



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**Análisis del peligro e identificación de lotes expuestos a
hundimientos locales y fracturas en San Andrés Mixquic,
Tláhuac.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A :

OSCAR ALBERTO RAMÍREZ GARCÍA



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Juan Carlos Mora Chaparro**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F., 2016.



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.

Dedicatorias

A mi familia, amigos... a la vida.

Agradecimientos

A mis padres **Irene García** y **Tomás Ramírez** por su confianza, dedicación y apoyo en todo momento. A mis herman@s **Deisy, Jorge y Alfredo**, son mi inspiración y un ejemplo a seguir.

A mis amigos de toda la vida... nos vemos en el andar.

AL **Dr. Juan Carlos Mora Chaparro** por el apoyo incomparable durante en mi estancia en el Instituto de Geofísica, Gracias!

A mis sínodos **Dra. Berenice Hernández, Lic. Frank García, Mtro Pedro Montes y al Dr. Rigel Zaragoza** por las observaciones, tiempo y confianza.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México...** *mi alma máter.*

Contenido

Resumen	1
Introducción	2
Antecedentes	4
Planteamiento del problema	6
Justificación	6
Objetivos	7
General	7
Específicos.....	7
Hipótesis	8
1 Capítulo I Marco Teórico Metodológico	9
1.1. Marco Teórico.....	9
1.1.1 Riesgo por fenómenos naturales	9
1.1.2 Peligro	10
1.1.3 Vulnerabilidad y lotes expuestos.....	18
1.2 Metodología	19
1.2.1 Características generales	19
2 Capítulo 2 Marco geográfico e histórico de la zona de estudio	23
2.1 Localización	23
2.1.1 Caracterización de la cuenca del valle de México	23
2.1.2 Localización de la zona de estudio	24
2.2 Geología.....	25
2.3 Edafología.....	26

2.4	Climatología.....	26
2.5	Hidrología.....	26
2.6	Uso de suelo y vegetación	27
2.7	Marco histórico.....	33
2.7.1	Breve historia de la Ciudad de México.....	33
2.7.2	Historia de San Andrés Mixquic.....	34
3	Capítulo 3 Desarrollo metodológico.....	37
3.1	Delimitación del área de estudio.....	37
3.2	Levantamiento y análisis estructural.....	38
3.2.1	Levantamiento y análisis.....	39
3.3	Compactación de suelos y análisis de susceptibilidad	46
3.3.1	Equipo utilizado.....	46
3.3.2	Aplicación de sondeos	48
3.3.3	Análisis y distribución.....	48
3.3.4	Diagrama de caja y bigotes.....	53
3.3.5	Distribución de frecuencias.....	55
3.3.6	Rangos.....	59
3.3.7	Interpolación de datos y zonificación de susceptibilidad.....	73
3.4	Vulnerabilidad y lotes expuestos.....	76
	Conclusiones	81
	Bibliografía	82
	Anexos.....	88

Resumen

La presente investigación se realizó en San Andrés Mixquic delegación Tláhuac, la zona centro del poblado es afectada por hundimiento de terreno. Se tiene como objetivo la identificación, cartografía y análisis de fracturas, aplicación de sondeos de compactación de suelos para identificar una susceptibilidad a expansión del fenómeno y finalmente la cuantificación de lotes vulnerables y expuestos a zonas de susceptibilidad mediante el uso de catastro.

Los resultados indican que San Andrés Mixquic presenta una estructura de hundimiento delimitada por fracturas con una alineación E-W, la extensión total de las fracturas es de 1030 metros. Por otro lado, se realizaron un total de 25 sondeos con el equipo de compactación de suelo Penetrómetro Automático Numérico Dinámico Asistido por ordenador (PANDA) y con ellos se generó modelo de susceptibilidad cuyas áreas son: susceptibilidad alta: 33,246 m², susceptibilidad media: 21,692 m² y susceptibilidad baja: 12,032 m². Finalmente, se identificaron 51 lotes sobreposicionados en la estructura de hundimiento (vulnerables) y 94 lotes en zonas de susceptibilidad.

Introducción

Actualmente las investigaciones enfocadas a riesgos por fenómenos naturales han cobrado relevancia debido al aumento drástico en su manifestación y a los daños causados a poblaciones de un territorio determinado, en ese sentido distintos organismos gubernamentales y no gubernamentales realizan investigaciones teórico-metodológicas a fin de crear definiciones y metodologías universales para el análisis y cuantificación del peligro, vulnerabilidad y riesgo (Cardona, 1993). Organizaciones tales como el Centro Nacional de Prevención del Desastre (CENAPRED), la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), o con fines de Investigación como la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres de América Latina (LA RED), tienen el objetivo de fomentar cultura de autoprotección y disminuir el riesgo de las poblaciones ante fenómenos naturales y antrópicos.

En este aspecto, fenómenos tales como subsidencia o hundimiento de terreno cobran relevancia en ciudades asentadas en antiguas zonas lacustres, como el caso de la Ciudad de México donde diversas instituciones académicas continúan desarrollando métodos y técnicas para su estudio, por lo tanto en esta investigación se analizan las particularidades del fenómeno y se retoman metodologías y técnicas de otras disciplinas tales como la geología estructural y la geotécnica con la finalidad de analizar el hundimiento de terreno y sus implicaciones en el sistema urbano.

En el **Capítulo 1** se presenta un marco teórico metodológico donde se mencionan los conceptos básicos de la investigación y las características generales de la metodología utilizada.

En el **Capítulo 2** se describe el marco geográfico e histórico de la zona de estudio, partiendo de su ubicación y los diferentes elementos físicos que componen a la delegación Tláhuac, entidad política en la que se encuentra la zona de estudio. Así como una breve descripción histórica de Mixquic.

En el **Capítulo 3** se desarrolla la metodología planteada en el **Capítulo 1** iniciando por la delimitación local del área de estudio, análisis estructural mediante una brújula, análisis de compactación de suelos y finalmente la identificación de lotes vulnerables por sobreposición a la zona de hundimiento y fracturas, así como los lotes expuestos a zonas susceptibles al fenómeno.

Por último se exponen las conclusiones.

Antecedentes

El desarrollo de hundimiento local y fracturas de terreno en México, se ha registrado como un fenómeno estrechamente relacionado con ciudades asentadas en antiguas depresiones rellenadas por sedimentos lacustres y/o fluviolacustres localizadas en la zona norte de la provincia geológica conocida como Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) (Ávila, 2008), cabe mencionar que estas depresiones se encuentran delimitadas por el efecto combinado de edificios volcánicos y estructuras regionales. En la actualidad, ciudades tales como Querétaro, Morelia, Ciudad de México y zona conurbana, San Luis Potosí, Aguas Calientes, Celaya, Guadalajara, Salamanca, Abasolo, León e Irapuato tienen registro de la manifestación de este fenómeno. (Carreón, Hernández & Hidalgo, 2006). En el caso de la Ciudad de México, el hundimiento que presenta la antigua zona lacustre es una fuente de riesgo importante, ya que se manifiesta con la formación de grietas que causan daños a los servicios municipales y a las construcciones. El hundimiento tiene además incidencia en la respuesta sísmica de la zona lacustre (Martínez, 2012).

En el año de 1948, Nabor Carrillo explicó el fenómeno de hundimiento regional en la Ciudad de México y estableció la relación teórica entre el hundimiento y la consolidación de las arcillas inducidas por la extracción de agua. Consecutivamente más investigadores se sumaron a esta demostración entre ellos: Raúl J. Marsal y Marcos Mazarí, Leonardo Zeevaert, E. Juárez Badillo, A. Rico Rodríguez, Germán Figueroa Vega, Carlos Melgoza. G. Marín, J. Trujillo Candelaria, entre otros y aportaron sus investigaciones científicas para

entender y dar una solución clara y precisa al fenómeno de los hundimientos, que sin duda pone en un grave riesgo a la Ciudad de México (SMMS, 1991).

Por otra parte, diversas investigaciones realizadas en la zona tales como De Cserna y Huesca (1987), determinan la existencia de fallas geológicas activas en las cercanías a la zona de estudio, sin embargo recientes investigaciones elaboradas por Auvinet, Lermo y Mendez (2008), han descartado estas teorías debido a que éstas son fallas inferidas por métodos gravimétricos y no tienen una manifestación superficial. Dado que la distribución espacial de los eventos sísmicos estudiados por el Instituto de Ingeniería y la comparación de las fracturas superficiales cartografiadas por el laboratorio de Geoinformática de la UNAM no presentan relación alguna, es decir, no existe relación entre “falla activas” y la generación de fracturas (Auvinet et al. 2008).

Entre los estudios realizados en la zona de estudio, Riquelme (1974) fue el primero que registró la formación de grietas en la delegación Tláhuac. Entre los estudios actuales la tesis de Hernández (2007) quien desarrolla una metodología para la zonificación de riesgo por hundimiento y agrietamiento del terreno en las colonias del noreste de la delegación Tláhuac, por último la tesis de Santacruz (2009) realizada en la zona de estudio, hace un análisis de estudios previos y concluye que los hundimientos en Mixquic se asocian al paquete limo-arcilloso que se encuentra sobre la colada de lava, lo cual podría explicar la heterogeneidad del hundimiento (hundimiento diferencial, con escalonamiento de 1.66 m sobre la calle Perú). También concluye que pueden ser asociados a los efectos de los eventos sísmicos y a la extracción del agua subterránea, lo

que ocasionaron la consolidación del material, el cual se desliza sobre el material resistente (roca) con la formación de la Falla Perú.

Planteamiento del problema

San Andrés Mixquic se encuentra en la delegación Tláhuac, Distrito Federal. El centro de este poblado está afectado por una estructura de hundimiento y fracturas bien definidas que ha provocado afectaciones en calles, banquetas y viviendas con desplazamientos verticales. Según los pobladores el fenómeno tiene una antigüedad aproximada de 29 años. Actualmente esta estructura de hundimiento sigue teniendo implicaciones negativas en la infraestructura que se ha desarrollado sobre la misma, sin que se conozcan los alcances y dimensiones espaciales actuales y a futuro. Debido a lo anterior, existe una gran incertidumbre por parte de la población en cuanto a los daños que pudiera seguir ocasionando dado que, no se conocen las condiciones físicas de los materiales que componen el subsuelo.

Es importante señalar que los estudios actuales relacionados con fenómenos geológicos, agrietamientos y fallas enfocan su espacio de trabajo a escalas regionales debido a que sus metodologías toman como paradigma extensas áreas, herencia tomada de estudios geológicos y cartografía de fallas geológicas, esto implica una excesiva generalización.

