Las fracturas que están rellenas de manera antropogénica o por sedimentos muy recientes están señaladas en las tablas como Aperturas*.

Casa 1		
Coordenadas	14Q 0490111	UTM 2127545
Dirección	Camino Viejo a San Lorenzo No. 5-2, Colonia: Pueblo de Santa María Nativitas	

DATOS ESTADÍSTICOS

La casa está cementada sobre una plancha de concreto y presenta una

No.	Longitud [m]
1	1.27
2	0.48
3	1.2
4	1.03
5	0.7
6	0.72
7	1.85
8	1.25
9	0.25

inclinación de 02° al NE

DATOS SECUNDARIOS

En la pared

No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	5.07	2.5



Fotografía 32.
Fractura en la pared de la sala.

Fracturas en la sala, en el piso

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura [cm]	Escalón [cm]	Profundidad* [cm]
1	NW 30°	7.2	2.3	1.6	56
2	NW 32°	2.8	2	-	-



Fotografía 33. Fractura en el cuarto de descanso.

Pasillo

No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]	Escalón [cm]
1	1.48	0.2	0.3



Fotografía 34. Fractura en el pasillo de la sala a la cocina.

Apertura en patio

No.	Rumbo	Longitud [m]
1	NW 72°	3.66



Fotografía 35. Apertura de lozas en patio delantero.

Fracturas en el patio delantero de la casa

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	NW 40°	12	3
2	NW 48°	2.76	4.2
3	NW 38°	1.6	2.5



Además se observa cavidad bajo la losa del patio, sin ser visible la longitud pero se oye hueco bajo el patio, muy cerca de la casa.

Fotografía 36. Cavidad en patio delantero.

Casa 2		
Coordenadas	14Q 0490183	UTM 2127795
Dirección	Narciso Mendoza No.5 Esquina con Av. Benito Juárez, Colonia: Pueblo de Santa María Nativitas	

Fractura en la pared de la cocina

No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	3.18	0.3

Fractura en el piso de la cocina

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]	Escalón [cm]
1	NW 45°	2.8	1.5	0.2

Fractura en la pared de los cuartos

No.	Longitud [m]	Apertura* [cm]
1	2.84	2.25



Fotografía 37. Fractura la pared entre el baño y la habitación.

Fracturas en piso de 1er cuarto

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura [cm]	Escalón [cm]
1	NW 69°	0.7	0.5	-
2	NW 25°	2.1	1	1



Fotografía 38. Fractura en el piso de la habitación principal.

Fracturas en el piso y la pared del segundo cuarto

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	-	2.66	1
2	-	1.05	2.8
3	NW 30°	3.1	1.5
4		0.84	0.3



Fotografía 39. Fractura en la pared del cuarto secundario.



Fotografía 40. Fractura en el piso de la habitación secundaria.

Fracturas en el patio

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]	Salto [cm]
1	NW 40°	2.15	0.6	-----
2	NW 70°	2.5	2	-----
3	EW	5.9	9.5	1.5
4	NW 40°	2.15	1.5	-----
5	NW 34°	1.2	2	-----
6	NW 80°	3.57	2.5	-----
7	NW 75°	5.9	7	-----
8	EW	3.7	3	-----
9	NW 80°	2.03	2	-----
10	NE 15°	1.04	2	-----
11	EW	1	2	-----
12	SW 72°	1.47	1.8	-----
13	NE 3°	1.6	2.5	-----
14	NW 45°	0.6	0.4	-----
15	NW 45°	1.72	4.5	-----
16	NW 04°	3.18	7	-----



Fotografía 41. Fractura en el patio de la casa.

Casa 3		
Coordenadas	14Q 0490106	UTM 2127545
Dirección	Av. Benito Juárez No. 23, Colonia: Pueblo de Santa María Nativitas	

Casa en demolición

Fractura en la pared de la oficina

No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	3.14	3.5
2	2.17	0.1
3	1.02	5
4	0.78	2
5	0.45	0.1
6	0.36	0.1



Fotografía 42. Fractura en la pared de la oficina.

Fractura en la pared de la sala

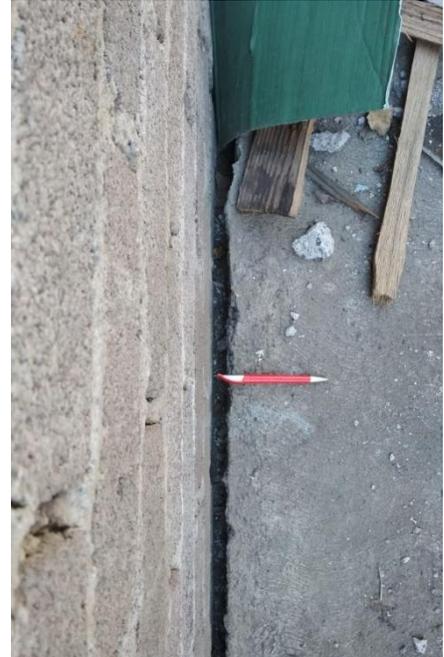
No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	4	0.3

En la planta baja se presenta una inclinación de 5° al SE. Los niveles superiores estaban en proceso de demolición, por lo cual, se dificultó tomar las medidas de las habitaciones en dichos pisos.