Justificación

Existe un número considerable de publicaciones relacionadas con hundimiento de terreno y fracturas, sin embargo la importancia de esta investigación es resaltar la trascendencia

del uso de una escala local como unidad de análisis para el estudio de hundimiento de terreno, por otro lado el uso de la geotecnia para la modelación de zonas con susceptibilidad a la propagación de fracturas y finalmente la identificación de lotes vulnerables y expuestos a las zonificaciones de peligro y susceptibilidad resultantes, esta última de importancia para Protección Civil o programas de desarrollo urbano en la delegación.

Objetivos

General

Identificar y analizar el peligro y zonas susceptibles a hundimientos locales mediante registro de las estructuras en campo, la compactación de los materiales en el subsuelo y cuantificación de lotes vulnerables y expuestos.

Específicos

- Identificar y cartografiar a detalle la estructura de hundimiento que afecta al poblado de Mixquic.
- Determinar las condiciones de compactación de los suelos dentro y fuera de la estructura de hundimiento.
- Mediante la compactación de suelos caracterizar las zonas susceptibles a presentar nuevos sistemas de fracturas e incremento en su longitud de las ya identificadas.
- Cuantificar lotes vulnerables y expuestos.

Hipótesis

De acuerdo a lo planteado por Santacruz (2009) existe evidencia (fracturas y desplazamientos verticales) que será elemento primordial para delimitar la zona de fracturas, resultando una cartografía a detalle. Por consiguiente el fenómeno presentará límites concretos (fracturas) que será la unidad base para la cartografía del peligro.

Por otro lado, la zona que presenta fracturas estará estrechamente relacionada con el grado de compactación que presenta el suelo, partiendo de lo siguiente: los valores de compactación de suelo dentro de la estructura de hundimiento serán inferiores a los obtenidos fuera de esta, sin embargo si fuera de esta encontramos valores de compactación similares a los encontrados dentro estaríamos identificando zonas con susceptibilidad a la generación y propagación de nuevas fracturas y posibles zonas de hundimiento local.

Una vez generadas las zonas de susceptibilidad se trabajará con catastro, los lotes que se encuentren sobre la estructura de hundimiento local y fracturas tendrán automáticamente una vulnerabilidad que se complementará con el uso de suelo que presente el lote. Los lotes que se encuentren sobreposicionados a las zonas de susceptibilidad, se clasificarán según el grado asignado a esta zonificación

Por último, los resultados de esta investigación tendrán mayor impacto que la escala regional y fungirán como un documento para la planeación de obras de mitigación o bien como una herramienta para la toma de decisiones por parte de las autoridades.

1 Marco Teórico Metodológico

1.1. Marco Teórico

1.1.1 Riesgo por fenómenos naturales

Los desastres asociados a la manifestación de fenómenos naturales se han incrementado drásticamente en los últimos 50 años, esto sin duda es debido a las altas tasas de urbanización sin planeación en lugares donde se manifiestan ciertos fenómenos naturales, lo anterior convierte a los fenómenos en un riesgo (Romero y Maskrey, 1993). Esta urbanización sin planeación tiene una consecuencia severa: la construcción social del riesgo, la cual convierte a un fenómeno natural en un peligro, enfatizando la naturaleza social del problema y resaltar que la construcción social del riesgo es un proceso social e histórico (Herzer, 2011).

Por otra parte como lo señala Romero y Marskey (1993), la vulnerabilidad es la susceptibilidad de los sistemas naturales, económicos y sociales al impacto de un peligro de origen natural o inducido por el hombre. La vulnerabilidad siempre estará determinada por el origen y tipo de evento, la geografía de la zona de estudio, las características técnico-constructiva de las estructuras existentes, la salud del ecosistema, el grado de conocimiento de la población, la comunidad y los gobiernos locales, así como por la capacidad de recuperación o resiliencia.

La interacción entre peligro y una condición vulnerable genera un desastre, partiendo de que los desastres no tienen ningún componente natural, si no que ha sido una

construcción constante referida a su exposición, que asocia el nivel y tipo de sistema constructivo determinando su nivel de vulnerabilidad, los efectos que puede causar un desastre varían dependiendo de las características propias de los elementos expuestos y la naturaleza del evento mismo, en general pueden considerarse como elementos bajo riesgo la población, el medio ambiente y la estructura física representada por la vivienda, la industria, el comercio y los servicios públicos (Cardona, 1993).

Por ello, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2006), establece que para analizar el riesgo se toma como punto de partida el análisis del peligro con la finalidad de conocer las características de los eventos que pueden tener consecuencias desastrosas, seguido del análisis de la vulnerabilidad, que consiste en cómo estos fenómenos pueden incidir en los asentamientos humanos, en la infraestructura y en el entorno.

1.1.2 Peligro

1.1.2.1 Conceptualización

CENAPRED (2006), considera al peligro como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado.

Existen diferentes peligros tanto naturales y antrópicos, a continuación se enlistan los más representativos según Cardona (2006):

Origen Natural	Origen Antrópico
Terremotos	Guerras
Tsunamis	Terrorismo
Volcanes	Explosiones
Huracanes	Incendios
Inundaciones	Accidentes
Derrumbes	Contaminación
Sequías	Colapsos
Desertificación	Impactos
Deforestación	
Epidemias	

Tabla 1. Peligros naturales y antrópicos que pueden originar desastres.

Sin embargo, existen fenómenos que no son considerados como generadores de desastres ni inducidos, tal es el caso del peligro por hundimiento local y fracturas, no está incluido en la Ley de Aguas Nacionales, ni en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), no existen programas urgentes de ayuda social, una razón de tal exclusión es que los efectos por lo general se observan a largo plazo (Rodríguez & Rodríguez, 2006), por su parte CENAPRED (2006), no menciona teóricamente estos fenómenos.

La definición de *peligro* desarrollada por CENAPRED (2006), cuenta con diferentes elementos de análisis: probabilidad, intensidad tiempo y espacio, sin embargo no todos estos conceptos son aplicables, el concepto *tiempo* es descartado automáticamente, al igual que la *probabilidad* de manifestación (para este fenómeno) ya que el fenómeno para San Andrés Mixquic (zona de estudio) se presenta desde hace aproximadamente 29 años (Santacruz, 2009), en cuanto a la *intensidad* se requieren otros estudios que monitoreen el fenómeno, por ello se descarta. Por último el concepto (*espacio*) es funcional en esta

investigación ya que la delimitación y zonificación de la zona de hundimiento local por medio de la georreferencia de los elementos estructurales tiene la finalidad de llevar a cabo una “zonificación” donde se determinaran áreas homogéneas que resultará un mapa de peligros.

1.1.2.2 Subsistencia o hundimiento de terreno

El término subsidencia, hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre, en un área determinada debido a varios factores, que pueden ser naturales o antrópicos, partiendo de su génesis existen dos tipos de subsidencias, endógena y exógena, la primera hace referencia a aquellos movimientos asociados a procesos geológicos internos, tales como pliegues, fallas, vulcanismo, etc. (Tomás, Herrera, Delgado & Peña. 2009). El segundo se refiere a procesos de deformación superficial relacionados con la compactación natural o antrópica de los suelos, siendo éste un indicador importante para el análisis de los hundimientos, el cual se retomará como elemento metodológico, Tomás et al. (2009).

Existen diferentes clasificaciones para el estudio de los hundimientos, de especial interés para esta investigación se encontró la clasificación desarrollada por Carreón et al. (2006), donde los sistemas de fracturas se pueden estudiar de acuerdo a su tamaño y asociación a los factores que le dan origen, el concepto regional es relativo ya que depende de la escala y del tipo de estudio:

- 1- Escala regional, son de dimensiones mayores que la zona urbana afectada. La regularidad del basamento fracturado que subyace a las secuencias sedimentarias determina en gran medida la ubicación del fracturamiento que se propaga desde profundidad hacia las secuencias sedimentarias someras retomando planos de debilidad preexistentes.
- 2- Escala Intermedia, considera a los sistemas de fracturamiento que afectan principalmente la parte superior de la secuencia sedimentaria fluviolacustre frecuentemente interestratificada con materiales piroclásticos y volcánicos.
- 3- Escala Local, se refiere al fracturamiento en zonas restringidas y puede variar de unos cuantos a algunas decenas de metros; esta es la escala en la que se llevan a cabo la mayoría de los estudios de mecánica de suelos. Algunos ejemplos son: 1) Fracturas anulares de tensión, se generan en zonas transicionales de los piedemontes de lomeríos; 2) Grietas superficiales generadas por evaporación-desecación, etc.

De la clasificación antes mencionada, se recuperará la escala local por sus cualidades de representación espacial y de aplicación de estudios relacionados con mecánica de suelos, sin embargo existen otras clasificaciones que se basan en los mecanismos de generación de grietas (Auvinet et al., 2008), donde se mencionan los principales mecanismos: *grietas de transición brusca, grietas por estructuras geológicas sepultadas, grietas de fracturamiento hidráulico, grietas por irregularidades estratigráficas, grietas por evapo-transpiración*. Estas son fundamentales si se quisiera identificar el origen del fenómeno, sin embargo éste es otro tema y supera los objetivos de esta investigación.

1.1.2.3 Geotecnia

Partiendo de las clasificaciones y las características físicas del fenómeno, se determina que los estudios geotécnicos fungen un papel importante en el análisis de este fenómeno. Según Crespo (1993), el suelo se define como: delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan.

Por su parte, la mecánica es la parte de la ciencia física que trata de la acción de las fuerzas sobre los cuerpos. De igual forma, la Mecánica de Suelos es la rama de la Mecánica que trata de la acción de las fuerzas sobre la masa de los suelos (Crespo, 1993), su objetivo es particular y de vital importancia para la ingeniería civil, según Chávez (2006), es obtener muestras representativas de los diversos estratos que subyacen el terreno natural donde habrá que desplantarse la obra, a fin de poder determinar el nivel apropiado desde el punto de vista de resistencia y compresibilidad para apoyar cimientos. Crespo (1993) determina que el objetivo de una cimentación es proporcionar el medio para que las cargas de la estructura, concentradas en columnas o muros, se transmitan al terreno produciendo en éste un sistema de esfuerzos que puedan ser resistidos con seguridad sin producir asentamientos, o con asentamientos tolerables, ya sean éstos uniformes o diferenciales.

Es decir, diversos estudios geotécnicos tienen la finalidad de analizar las características físicas y mecánicas del suelo, una de ellas y muy importante es el grado de compactación de suelo, esta variable juega un papel crucial para todo tipo de estructuras y como su

nombre lo indica es cuantificable, por esta razón se tomará como elemento de análisis para esta investigación. Cabe resaltar que la finalidad de estos estudios geotécnicos es conocer las características del terreno para el desplante de una obra, sin embargo para nuestro caso es inverso, las construcciones existen y han existido antes de que el fenómeno se presentara. En la actualidad las viviendas presentan cuantiosos daños en un área aun no delimitada.

1.1.2.4 Suelos de la ciudad de México.

La ciudad de México se encuentra situada en una planicie lacustre, los suelos lacustres se forman mediante procesos de erosión y transporte, seguido de depositación y consolidación bajo su propio peso. El subsuelo de la ciudad de México tiene propiedades únicas. El contenido de agua es mayor a 400%, el índice de plasticidad excede 300% y el índice de compresión puede llegar a un valor de 10, cuando en la mayoría de los suelos es menor a 1 (Díaz, 2005). Los Suelos de la ciudad de México son mezclas complejas de minerales cristalinos y no cristalinos que desafían una nomenclatura sencilla debido a la multiplicidad de los eventos geológicos que los han ido conformado, por lo tanto esta complejidad incluye arcillas heterogéneas, volcánicas y lacustres con una proporción y variedad de microorganismos que adicionan compuestos solubles, así como materia orgánica residual; según los resultados del estudio de los suelos lacustres de la Ciudad de México (Ibíd., 2005.), se presenta un perfil que puede ser considerado como típico de la zona lacustre de la ciudad de México, se identifican seis zonas que describen en orden ascendente de 40m de profundidad (Figura 1).

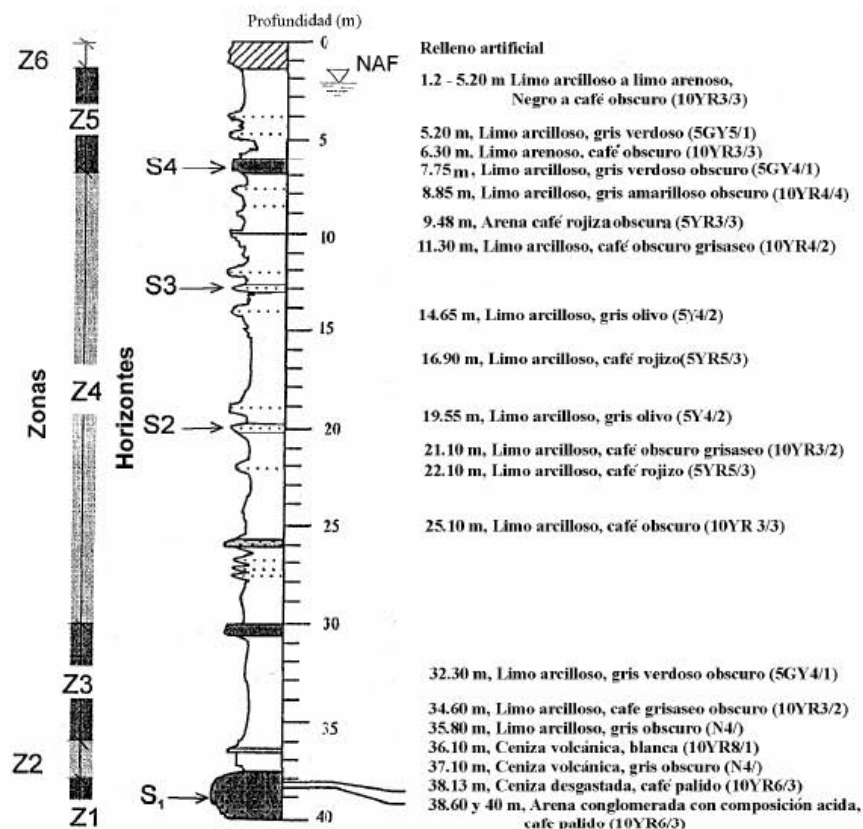


Figura 1. Columna estratigráfica representativa de la Ciudad de México. Extraído de Suelos lacustres de la ciudad de México (Díaz, 2005).

Zona 1: Arenas con grava (40-38 m)

Granulométricamente esta zona está constituida por arena con grava con una matriz de limo, las partículas mayores alcanzan un tamaño de hasta 1.5 cm. El contenido de agua no supera el 25%.

Zona 2: Arenas con grava y arenas limosas

Esta zona se caracteriza por una rápida transición de sedimentos gruesos a una textura de arenas limosas. El contenido de agua tiene un valor promedio de 100%.

Zona 3: Limo arcillosos con arena (36-30 m)

En la parte inferior de la zona, se infiere la existencia de dos paleosuelos, debido a la presencia de raíces, lo cual se refleja en los valores de Materia Orgánica (MO). Granulométricamente, esta zona se clasifica como limo arcilloso con poca arena, alcanzando un 50%. Esta zona se interpreta como una transición entre condiciones de depósito sub-aéreas y condiciones incipientes de depósito lacustre.

Zona 4: Limo arcilloso o arcilla limosa (30-7 m)

Esta es la zona más importante desde el punto de vista de la geotecnia, principalmente a su alta compresibilidad. Granulométricamente esta zona se clasifica como limo arcilloso o arcilla limosa, con poca arena. El contenido de agua se incrementa con el decrecimiento de la profundidad, con un valor de aproximadamente 200% a 30 m. y alcanzando un máximo de 420% a 7 m. Los promedios de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad son 338, 80 y 308% respectivamente.

Zona 5: Limo arcilloso con arena (7-3 m)

En la base de esta zona se encuentra un horizonte de arena, el cual presenta el mayor contenido de arena (85%) de todo el perfil, presentando variaciones a limo arenoso y limo arcilloso, el contenido de agua exhibe una tendencia a decrecer.

Zona 6: Relleno artificial (3-0 m)

Esta zona 6 es de relleno artificial, producto de la actividad humana

1.1.2.5 Suelos de San Andrés Mixquic

Un estudio realizado por la empresa Grupo de Ingeniería OPALO y recuperado por Santacruz (2009), identificó que el contenido natural de agua del limo plástico es muy variable y presenta un valor entre 25% a 390%. A la profundidad promedio de 8 m se detectó un lente de un metro de espesor en promedio formado por arenas pumíticas muy compactas. En la perforación a cielo abierto a una profundidad de 2.7 m. se encontró relleno de limo arenoso café oscuro con roca de basalto vesicular de color gris oscuro con basura de compacidad media. La profundidad de los pozos estuvo limitada por la dureza del material, y durante los trabajos geotécnicos no se encontró nivel freático (Ibíd., 2009). Lo anterior corrobora que los primeros metros del suelo lacustre se puede identificar material limo arcilloso a limo arenoso intercalado con materiales de relleno, materia orgánica y el contenido de agua tiende a decrecer, sin embargo en sus conclusiones no hace una relación entre el la composición de material y grado de compactación respecto al sistema de fracturas que se puede identificar en el poblado.

1.1.3 Vulnerabilidad y lotes expuestos

La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas (CENAPRED, 2006).

Los resultados del análisis del peligro a hundimiento local y fracturas definen que el fenómeno presenta límites concretos y un área específica de afectación, por ello no todos

los lotes en el área de estudio se encontrarán *expuestos* a este fenómeno, es así que el concepto de *exposición* cobra relevancia.

Por esta razón, los lotes que se encuentren sobreposicionados en la zona de hundimiento local y fracturas se clasificaron como vulnerables ya que se encuentran expuestos al fenómeno de hundimiento local y fracturas, es decir son propensos a ser afectados o dañados por este fenómeno, cabe resaltar que se distinguirá el uso de suelo por lote generando una diferencia entre los lotes que presenten un uso de suelo con cierta capacidad de asistencia (iglesia) en contraste con lotes de uso habitacional que recae en el número de personas concentradas. Por último se identifican los lotes expuestos a las zonas de susceptibilidad a generación y propagación del fenómeno, tomando el grado de susceptibilidad asignado.

1.2 Metodología

1.2.1 Características generales

La metodología utilizada en esta investigación retomará algunas herramientas determinadas por la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU, 2014), en las Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo 2014, para la identificación, cartografía y análisis de "Fallas y fracturas", dicha metodología establece cinco niveles de análisis que parten del reconocimiento de campo, cartografía del fenómeno y análisis bibliográfico; sin embargo, en este estudio proponemos una metodología para la identificación, cartografía y análisis de las zona afectada por hundimientos locales. Esta metodología ha

sido desarrollada a partir de un esquema que contempla un aumento progresivo en el grado de detalle enfocándose en el análisis a escala local.

A continuación se enlistan los pasos a seguir para el desarrollo de la metodología.

1) Identificación, se recorrerá toda la zona de estudio con la finalidad de generar un mapa preliminar con la evidencia de las áreas dañadas por fracturas y así delimitar los alcances espaciales de la investigación.

2) Cartografía de la estructura, mediante un recorrido de campo se tomarán los datos estructurales en toda el área de afectación, entre los datos se tiene el azimut de las fracturas visibles en pavimento, echado, área que afecta y longitud. Los datos anteriores se georreferencian con navegador GPS. Dando como resultado un mapa estructural de peligro.

3) Se determinará la compactación del subsuelo con equipo PANDA, la distribución de los sondeos tomará como criterio sondeos dentro y afuera de la estructura de hundimiento local.

4) Mediante el análisis de los resultados de compactación del subsuelo, se realizará la comparación de las condiciones dentro y fuera de la estructura, y se identificarán las zonas susceptibles a presentar nuevos sistemas de fracturas.

5) Una vez obtenidas las áreas de peligro y las zonas susceptibles a la expansión o generación de fracturas, se identificarán los lotes vulnerables y expuestos respecto a las áreas antes mencionadas.

1.2.1.1 Escala de trabajo

La escala de trabajo en la que se desarrollada en esta investigación se encuentra determina por nivel de detalle que se quiera representar, el CENAPRED, 2006 propone que para la elaboración de Atlas de riesgos se deben utilizar dos escalas principales: para zonas urbanas (ciudades y áreas metropolitanas) 1:5,000 o mayor, y para una representación a nivel estatal, una escala menor de 1:20,000 donde el elemento mínimo de representación es la manzana, en ese sentido el elemento base representado en esta investigación será el catastro, pudiendo generar cartografía a escalas que oscilantes entre los 1:2,000. Por otro lado, los mapas temáticos del Capítulo II se trabajarán a escala 1: 85 000, basados en cartografía vectorial de INEGI 1:1 000 000 y 1:250 000.