Casa 5		
Coordenadas	14Q 0490431	UTM 2127895
Dirección	Vicente Guerrero No. 4, Colonia: Pueblo de Santa María Nativitas	

Separación entre muro de contención y patio

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura [cm]
4	NE 10°	3	4.4



Fotografía 43. Separación entre muro de contención y losa del piso.



Grietas en pared

No.	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	2.56	0.2

Fotografía 44. Fractura en la pared de la fachada de la casa.

Zonas de susceptibilidad

Después del sismo hubo diferentes afectaciones en zonas aledañas a la comunidad de Santa María Nativitas, para saber el comportamiento de cada zona se recorrieron dichas áreas.

Casa A1		
Coordenadas	14Q 0490589	UTM 2127412
Dirección	Av. Sor Juana Inés de la Cruz No. 48, Colonia: La Peña	



Fotografía 45. Casa en zona cerril colapsada por sismos.

La casa fue seriamente dañada en el sismo del 7 de septiembre y colapsada en el sismo de magnitud 7.1 ocurrido el 19 de septiembre, presentaba cimientos de 50 cm, y a pesar de ser de un solo nivel, el material de construcción era pesado.

Se presenta inclinación incipiente al N15°, asociado a la topografía de la zona.

Casa A2		
Coordenadas	14Q 0490313	UTM 2127582
Dirección	Sor Juana Inés de la Cruz No. 9, Colonia: La Peña	

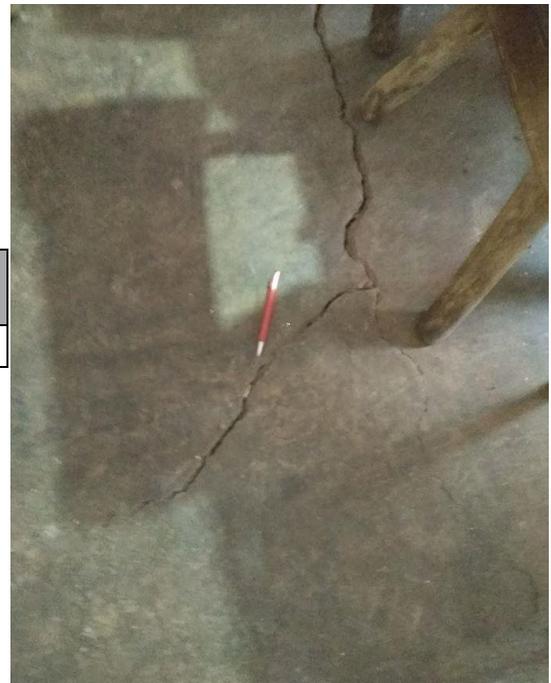


La casa se construyó en diferentes niveles, de terrazas rellenas con arenas en zona cerril, y al no tener drenaje se realizaron fosas sépticas.

Fotografía 46. Casa en zona cerril sobre terraza.

Fractura en piso del comedor

No.	Rumbo	Longitud [m]	Apertura [cm]
1	SE 21°	4.59	1.5-3



Fotografía 47. Fractura en piso del comedor.

Casa A3		
Coordenadas	14Q 0490317	UTM 2128489
Dirección	Calle Canal 27 No. 18, Colonia: San Jerónimo	

No.	Rumbo	Echado
1	SW 63°	S05°E

Está ubicada en las orillas del canal, y se visualizan asentamientos de 10 cm bajo de la casa, lo cual es probable causa de la inclinación de la casa.



Como esta situación, hay otras casas en la misma zona con escalones de hasta 50 cm.

Carretera Xochimilco – Tulyehualco

La carretera Xochimilco – Tulyehualco presenta grandes inestabilidades debido a su ubicación, pues es propensa a movimientos de masas. Una evidencia de ello es la morfología de inclinación que presentan los árboles (*Figura 25*), lo cual

también refleja que no es un acto ocurrido únicamente por el sismo en septiembre.



Figura 25. Árboles con inclinación en laderas de terrazas.
Tomada de Google Maps, 2018.

Fracturas Carretera Xochimilco - Tulyehualco

No	Rumbo	Longitud [m]	Apertura* [cm]	Escalón [cm]
1	NE 33°	44.5	10	11
2	SE 44°	53.4	3	5
3	SE 40°	3.38	3	11



Fotografía 49.
Escalonamiento de fractura en carretera México – Tulyehualco.