1.2.1.2 Sistemas de Información Geográfica

Desde su creación, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han tenido una aplicabilidad para resolver problemas vinculados con las Ciencias de la Tierra, considerando un cambio paradigmático tecnológico e intelectual, este paradigma debe ser entendido como el procedimiento de técnico y metodológico que permite, por un lado, tratar la espacialidad de los datos, y por otro, favorecer el estudio de la realidad desde enfoques multidimensionales e integrados como son el tiempo, el espacio y las “personas” que interactúan con el territorio en un momento determinado (Bosque et al. 2012). La

representación espacial de los fenómenos que causan desastres, necesita de estas herramientas que, de manera concreta se pueden determinar sus alcances y dimensiones. Dadas estas cualidades, los SIG se han convertido en la principal herramienta en esta investigación.

1.2.1.3 Insumos

Materiales de campo:

- Brújula Brunton
- Navegador GPS marca Garmin Etrex vista
- Penetrómetro dinámico automático asistido por ordenador (PANDA)

Materiales de gabinete

- Software: ArcGIS 10.2, Surfer y Pandaw.
- Cartografía vectorial INEGI escala 1:50 000, cartas: E14A39, E14B31, E14A49 y E14B41.
- Cartografía Vectorial INEGI escala 1:1 000 000 y 1:250 000: provincias y subprovincias fisiográficas, Edafología, Climatología, Uso de suelo y vegetación.
- Cartografía vectorial catastral de Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI).
- Fotografía de vuelo fotogramétrico INEGI, resolución píxel 20 cm.

2 Marco geográfico e histórico de la zona de estudio

2.1 Localización

2.1.1 Caracterización de la cuenca del valle de México

La cuenca de México se localiza dentro de la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico, el cual abarca desde el Océano Pacífico, hasta el Golfo de México formando un cinturón en dirección Este-Oeste (Díaz, 2005).

Esta cuenca permaneció abierta (cuenca exorreica) hasta hace 700,000 años, cuando una gran actividad volcánica formó una enorme cortina natural denominada la Sierra de Chichinautzin, que provocó el cierre de la misma, convirtiéndola en una cuenca endorreica (Ibíd., 2005). Esta configuración dio origen a los lagos de Chalco, Xochimilco, Texcoco, Xaltocán y Zumpango dentro de la cuenca de México ubicada en la subprovincia denominada Lagos y volcanes de Anáhuac (Figura 2).

Los límites de la cuenca son en el norte, las sierras de Tezontlalpan, Tepotzotlán y Pachuca, alcanzando una altura máxima de 3,000 m. Al sur se levantan las sierras del Ajusco y de Chichinautzin, con altitudes que van de 3,800 a 3,900 m. En el oriente, se localiza la Sierra Nevada, en donde sobresalen por su altitud los picos nevados del Popocatepetl y del Iztaccíhuatl con 5,747 y 5,286 m de altura, respectivamente. Y, hacia el poniente se localizan las sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, de hasta 3,600 m. Todas las sierras son de origen volcánico (Espinoza, 2008).

Provincias y subprovincias fisiográficas.



Figura 2. Mapa de localización de provincia y subprovincias fisiográficas de la zona de estudio, INEGI 2010.

2.1.2 Localización de la zona de estudio

El pueblo de San Andrés Mixquic se ubica al sur-oriente de la Ciudad de México, políticamente forma parte de la delegación Tláhuac y colinda con las siguientes poblaciones: por el norte con Valle de Chalco Solidaridad, por el sur con San Nicolás Tetelco, por el oriente con San Mateo Huitzilzingo y por el occidente con San Juan Ixtayopan (Figura 3). Sus coordenadas extremas son: 19°13'50" y 19°13'00" latitud norte; 98°58'10" y 98°56'30" longitud oeste, se encuentra a una altura aproximada de 2,240 metros sobre el nivel del mar. Internamente se divide en cuatro barrios: al NNW se encuentra el barrio Los Reyes, al SSE el barrio de San Miguel, al NNE el barrio San Bartolomé y al SSW el barrio de San Agustín, todos estos circundan el centro donde se ubica el panteón y el Templo de San Pedro Apóstol.

Ubicación Político - Administrativa San Andrés Mixquic.

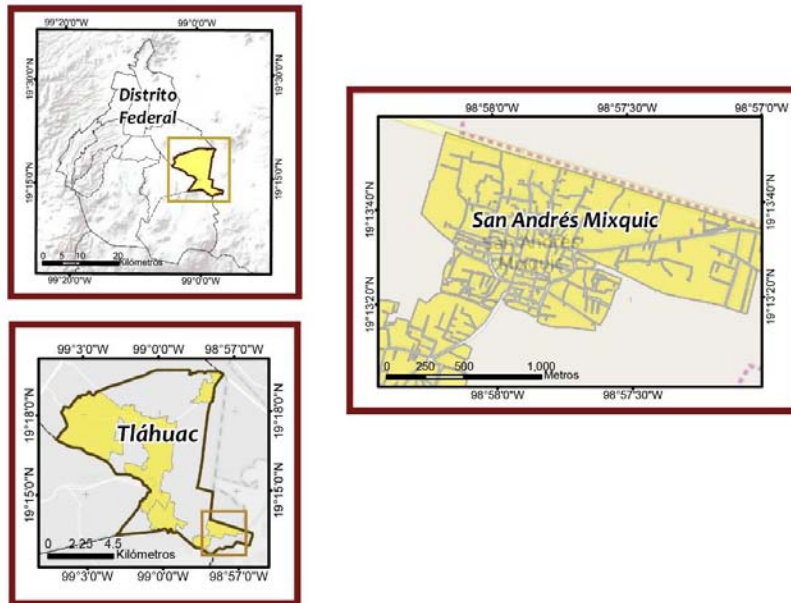


Figura 3. Mapas de Ubicación político administrativa de San Andrés Mixquic, INEGI 2010.

2.2 Geología

El mapa geológico elaborado por el Servicio Geológico Metropolitano (SGM, 2015), representa la litológica superficial de la siguiente manera: materiales ígneos extrusivos básicos (24 %), de los cuales: en la parte norte se encuentran las rocas ígneas extrusivas básicas del Neógeno, representando el (6%), en el sur las rocas ígneas extrusivas básicas del Cuaternario representan el 18% mientras que en la parte sur, este, oeste y centro, predominan depósitos lacustres (76 %) con granulometrías de arena, limo y arcilla (Figura 4). Por su parte, la secuencia estratigráfica está representada por una planicie que consta de varias capas lacustres de material arcilloso, caliza y productos volcánicos. Se calcula

que este paquete sedimentario tiene un espesor de 700 m. La base está constituida por un sustrato volcánico del Mioceno (SEDUVI, 2008).

2.3 Edafología

De acuerdo con INEGI (2010), en la delegación Tláhuac se pueden encontrar seis tipos de suelos donde predomina el Regosol con un 17% del territorio delegacional, donde en la zona de estudio predomina el tipo Glaysol (Figura 5).

2.4 Climatología

De acuerdo con el INEGI, 2010 y García, 1998, el 24.8% de la delegación presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media $C[w1](w)$, mientras que el resto de la superficie: 75.2% presenta clima templado subhúmedo con lluvias en verano, pero de menor humedad $C[w0](w)$. La precipitación media anual de 600 a 700 mm por año en las partes bajas, mientras que en las partes altas, la precipitación se encuentra en el orden de 700 a 800 mm por año. El rango de temperatura es de 12° y 18°C, (Figura 6).

2.5 Hidrología

Antes de las intensas modificaciones antrópicas sobre los cuerpos de agua y las corrientes, existía un conjunto de lagos en la Cuenca de México; unos eran lagos dulces, mientras que otros eran de agua salada. Los lagos se interconectaban por temporadas y eran abastecidos por corrientes que tenían su origen en las partes montañosas, principalmente de la Sierra Nevada, la Sierra de Chichinautzin y los deshielos del

Popocatepetl, así como la precipitación de lluvia. De acuerdo a lo reportado por INEGI, 2010, Tláhuac pertenece a la región hidrológica del Pánuco RH26, a la cuenca del río Moctezuma y a la subcuenca de lago de Texcoco-Zumpango. Las modificaciones antrópicas al medio han determinado las condiciones actuales de los ríos, canales y cuerpos de agua en la demarcación.

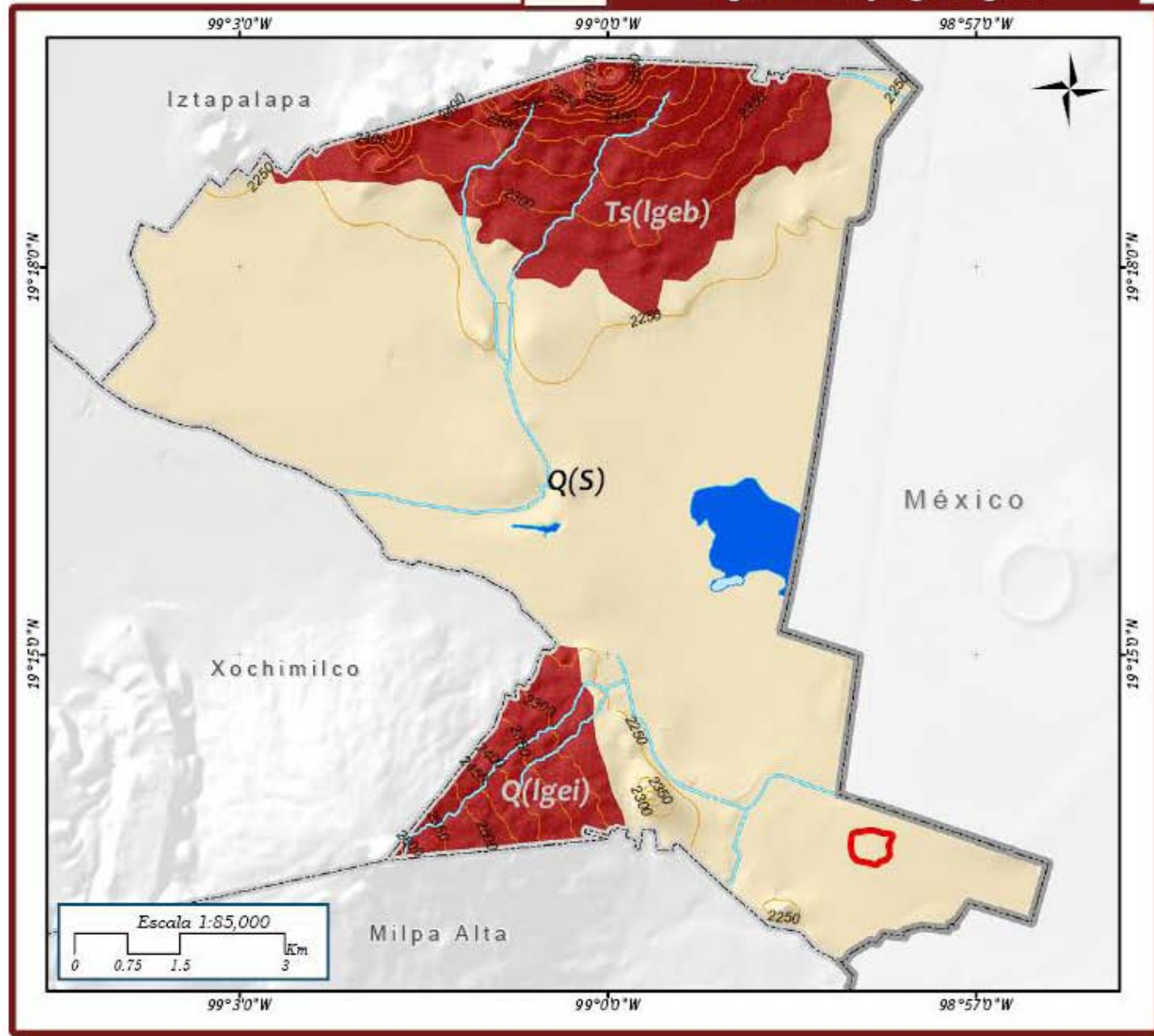
Con las obras iniciadas a partir de la época Colonial para desecar los lagos, medida que continuó hasta entrado el siglo XX, la extracción de agua del subsuelo, la modificación en los cauces que drenaban hacia los lagos y la contaminación de los mismos, se transformó el sistema hidráulico de la cuenca. En la actualidad, sólo quedan algunos canales y cuerpos de agua, de los cuales podemos mencionar: Chalco, el Guadalupano, el Atecuayuc y el Amecameca, siendo los dos primeros importantes para la zona chinampera de la delegación. Adicionalmente, existen otros canales más pequeños que configuran el sistema de riego de la zona agrícola. En la colindancia con San Miguel Xico, en el Estado de México, se encuentra una zona de inundación permanente llamada Ciénega de Tláhuac, que representa una importante reserva ecológica (Figura 7).

2.6 Uso de suelo y vegetación

De acuerdo con INEGI, 2010, el 51% de la superficie de la delegación se encuentra clasificada como: agricultura de temporal, 11% como riego eventual, 22% como zona urbana y el resto 17% como pastizal inducido, sin embargo en la zona de estudio predomina el uso de suelo denominado agricultura de temporal (Figura 8).



Figura 4. Mapa geológico.



SIMBOLOGÍA

Límites

- Limite estatal
- Limite delegacional
- ▭ Área de estudio

Geología

Clave	Era	Sistema	Clase	%
Q(s)	Cuaternario		Depósito lacustre	78
Q(lgeb)			Ignea extrusiva básica	18
Ts(lgeb)	Neógeno		Ignea extrusiva intermedia	8

Riesgos hidrológicos

- Corriente de agua
- Cuerpos de agua intermitentes
- Cuerpos de agua perenne

Datos de relieve

- Curva de nivel, equidistancia 50 m.

Datos técnicos:

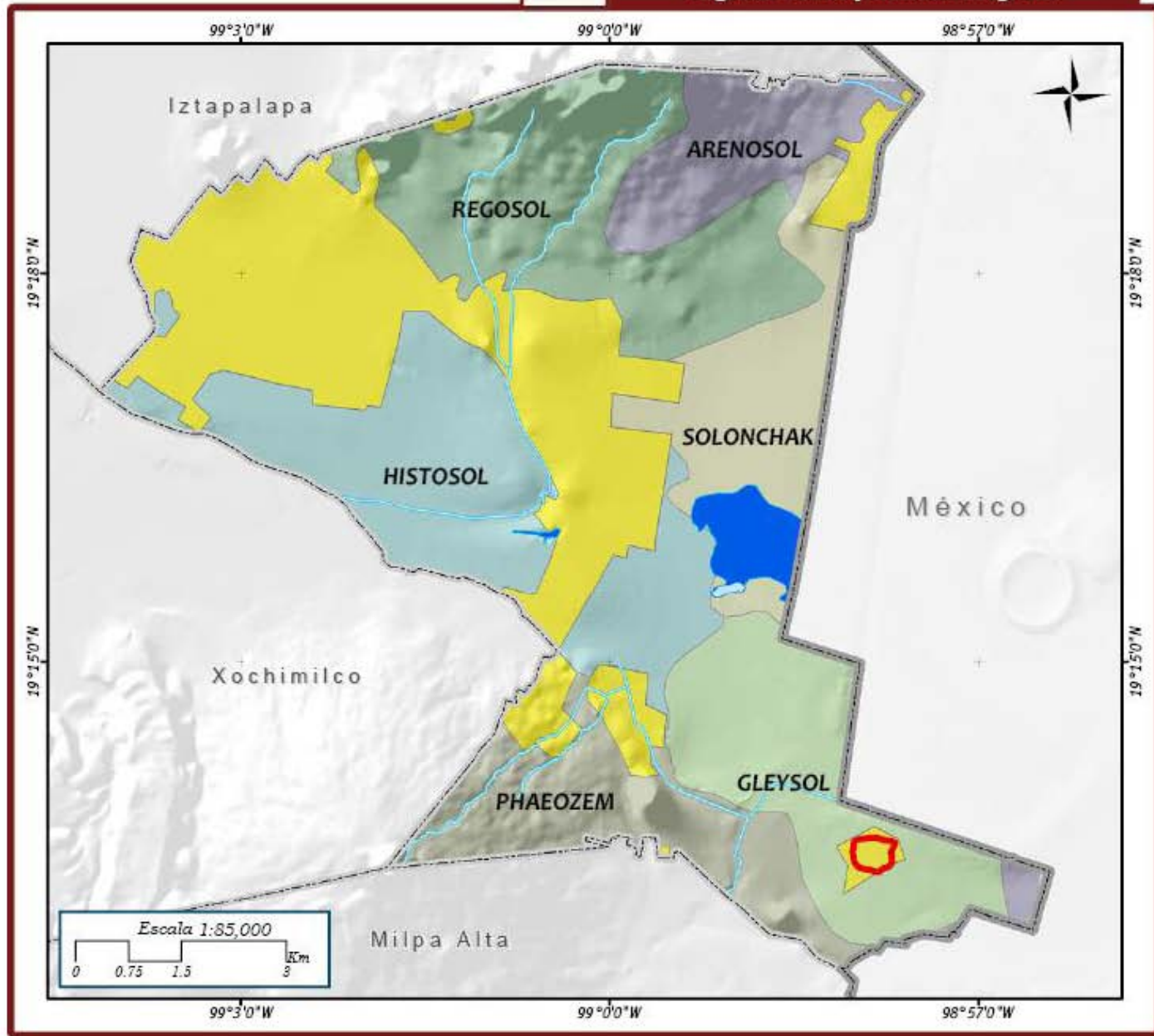
Datam: WGS84
 Sistema de coordenadas: Geográficas
 Gradicula: 0° 3' 0"
 Unidades: Grados

Fuente: INEGI, cartografía vectorial. Escala: 1:1,000,000
 Restitución de Mapa geológico elaborado por SGM, 2015.





Figura 5. Mapa edafológico.



SIMBOLOGÍA

Limites políticos

- Limite estatal
- Limite delegacional
- ▭ Área de estudio

Edafología

Clave de suelo	Textura	%
Arenosol	Gruesa	7.53
Regosol	Media	17.80
Solonchak	Fina	10.70
Histosol	Media	13.70
Gleysol	Media	13.09
Phaeozem	Media	10.10
Suelo Urbano	NA	28.27

Rasgos hidrológicos

- Corriente de agua
- ▭ Cuerpos de agua intermitentes
- ▭ Cuerpos de agua perenne

Datum: WGS84 Gradícula: 0° 3' 0"

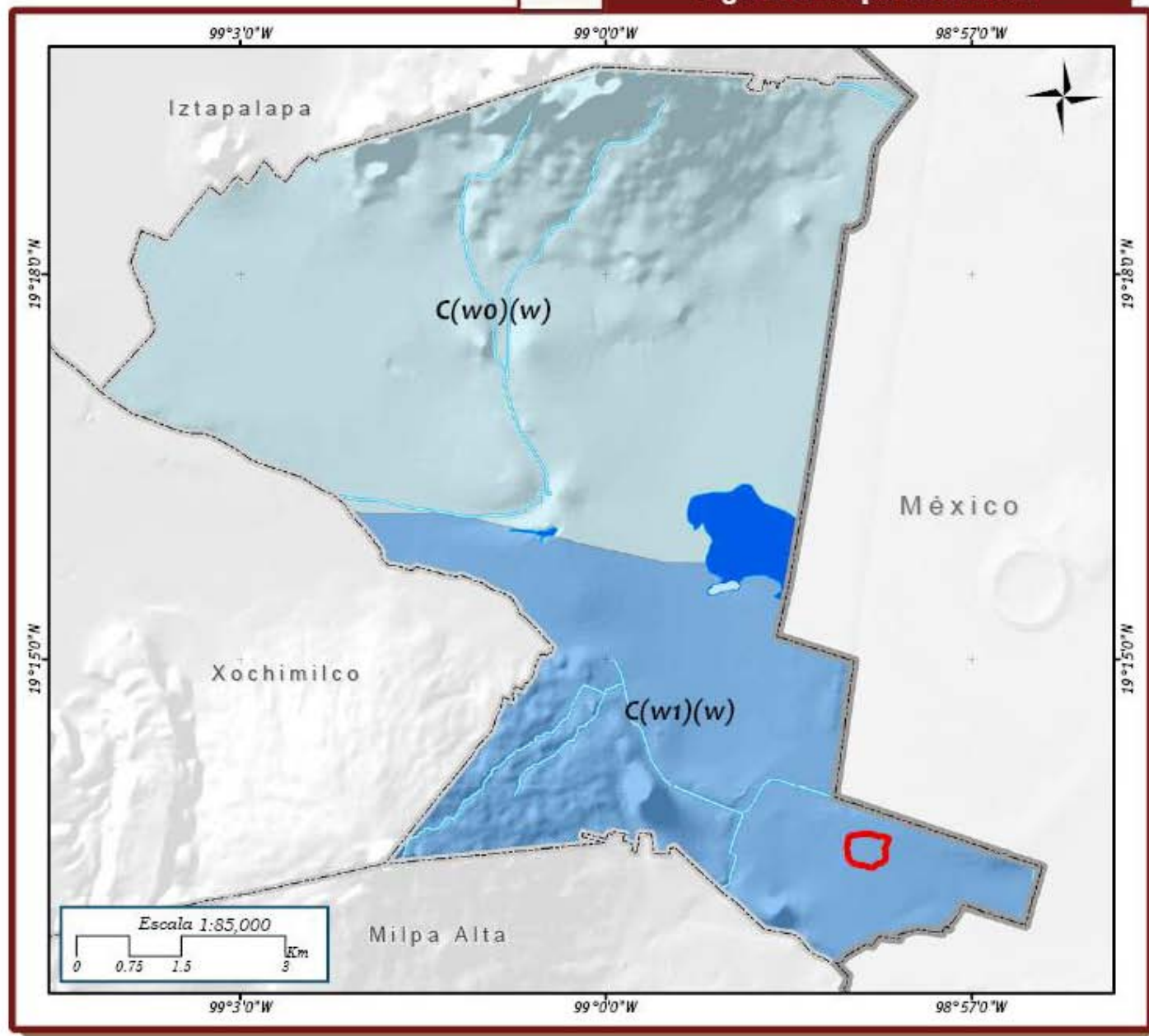
Sistema de coordenadas: Geográficas Unidades: Grados

Fuente: INEGI, cartografía vectorial Escalas: 1:1,000,000/1:250,000





Figura 6. Mapa de climas.