Los taludes de las terrazas (*Fotografía 51*) no presentan ninguna característica que evite los daños causados por el agua, como lo son las canaletas o los tubos de PVC que permitan la salida del agua infiltrada, aunado a ello, incluso la presencia de grandes raíces que rompen el muro pone en situación vulnerable su estabilidad.

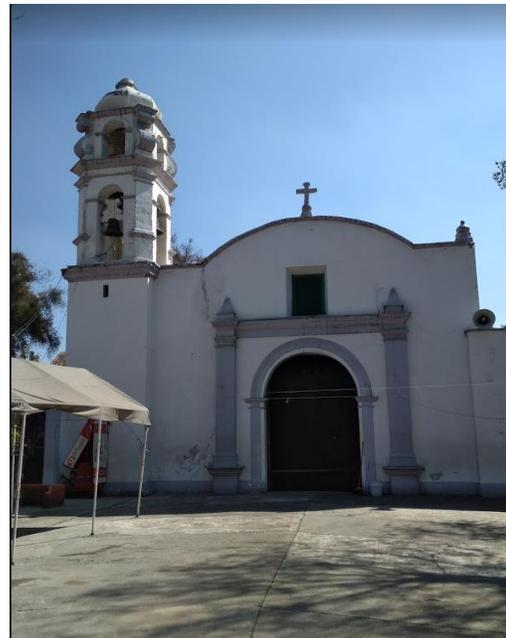


Fotografía 50. Fracturas y socavón en carretera México – Tulyehualco.



Fotografía 51. Talud de terraza en carretera México – Tulyehualco

La iglesia de la comunidad presentó grietas en sus paredes y caída de una cúpula por lo cual las instalaciones estaban desalojadas y en desuso.



Fotografía 52. Iglesia de la comunidad de Santa María Nativitas

Conclusiones

La litología presente en la localidad de Santa María Nativitas, Xochimilco origina dos tipos de acuíferos, y con ello, un comportamiento diferente. El primero se encuentra hacia la parte sur y corresponde a un acuífero fracturado permeable, mientras al norte es un acuífero semiconfinado, ocasionado por la interestratificación de medio granular aluvial y lacustre.

Los datos hidrogeológicos que se tienen anteriores al sismo son muy antiguos, y no se cuenta con información actual debido a que los pozos no presentan infraestructura para censarlos, por lo tanto, se necesitan tener datos actualizados para conocer si hay un cambio en la dinámica de la hidráulica o si los acuíferos modificaron su funcionamiento hidrológico a partir del sismo.

Las afectaciones que se presentaron en Santa María Nativitas se deben a que está asentado, principalmente, en la zona transicional, y además este cambio tiende a no sólo ser abrupto por su topografía sino que debido a las alternancias muy drásticas entre el basalto y sedimentos lacustres, los que se comportan geomecánicamente diferente, repercuten en las casas habitación, debido a la generación de grietas por la interacción entre dicha zona y la de planicie drenada, en un proceso de compactación. (*Figura 26*)

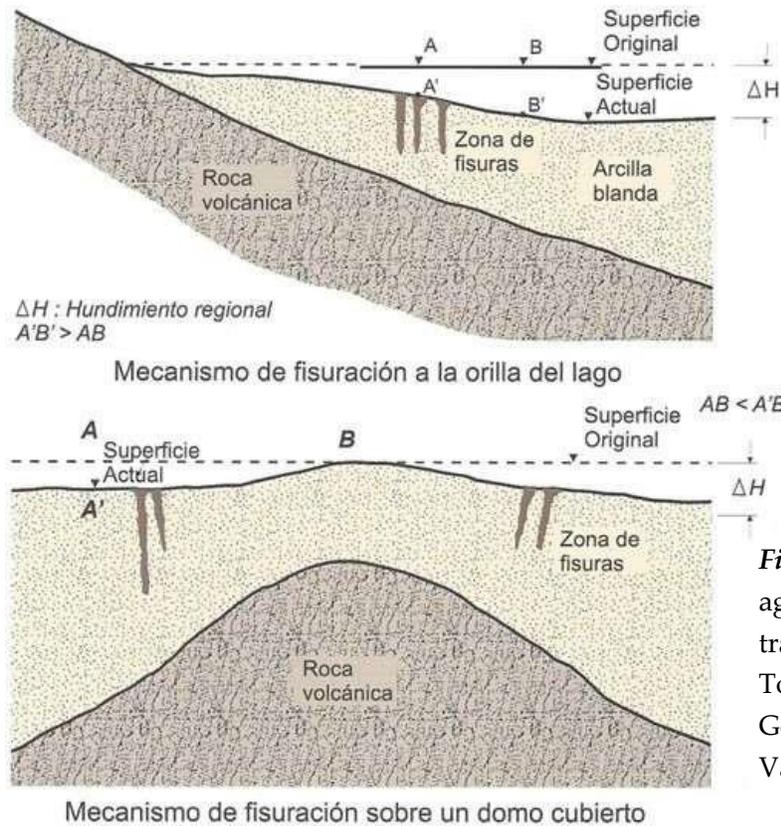
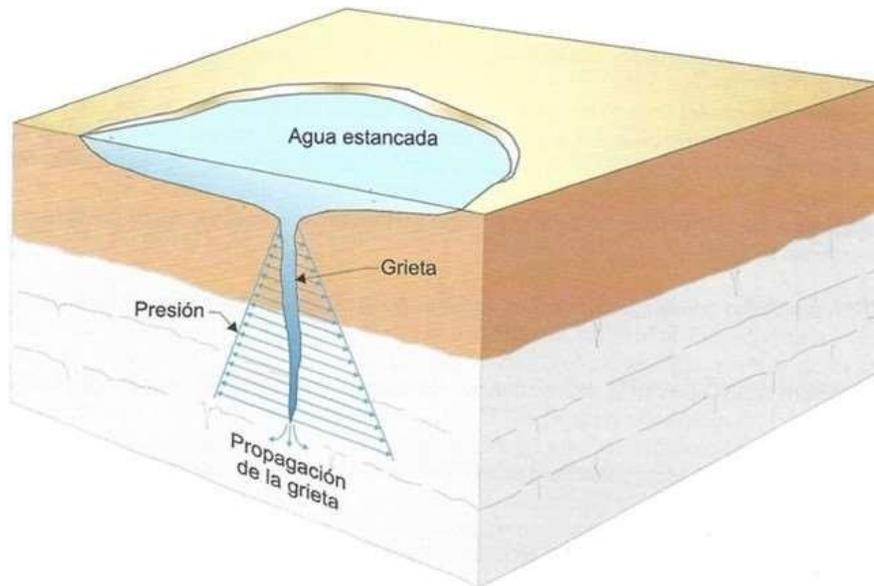