SIMBOLOGÍA	
Límites políticos	
	Límite estatal
	Límite delegacional
	Área de estudio

Climas				
Clima	Clave	Subtipo climático	Grado de humedad	Régimen de lluvias
C(w0)(w)	C = Templado	(w) = subhúmedo	0 = menos húmedo	(w) = precipitación de verano
C(w1)(w)			1 = húmedo	

Rasgos hidrológicos	
	Corriente de agua
	Cuerpos de agua intermitentes
	Cuerpos de agua perenne

Datam: WGS84
 Sistema de coordenadas: Geográficas
 Fuente: INEGI cartografía vectorial. Escalas: 1:1,000,000 / 1:250,000. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (García, 1998).
 Graduada: 0' 3' 0"
 Unidades: Grados





Figura 7. Mapa hidrológico.



SIMBOLOGÍA

Límites políticos

- Límite estatal
- Límite delegacional
- Área de estudio

Rasgos hidrológicos

- Corriente de agua
- Acueducto
- Canal
- Canal natural
- Cuerpos de agua intermitentes
- Cuerpos de agua perenne

Datum:
WGS84

Gratícula:
0° 3' 0"

Sistema de
coordenadas:
Geográficas

Unidades:
Grados

Fuente:

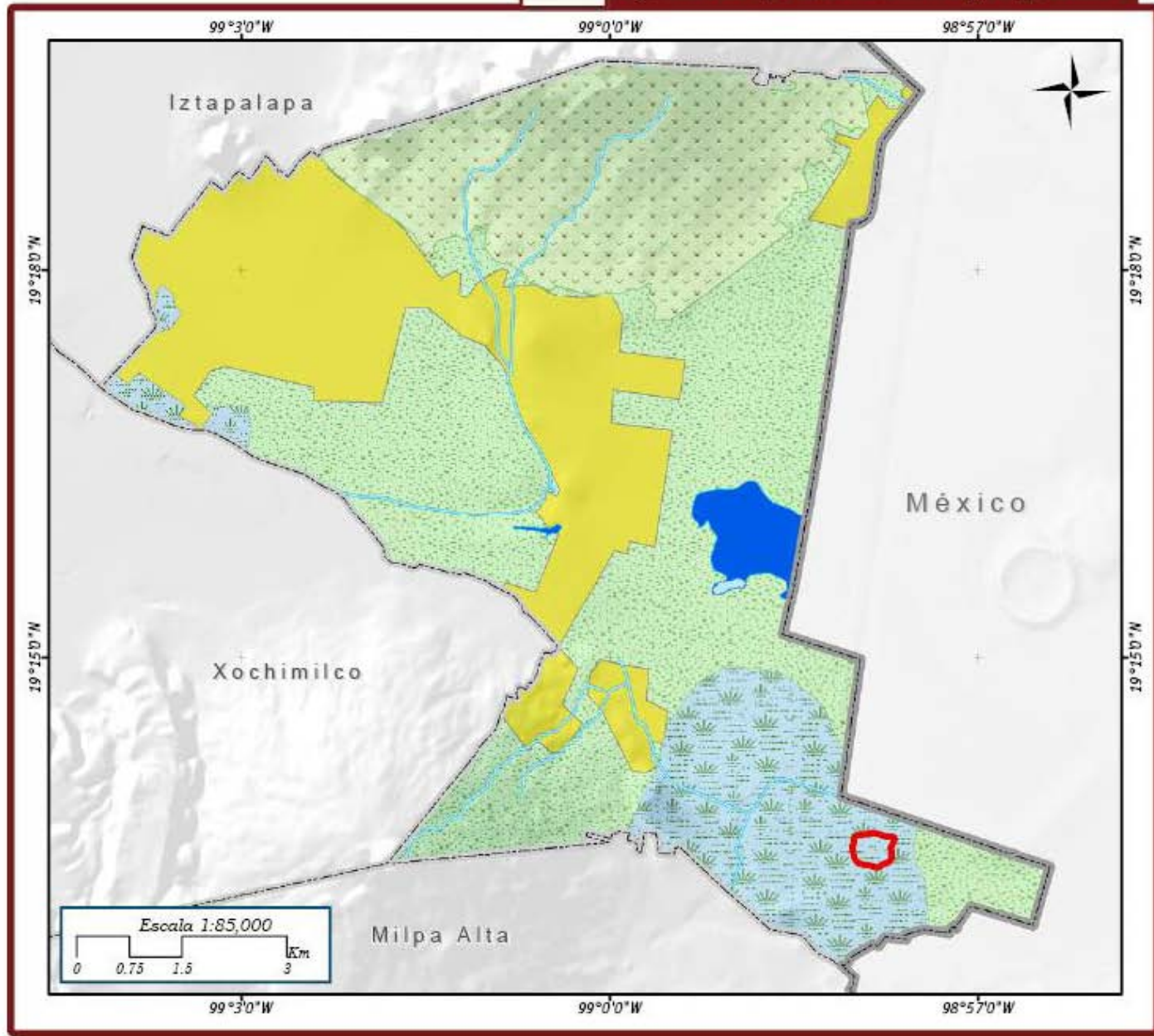
INEGI, cartografía vectorial. Escalas: 1:1,000,000/1:250,000.

LOCALIZACIÓN





Figura 8 .Mapa uso de suelo y vegetación.



SIMBOLOGÍA

Límites políticos

- Limite estatal
- Limite delegacional
- Localidad urbana
- Área de estudio

Uso de suelo y vegetación

Uso de suelo	Área km ²
Agricultura de riego eventual	11.3
Agricultura de temporal	61
Localidad urbana	22.5
Pastizal inducido	17

Rasgos hidrológicos

- Corriente de agua
- Cuerpos de agua intermitentes
- Cuerpos de agua perenne

Datos de relieve

- Curva de nivel, equidistancia 60 m.

Datos: WGS84 **Graticula:** 0' 3" 0"

Sistema de coordenadas: Geográficas **Unidades:** Grados

Fuente: INEGI, cartografía vectorial. Escalas: 1:1,000,000/1:250,000.



2.7 Marco histórico

2.7.1 Breve historia de la Ciudad de México

De acuerdo con Brom, 2007, la cuenca ha sufrido cambios a lo largo del tiempo y ha sido la acción antrópica la que la ha modificado drásticamente. A continuación se mencionan algunos de los periodos históricos más trascendentes en función del grado de antropización.

Horizonte Preclásico (1200 a. C. a 200 d. C.). Cuicuilco fue una de las primeras ciudades del Valle de México debido a la erupción del volcán Xitle, se abandonó la Ciudad.

Horizonte Clásico (200 d. C. a 800 d. C.). Teotihuacán ciudad que tuvo una extensión territorial de 22 Km y hasta 150 000 habitantes.

Horizonte Posclásico (800 d. C. a 1519 d. C.). Tenochtitlán ciudad fundada por los aztecas sobre la superficie del antiguo lago de México. Se le calcula una superficie de 15 km² y una población cercana a las 80,000 personas. El islote se amplió mediante el sistema de chinampas con un diseño con apariencia cuadrada, formada de avenidas y canales ornamentados alrededor de un centro ceremonial integrado por pirámides, así como templos altos y palacios.

Etaa colonial. Tras finalizar la conquista de Tenochtitlan, se nombró a México (La Antigua México – Tenochtitlan), capital del Virreinato de la Nueva España, edificándose la ciudad española sobre los restos de la ciudad indígena.

Siglo XVIII. La ciudad sufre inundaciones catastróficas. Inicia la construcción de El Tajo de Nochistongo es la primera salida artificial, se construye sobre el Río Cuautitlán e inicia a operar en el año de 1789

Siglo XX. 1900 se inauguran el Gran Canal del Desagüe y el primer Túnel de Tequisquiac. 1910-2010, el área urbana se incrementó en 54.6 veces su valor.

La ciudad de México tuvo un lento crecimiento hasta la década de los años 40 cuando se inició la construcción de edificios altos, entre los cuales destaca la Torre Latinoamericana basada en un sistema novedoso de cimentación compensada con pilotes de fricción (Díaz, 2005).

2.7.2 Historia de San Andrés Mixquic

La palabra Mixquic deriva del vocablo mizquitl (mezquite) y de locativo (en el). El origen de San Andrés Mixquic se remonta aproximadamente desde antes del año 670 D.C. fundado en un "islote" dentro del lago de Chalco (Flores, 2012). Sus pobladores desarrollaron una técnica agrícola denominada chinampa, definida como un suelo artificial para el cultivo intensivo y para la habitación, mediante técnicas que combinan drenaje y creación de suelo (CONAGUA, 2009), que por sus características intrínsecas y culturales esta población se le ha denominado "comunidad lacustre", considerado como un importante centro local que ocupaba unas 45 hectáreas y cuya población oscilaba entre 1125 y 2250 habitantes (López & Urcid, 2002).

Después de la llegada de los españoles, por varios siglos, la zona permaneció ajena al crecimiento de la mancha urbana, e inmersa en las actividades agrícolas,

A finales del siglo XVIII inicia la desecación de la cuenca del Valle de México a fin de evitar las inundaciones, y en 1895 Porfirio Díaz cedió el permiso a Íñigo Noriega para desecar definitivamente el Lago de Chalco, dando como resultado la obtención de extensas zonas de cultivo, dentro de los límites delegacionales (Ibíd., 2012).

Para los primeros años del siglo XX Mixquic era una pequeña isla, es decir, la zona centro donde ahora se ubica el templo de San Pedro Apóstol era la zona firme del pueblo, a los alrededores los caminos eran conocidos como acalotes, las construcciones eran de paredes de adobe y techadas de dos aguas con ramas. Mixquic no se encontraba aislada, formaba parte de una importante red de canales conectadas por el canal de Viga para comercializar sus productos agrícolas, aproximadamente por el año 1938 los pueblos chinamperos se quedaron sin contacto por vía lacustre (Ibíd., 2012). Testimonio del rápido cambio de uso de suelo y desecación de principales canales.