Figura 26. Mecanismos de agrietamiento en zonas de transición.
Tomada de Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México, 2005.

El proceso de drenado en las arcillas, que se ha dado en la zona lacustre o chinampera, ha sido lo suficientemente drástico como para crear desequilibrios en la configuración de los sedimentos, los cuales se ajustan buscando estabilidad, es decir, se acomodan de tal manera que la arcilla suplantando la presión de los espacios que antes eran ocupados por el agua que fue extraída, y además esta deshidratación de las partículas, produce su compactación y consolidación, lo que trae consigo microfisuras en el suelo (*Figura 27*). Un ejemplo de ello fue el hundimiento creado en la zona de chinampas en el embarcadero de Nativitas. (*Figura 28*)



*Figura 27. Mecanismo de propagación de grietas.
Tomada de Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México, 2005.*



*Figura 28. Hundimiento en el canal, cerca del embarcadero Zacapa-Nativitas.
Tomada de: Noticieros Televisa*

La población de la urbe ha crecido sin tomar en cuenta algunas de las normas de urbanización, por lo que hay asentamientos en lugares poco apropiados para la vivienda, aunado a ello, la existencia de factores antropogénicos que aumentan la vulnerabilidad de las zonas y complica la situación de las personas que, sin conocer el área de riesgo, se instalaron en la región.

Como consecuencia al sismo, el sedimento consiguió un nuevo reajuste, más rápido que los efectuados anteriormente, lo cual repercutió bruscamente en las viviendas y aunque este proceso era inevitable, mientras las condiciones que se reúnen en la comunidad continuaran, el movimiento aceleró el suceso, creando inclinaciones y grietas, e incluso las preexistentes tuvieron diferentes reacciones al movimiento, aumentando o reduciendo su espesor.

En general, las fracturas con dirección al NW son las que presentaron modificaciones, pues el espesor y longitud de las grietas aumento; hay algunas excepciones en las que se ve una reducción en el espesor, atribuidos a la ampliación en la abertura en zonas aledañas, es decir un proceso de expansión-contracción. A pesar de que existen pocas fracturas posteriores al sismo en las casas, las preexistentes tuvieron modificaciones en su escalonamiento, y aunque el peralte es muy pequeño, en promedio 0.77 cm, revelan el movimiento vertical que está sufriendo el subsuelo, pues anterior al sismo, los peraltes de las fracturas en las casas eran mayores, en promedio eran de 1.96 cm.

Después del sismo, el menor número de afectaciones fue en la zona cerril, asociándose a las propiedades mecánicas de la roca basáltica, sin embargo, se presentaron daños debido, principalmente, a la infraestructura de las edificaciones. Un ejemplo de ello, son las afectaciones ocasionadas a los muros de contención que están colocados en las terrazas, pues al no mostrar las condiciones que atenúen la acción del agua, se fracturaron de manera semi

vertical, esta tendencia se observa mayormente hacia los límites de la zona lacustre y el comienzo de la zona abrupta.