De 1948 a 1950 los canales de Tláhuac estaban secos y en Mixquic estaban bajando el agua de modo alarmante, las chinampas al sureste de Tláhuac y cerca de Ixtayopan han quedado secas, fue en 1952 cuando el pueblo se secó¹,

¹ Ibid., p. 59-61.

El siguiente cambio urbanístico fue rellenar con piedra y tierra los canales para convertirlos en calles. Esta acción fue un parte-aguas en la historia representando un giro en la vida cotidiana²

Debido a la dinámica poblacional, los servicios y equipamiento urbano, además del incremento de los asentamientos irregulares en zonas antiguamente chinamperas, contribuyo en esencia a un mínimo incremento de 4,300 habitantes en 1960 a 6,045 habitantes en 1970 y 11,000 habitantes para 1980, en 1984 15,000 habitantes y para el año 2000 se consideran 30,000 habitantes³

Nuevos proyectos de urbanización por parte del Gobierno del Distrito Federal de enfoque urbanístico, sigue minando la solución de problemas como el transporte y la vivienda, en función de regularización de nuevos previos irregulares.

² Ibid., P. 72.

³ Ibid., P. 74-75.

3 Desarrollo metodológico.

3.1 Delimitación del área de estudio

Se realizó un primer recorrido de campo con la finalidad de identificar y referenciar elementos afectados por el hundimiento local y fracturas de terreno, el propósito es delimitar el área afectada y generar el polígono de estudio. Los parámetros cualitativos identificados son los daños en construcciones y vialidades (fracturas en pavimento y daños en viviendas, en algunos casos se identificaron desplazamientos verticales). Durante el recorrido en campo se utilizaron navegadores GPS, el punto de partida fue el centro de San Andrés Mixquic. Se registraron 22 puntos GPS. La delimitación del área de estudio se restringe sólo al centro de San Andrés Mixquic (Figura 9).

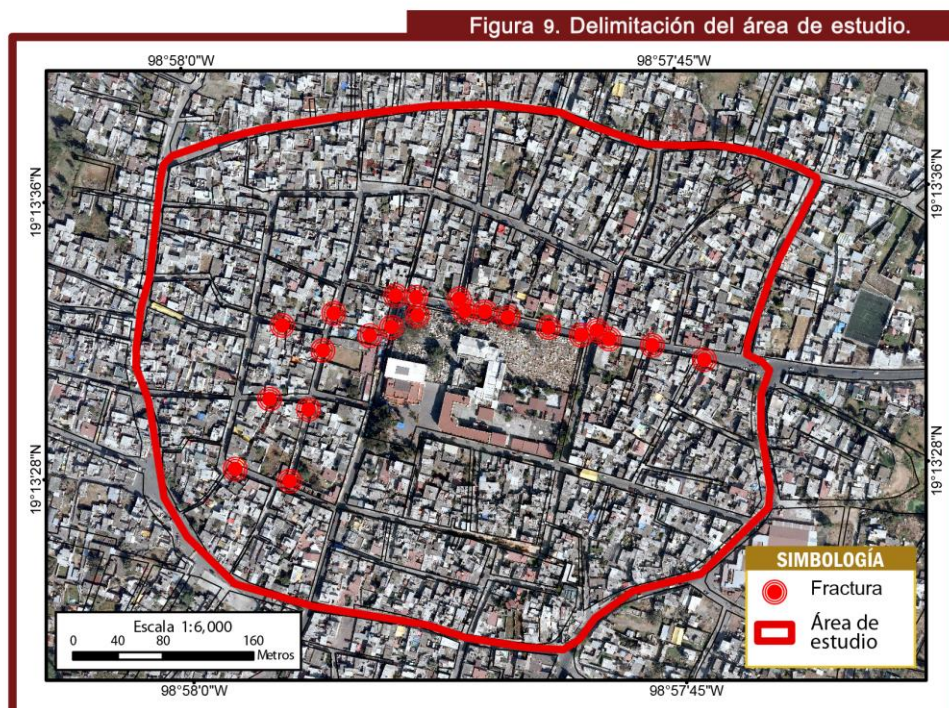


Figura 9. Mapa de delimitación de área de estudio en el pueblo de San Andrés Mixquic, los puntos en color rojo indican los lugares donde se identificaron fracturas en calles, viviendas e infraestructura en general

3.2 Levantamiento y análisis estructural

El levantamiento estructural consiste en caracterizar líneas y planos, las líneas se caracterizan por medio de la dirección y la segunda queda establecida por el ángulo respecto a la horizontal. La dirección de una línea o azimut es el ángulo que forma una línea con la dirección Norte-Sur, medida de cero a 360 grados a partir del norte, en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj (Márquez et al., 2006). El ángulo de inclinación de un plano o echado, se define como el ángulo de inclinación máximo de un plano con respecto a la horizontal, su cálculo es perpendicular a la línea de azimut y va de 0 a 90°. Por otro lado, el desplazamiento vertical se refiere a la distancia que existe de un bloque Aa respecto a un bloque (Bb) es decir, el bloque Bb desciende respecto al bloque Aa, lo cual genera una distancia en la vertical o brinco (Figura 10).

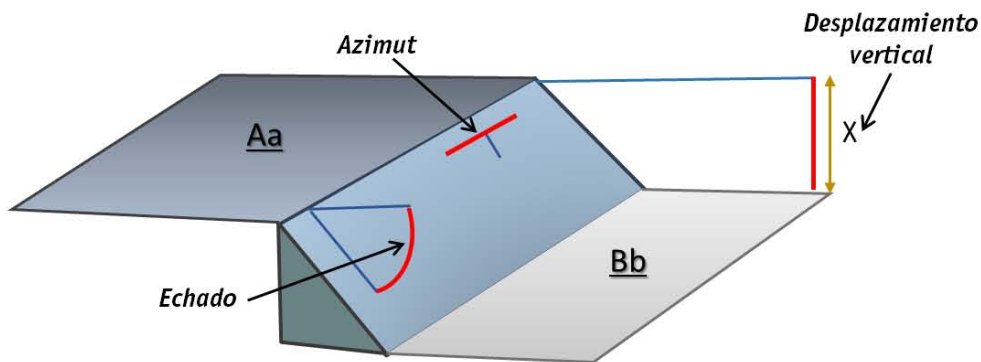


Figura 10. Esquema que representa los tres datos estructurales obtenidos en campo, Azimut, Echado y desplazamiento vertical (un bloque Bb desciende respecto a un bloque Aa).

Por lo anterior, la adquisición de datos en campo se refiere al levantamiento sistemático de azimut, echado y desplazamiento vertical de todas las fracturas identificadas en San Andrés Mixquic, recopilando únicamente las encontradas sobre el pavimento.

3.2.1 Levantamiento y análisis

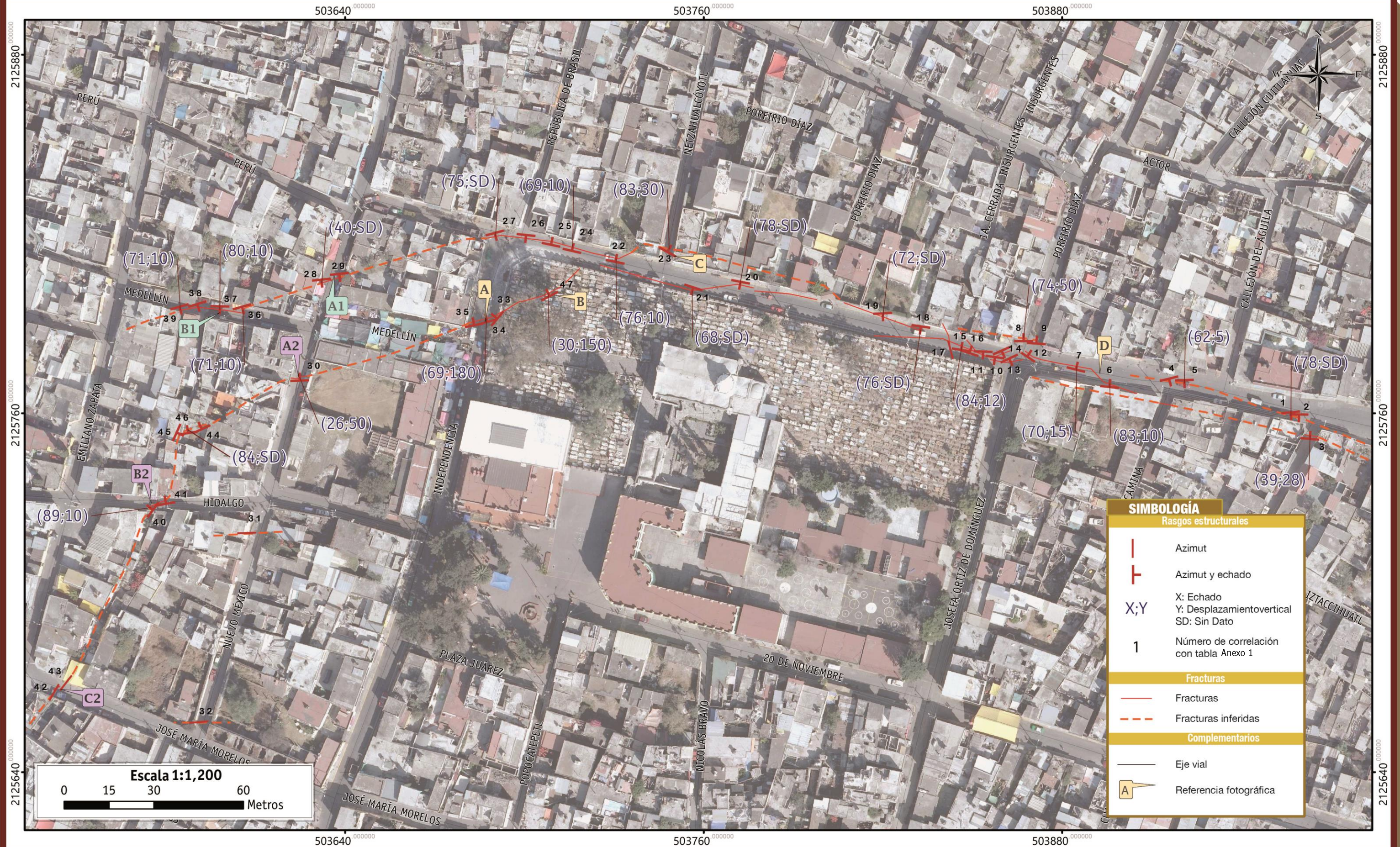
El levantamiento estructural se realizó el 15 y 16 de agosto del 2013. La distribución de los datos se observa en el mapa de la Figura 11.