Lo anterior, demuestra cómo el agua es un problema muy evidente en esta área, pues tanto su ausencia en el subsuelo como presencia en superficie, provocan alteraciones en el suelo y en las construcciones que no presentan condiciones ante la presencia de agua, perjudicándolas de manera directa, afectaciones que se agravaron con el movimiento brusco del subsuelo ocasionado por el sismo.

Los pozos que se encuentran en la región tienen la función de abastecer principalmente a la comunidad y hasta a las comunidades aledañas, sin embargo, se tiene conocimiento que también se provee agua a pipas que tienen por destino algunos poblados lejanos, que fomenta la sobre explotación de los mantos acuíferos, lo que reduce la presión del agua y vacía el espacio inter-poro, lo que provoca un cambio en su acomodo.

El hidrógrafo que presenta mayor descenso en su nivel freático es el que se encuentra más alto topográficamente y situado en un pequeño fragmento de zona lacustre entre derrames basálticos, por lo que la transición es cercana a la superficie en toda el área. Los otros dos pozos se ubican en la zona lacustre, con el contacto entre litologías cada vez más lejano de la superficie.

Adicionalmente, durante los últimos años, factores naturales como el aumento de la temperatura y la disminución en la precipitación, en conjunto con factores antropogénicos como el crecimiento de la población y de las construcciones, que han disminuido las diversas áreas de infiltración, aunado a la constante y creciente extracción de agua debido a su demanda, se ha evitado la recuperación de presión en el acuitardo, lo que provoca asentamientos diferenciales.

Se tienen registros de las afectaciones que ha causado la explotación del acuífero, y también se comprobó una forma de remediación. Un claro ejemplo,

en zona de lago el Zócalo de la Ciudad de México, donde se cancelaron las obras de extracción para evitar el continuo hundimiento. El caso local del que se tiene anotación se presentó en la escuela secundaria No. 250, donde algunas bardas se inclinaron en dirección al pozo, dicho fenómeno se detuvo al suspender las actividades en el pozo de abastecimiento Nativitas 1, que se encuentra contiguo a la escuela.

El nivel estático de los pozos ha tenido conductas diferentes, pues mientras en la zona lacustre y zona abrupta, la disminución del nivel freático ha sido de hasta 13 metros, en la zona de topografía más alta, la disminución ha sido de hasta 48 metros. Esto puede ser ocasionado por la capacidad de transmisibilidad de la roca.

Debido a que los niveles de saturación se localizan por debajo de los 40 m de profundidad en la zona abrupta y por debajo de los 140 m en la zona de planicie, la red de canales ha sido desconectada del funcionamiento general del acuífero, ahora con tendencia a acuífero de tipo libre, por lo que la evolución en el régimen de hundimiento continuará inevitablemente (*Figura 29*).

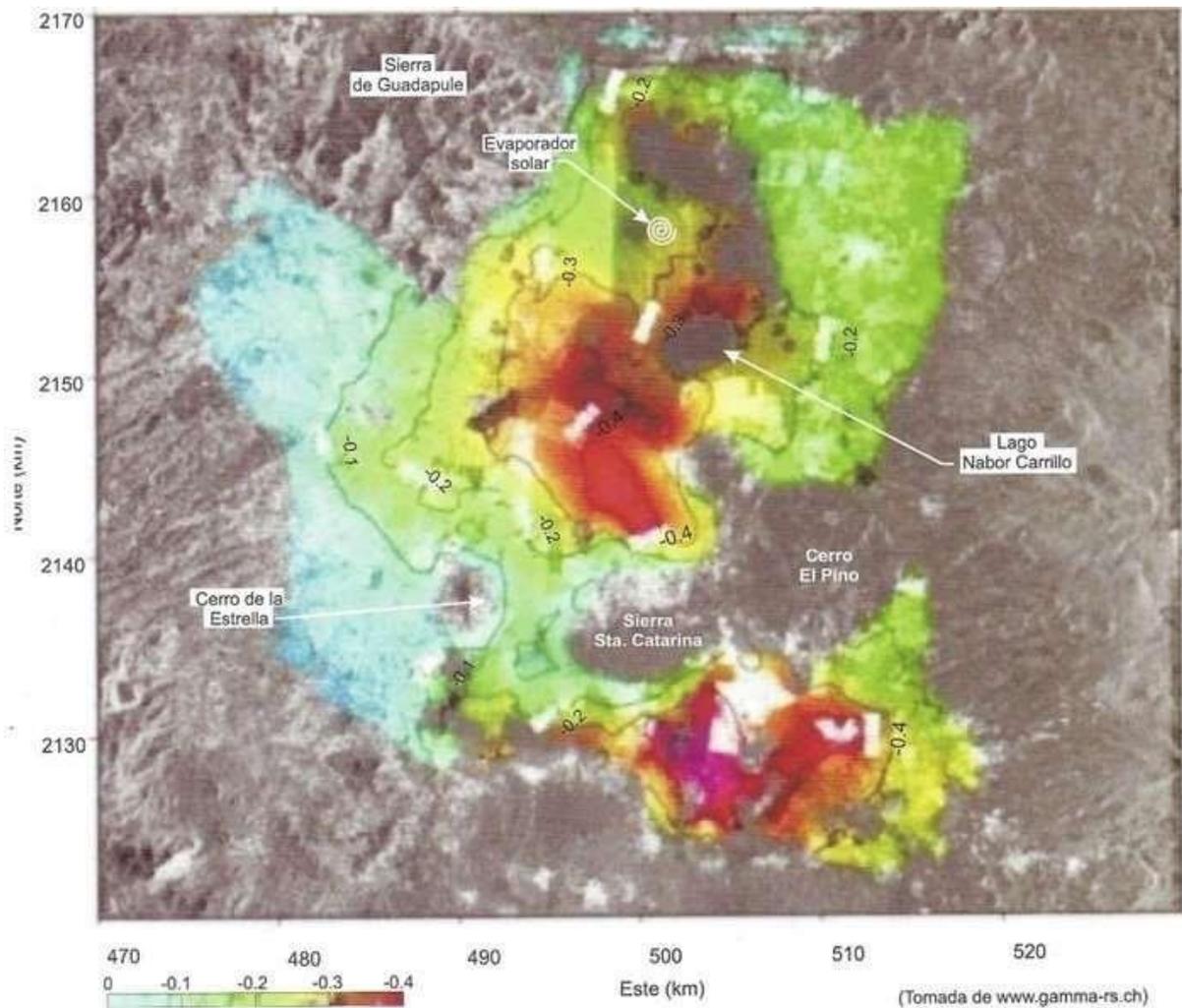


Figura 29. Hundimiento regional de la Cuenca de México. Hundimiento en milímetros por año en la zona lacustres de la Cuenca de México. Tomada de El Subsuelo de la Ciudad de México. Vol. III, 1959-2016).

Para la zona de Xochimilco no se tiene una red de monitoreo con la que los modelos como el que se presenta puedan calibrarse, peor aún para la zona de transición abrupta, que no presenta instrumentación para la toma de dichos datos.

Con la ayuda de la geofísica, se determina que la roca basáltica en la que se puede cimentar para dar mayor estabilidad a las construcciones; se encuentra después de los 40 m, en formas irregulares, sin embargo, en la sección Este –

Oeste, la forma de los depósitos lacustres es similar a una cuenca debido a que se encuentra entre dos morfologías basálticas. En ambos perfiles, la unidad U1 presenta resistividades que sugiere el contenido de agua, poros y/o discontinuidades en las litologías, por lo cual, en esta situación, la zona es mayormente susceptible al hundimiento y fracturamiento. Por el contrario, mientras mayor sea su resistividad, habrá menor contenido de condiciones que alteren la superficie.

Las actividades de campo y de gabinete realizadas para este trabajo permitieron relacionar el funcionamiento de un acuífero aún con alta disponibilidad, cuyas litologías granulares y fracturadas se relacionan, con los resultados en términos de contrastes de resistividad geofísica, así como las familias de fracturas medidas y su ubicación topográfica en la zona abrupta.

Los pobladores deben de comprender que la región que habitan es de riesgo debido a la zona de transición abrupta y a la zona de lago, y, por tanto, necesitan hacer uso consciente de los recursos hídricos, pues, su uso inadecuado, acelera las repercusiones geotécnicas, además de tener influencia en la escasez o mala calidad del agua, ya presente en algunas regiones de la comunidad y zonas aledañas.

En las casas visitadas en zona de transición abrupta y lacustre, se observó que las losas de cimentación crean un hundimiento homogéneo lo que evita o reduce el fracturamiento en las casas, mas solamente se atiene al área que abarca la losa, por tanto, el peso que ejercen las casas que se hundan, crean fracturas en las construcciones aledañas.

Si se controlan las causas creadas por el hombre, se puede tener una estabilidad para construcciones ligeras, sin embargo, la región más propicia para las

edificaciones pesadas, como lo son las escuelas e iglesia, es la roca volcánica que se encuentra principalmente en la parte geográficamente alta.

Por último, el hundimiento y fracturamiento, que se ha ocasionado por disminuir el grado de saturación de las arcillas, ha producido que desechos de las fosas sépticas, fugas en drenajes, y otros contaminantes, permeen hacia el acuífero, lo que ha disminuido su calidad.

Recomendaciones

La zona no es apta para la ubicación de viviendas, por lo que se sugiere a los habitantes desalojar el área, ya sea totalmente y realizar la venta del inmueble, o temporalmente mientras se hacen adecuaciones a la cimentación y terreno para una mejora en la vivienda, sin embargo esto no dará las circunstancias totalmente propicias para la instalación de las casas, pues la modificación del subsuelo es continua e inevitable debido a los factores hidrogeológicos y a agentes externos, que pondrán nuevamente en riesgo las construcciones.

Si se opta por la adaptación de las viviendas, se deben de realizar las construcciones de casas de acuerdo a las normas establecidas por el uso de suelo y zonificación geotécnica de la Ciudad de México, que consideran a las cimentaciones de acuerdo a la litología en la que se ubique la construcción, para que se dé mayor estabilidad a las edificaciones. Para ello, es recomendable realizar estudios geofísicos que cubran mayor área, con los que se pueda conocer el subsuelo y así tratar cada zona de manera específica, o en su caso, ubicar la profundidad de materiales volcánicos en distintas áreas, para con ello, contemplar la posibilidad de pivotes anclados a dichas zonas o el método de cimentación adecuado.

Las construcciones en la zona abrupta necesitan ser ligeras de máximo dos plantas (planta baja y primer piso), construidos con material ligero y con cimentaciones de plancha, a su vez anclada a capas basálticas, y colocar pivotes en las zonas de hundimiento, que evitan la inclinación. Además, de acuerdo a la topografía es conveniente construir muros de contención que impidan el deslizamiento de masas y con ello de las construcciones y que a su vez presenten medidas que mitiguen el efecto del agua en ellas.

En la zona lacustre se sugiere la construcción de obras pequeñas con material ligero y de una sola planta pues el peso que ejerce ésta sobre el suelo provoca hundimientos por sí sola, y a diferencia de la zona abrupta, en esta zona no se pueden colocar pivotes para mitigar el hundimiento, pues al introducir más peso, el área tenderá a deprimirse más. La situación empeora cuando una cavidad fue rellenada para sobre ella edificar una casa, pues la porosidad creada con en el material de relleno permitirá el paso del agua por debajo de la construcción, lavando el material fino, además de que esas depresiones tienden a ser cauces del lago, por lo que el agua reconocerá su camino y afectará las cimentaciones.

Se recomienda tener una regulación y un monitoreo de los pozos activos con sus respectivos niveles, ya que el cierre total e inmediato de éstos es complicado debido a las zonas que abastecen, sin embargo, se debe de considerar la reubicación y distribución de las obras de extracción de acuerdo al conjunto de estudios hidrogeológicos, geotécnicos, geofísicos e incluso sociales, con los que se garanticen menores repercusiones. Una vez que los nuevos pozos estén activos, se deberá mantener el control de volúmenes de extracción y de niveles estáticos a través del tiempo y realizar mayores medidas de los niveles, recuperación, abatimientos y demás, para la elaboración e interpretación de gráficas que permitan tener mayor cantidad de datos, y con ello, mejores manejos de cada uno de los pozos. Asimismo, se deberá analizar la cercanía entre ellos, pues los conos de abatimiento pueden afectar el nivel freático y secar los pozos aledaños.

Además de las obras anteriormente mencionadas, se debe de planear la instalación de pozos de absorción que auxilien en la recuperación de la presión de poro en el acuífero semiconfinado, y con ello, la recarga del acuífero

principal, debido a que las edificaciones y el pavimento han reducido las zonas de infiltración por lluvia.

Otra acción que apoyaría a la recuperación de la presión de poro es la instalación de drenes de captación, que lleven el agua de lluvia a la red de acuíferos.

Debido a la infiltración que se da por residuos antropogénicos, se recomienda realizar estudios químicos del agua, determinar la fuente contaminante de acuerdo a un mapa de flujo hidrogeológico, dar tratamiento e impedir que los desechos se sigan infiltrando.

A las autoridades se les llama a atender la situación, con toma y procesamiento de datos para conocer el funcionamiento del acuífero, con actividades como:

- Medición de niveles piezométricos periódicamente para formar una historia piezométrica, elaboración de hidrógrafos con datos más recientes y continuos.
- Realizar pruebas de bombeo de larga duración e interpretarlas mediante métodos clásicos (analíticos), alternativos (métodos numéricos) y utilizando tecnologías derivativas, con la finalidad de contar con parámetros hidráulicos actualizados (transmisividad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, etc.) y caracterizar de una mejor manera al acuífero.
- Dado que no se cuenta con información local de hundimiento del suelo, realizar estudios geotécnicos y monitoreo para caracterizarlo y determinar medidas de mitigación de la subsidencia y fracturamiento. Además de instalación de equipo que permita medir el hundimiento en la zona.

Fuentes de información

- Ángeles-Serrano, G., Perevotchkova M., y Carrillo-Rivera, J. J, (2006) *Funcionamiento hídrico e impacto ambiental relativo a la extracción de agua subterránea en Xochimilco*. Morelos, México: Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
- Arroyo, B., González, J. (2015) *Estudio sobre la existencia de un flujo regional en el acuífero de la Ciudad de México* (Tesis de pregrado), Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- CIGSA (Consultores en Ingeniería Geofísica, S.A. de C.V.) (2000) *Integración de los estudios de resistividad eléctrica por SEV, tendidos de refracción sísmica y gravimetría levantados en la Cuenca del Valle de México*. Instituto Tecnológico de Sonora, CONAGUA, 82 p.
- CONACyT-ICyTDF (2012) *Nivel de riesgo en la Ciudad de México en función de las características hidrogeológicas de la ZMCM y de fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos*. (Reporte técnico) Proyecto FOMIX-CONACyT-GDF, clave 121128: Grupo de Hidrogeología, Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.
- Del Valle, E. (1986) *Apuntes de Introducción a los métodos geofísicos de exploración* (Apuntes) Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica/Secretaría General de Obras/DDF (1992) *Hidrología Subterránea en el Valle de México Hidrología subterránea en el Valle de México*, Págs. 90-98. México, D.F
- Enciso, S. (1994) Las lavas de “El Pedregal”, en Rojo, A. (Comp.). *Reserva Ecológica “El Pedregal de San Ángel”, ecología, historia natural y manejo* (pp. 123-127) Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Flores, M.A. (2009) *La geomática en la evaluación de inundaciones causadas por el hundimiento regional de la Zona Metropolitana del Valle de México* (Tesis de pregrado), Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- García, C. (2013) *Control local del hundimiento regional mediante inyección de agua en el subsuelo del Valle de México* (Tesis de maestría), Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

- Gómez De León, R. (2003) *El crecimiento urbano, cambios en los usos del suelo y efectos en la hidrogeología*, Xochimilco, D.F. de 1930 a 2000 (Tesis de maestría), Facultad de Arquitectura, UNAM, México.
- Guevara, B., Ortega, H., Ríos, R., Solano, E., Vanegas, J. (2015) *Morfología y geoquímica de suelos de Xochimilco*. *Terra Latinoamericana*, vol. 33, núm. 4, octubre-diciembre, Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México.
- Hernández, M. (2013) *Hidrología de los ríos del Oriente del Valle de México y funcionamiento hidráulico en conjunto con el Lago de Texcoco* (Tesis de especialidad), Facultad de Ingeniería, UNAM, México
- Hernández, M.P. (2003) *Efecto del hundimiento regional en las propiedades geotécnicas de las arcillas en la zona de lago* (Tesis de pregrado), Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Ibarra, A.A., Ramos, L.G., (noviembre de 2015) Tomografía Eléctrica, En V. Wong (Responsable) Sesión Exploración Geofísica. Conferencia llevada a cabo en el congreso Reunión Anual 2015, Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Leyva, E. (2010) *Acuíferos semiconfinados y su modelación: Aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México* (Tesis de maestría), Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México.
- Loke, M.H. (2002) *Tutorial: 2-D and 3-d electrical imaging surveys*. Geotomo Software, Malasia. Recuperado de: <http://personales.upv.es/jpadin7coursesnotes.pdf>
- López, F., (2007) *Metodología de evaluaciones de riesgos y vulnerabilidad de suelos por actividades no industriales en el Distrito Federal* (Tesis de maestría), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, México.
- Marsal, R.J. (Ed.) (2016) *El suelo de la Ciudad de México Vol.I The subsoil of Mexico City*, Ciudad de México, México, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Mooser, F. (1956) *Bosquejo geológico del extremo sur de la cuenca de México*. 20 Congreso Geológico Internacional. Libro guía C-9: pp. 9-16. México. D. F. UNAM
- Navarrete, S., Jiménez, B., Navarro, I., Domínguez, R. (2013) *Evaluación del riesgo al acuífero de Xochimilco por lluvias extremas*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. IV, núm. 3, julio-agosto, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.

- Puerto, Z. (2015) *Diseño de un pozo de infiltración para captación de agua pluvial en San Luis Tlaxialtemalco, Xochimilco* (Tesis de pregrado), Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Ruvalcaba, A (2009) *Modelación matemática del comportamiento hidrogeológico de la Zona Lacustre de Xochimilco, México* (Tesis de maestría), Instituto de Geofísica, UNAM, México.
- Orellana, E., (1982) *Prospección Geoeléctrica en corriente continua, Parte 1, California, Estados Unidos*, Paraninfo.
- Servicio Sismológico Nacional (2017) *Reporte especial: Sismo de Tehuantepec (2017-09-07 23:49 Mw 8.2)*. Recuperado de: http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Tehuantepec_M82.pdf
- Servicio Sismológico Nacional (2017) *Reporte especial: Sismo del día 19 de Septiembre de 2017, Puebla – Morelos (M 7.1)*. Recuperado de: http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf
- Vázquez J.I. (2018) *Estudio geoeléctrico en la zona de transición en Santa María Nativitas (Delegación Xochimilco, CDMX)*, (Tesis de grado) Instituto de Geofísica, UNAM.