Se recopilaron un total de 47 datos estructurales y se realizó un análisis estadístico mediante el uso del azimut de cada uno de los datos y se representaron mediante un esquema llamado *roseta* o rosa de direcciones (Figura 12). Los resultados indican que existen dos direcciones principales de fracturas, la primera (A) presenta una dirección general que va de los 259° a 288° con un 29.7% de los datos, la segunda (B) abarca de los 73° a los 98° con un 34% del total de los datos, aunado a ello se identificaron dos sistemas secundarios de fracturas con claves A1 Y A2 que van de los 255° a 259° y de los 216° a 220° respectivamente, cada sistema de fracturas representan un 6.3% de los datos, el 24.4% restante se concentra en datos dispersos que no logran formar una estructura concreta. En términos generales esta estructura de peligro presenta una alineación E-W.

De los 47 datos obtenidos, 24 presentaron un desplazamiento vertical destacando dos medidas, la primera identificó en la calle Independencia con 1.80 m y la segunda dentro del panteón de San Andrés Mixquic con 1.50 metros (Figura 14), el resto de los datos oscila entre los 50 a los 5 cm, para mayor detalle consultar la tabla del Anexo 1.



Figura 11. Mapa de peligro por fracturas.



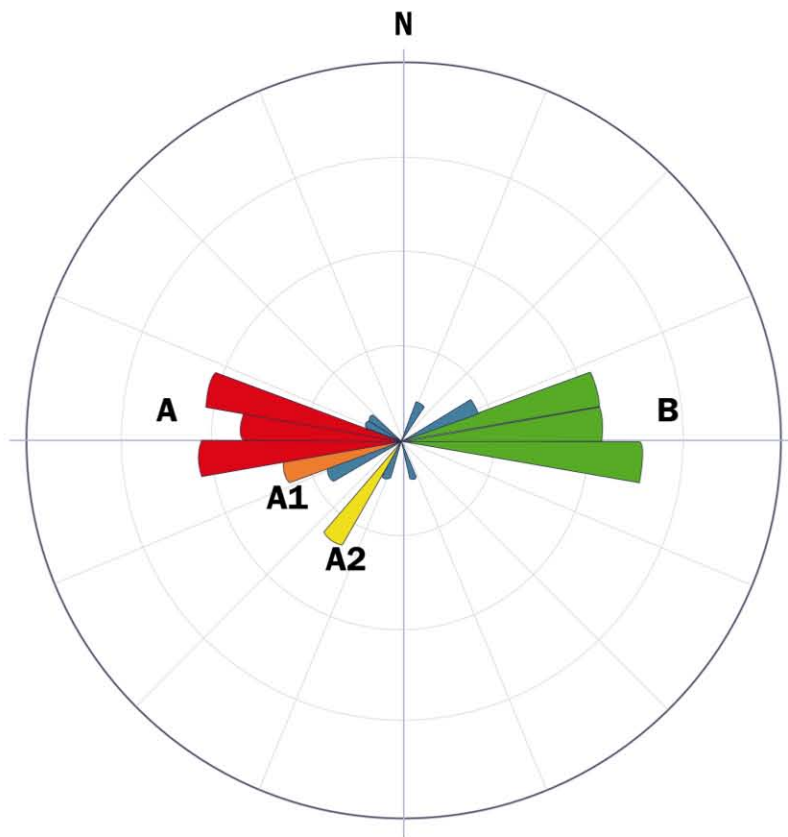


Figura 12. Rosa de direcciones. En color rojo y verde (A y B) se observa el sistema principal de fracturas, en color amarillo y naranja (A1 y A2) los sistemas secundarios, por último el color azul el resto de las fracturas.



Figura 13. Fotografía A (Ubicada en el mapa de la Figura 11. Mapa de peligro por fracturas). En esta imagen se observa el hundimiento de una vivienda respecto al nivel de la calle.



Figura 14. Fotografía B (Ubicada en el mapa de la Figura 11. Mapa de peligro por fracturas). Donde se identifica algunos daños en las construcciones dentro del panteón.



Figura 15. Fotografía C (Ubicada en el mapa de la Figura 11. Mapa de peligro por fracturas). En la imagen se observa una fractura en el pavimento con escalonamiento, ésta incide en la barda perimetral amarilla.



Figura 16. Fotografía D (Ubicada en el mapa de la Figura 11. Mapa de peligro por fracturas). Evidencia de una fractura con desplazamiento vertical, ubicada en la avenida Plutarco Elías Calles.

Los datos estructurales tomados en pavimento definen planos de fracturas continuos, sin embargo su continuidad se pierde al interior de los lotes, por esta razón los datos obtenidos en calles consecutivas respecto a los lotes de una misma manzana y con un azimut similar corresponden a una misma fractura, llegando a una inferencia total de la fractura y del sistema estructural que define la zona de hundimiento. Con lo anterior se obtuvo la cartografía total de la estructura. Se muestran algunos ejemplos fotográficos de esta configuración.



Figura 17. Fotografías A1 y B1 (Ubicadas en el mapa de la Figura 11. Mapa de peligro por fracturas). Imágenes obtenidas en calles consecutivas a una misma manzana afectada por una fractura.



Figura 18. Fotografías A2, B2 y C2 (Ubicadas en el mapa de la Figura 11. Mapa de peligro por fracturas). Imágenes obtenidas en calles consecutivas a dos manzanas afectadas por una fractura.

La extensión total de las fracturas identificadas en campo es de 363 metros mientras que las fracturas inferidas duplican el número con 668 metros, dando un total de 1030 m, estos resultados denotan que en una pequeña extensión de espacio se identificó un sistema estructural complejo con límites bien definidos.

3.3 Compactación de suelos y análisis de susceptibilidad

La cuantificación del grado de compactación del suelo requiere de una etapa de exploración y muestreo mediante mediciones de campo y sondeos. Los métodos de exploración, mencionados por CONAGUA (2007) se clasifican en tres:

- Métodos indirectos, se realizan mediciones directas de propiedades físicas de los suelos y rocas mediante el método geosísmico y geoelectrico.
- Métodos semidirectos, consisten en realizar pruebas en el campo para estimar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos mediante correlaciones empíricas previamente establecidas, un ejemplo son las pruebas de resistencia a la penetración.
- Métodos directos, se obtienen muestras representativas que sometidas a pruebas de laboratorio sirven para clasificar y determinar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo.

Esta investigación tomará un método semidirecto, concretamente la resistencia a la penetración por el hecho de ser un equipo accesible y fácil de utilizar, ayudando a caracterizar las condiciones de compactación de la zona de estudio.

3.3.1 Equipo utilizado

Penetrómetro Automático Numérico Dinámico Asistido por ordenador (PANDA), consiste en un equipo de penetración dinámica, el proceso básico es enterrar en el suelo en tren de barras (cuya longitud por varilla es de 50 cm), en su extremo inferior una punta cónica que penetra por medio de un hincado manual empleando un martillo de 2 kg de peso. Un

micro procesador recibe la resistencia dinámica de punta y la penetración alcanzada (cm) para cada golpe de martillo, posteriormente los datos son exportados y procesados por medio del software Pandaw.

Los resultados se representan por medio de gráficos o penetrográmas donde se observa la resistencia a la penetración en Mega Pascales (MPa), en función de la profundidad expresada en metros (Figura19).

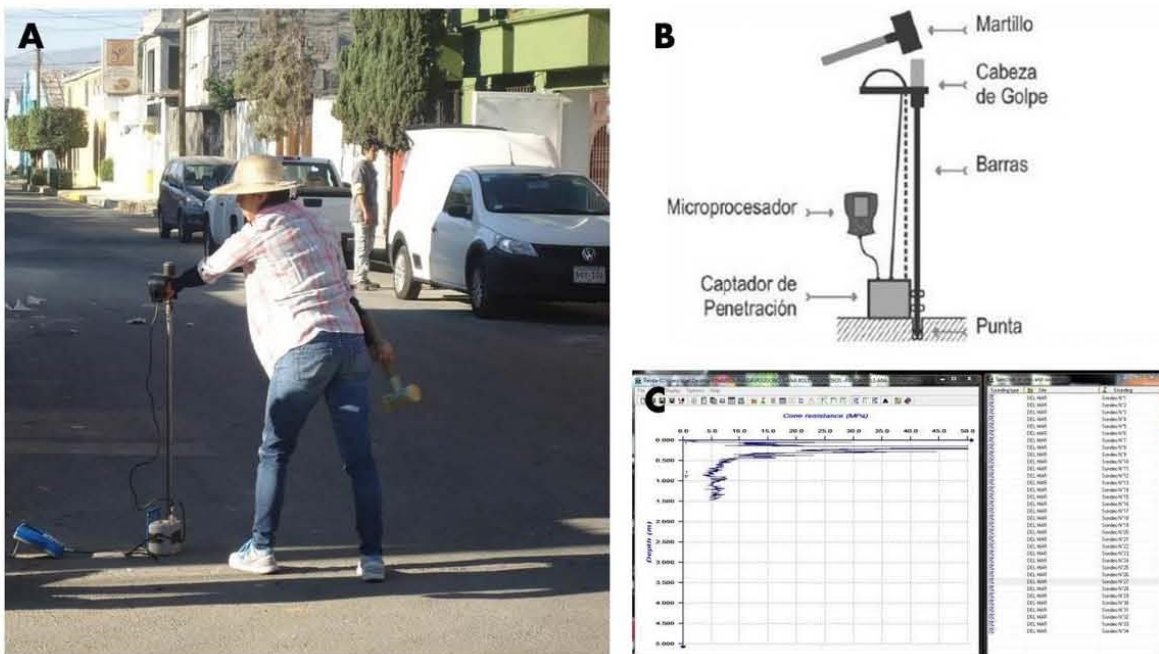


Figura 19. Imagen A; se ejemplifica el uso del PANDA en campo. Imagen B; esquema con las partes que componen el PANDA. Imagen C; penetrográma o gráfico de representación de datos.

3.3.2 Aplicación de sondeos

El primer parámetro tomado en cuenta para la distribución y aplicación de sondeos es muestrear los grados de compactación dentro de la estructura de hundimiento y los grados de compactación fuera de esta.

El segundo parámetro es una distribución de sondeos con cierta alineación, que respete la zona de estudio, tamaño y geometría de la estructura previamente cartografiada, la finalidad es generar perfiles de compactación de suelos.

3.3.3 Análisis y distribución

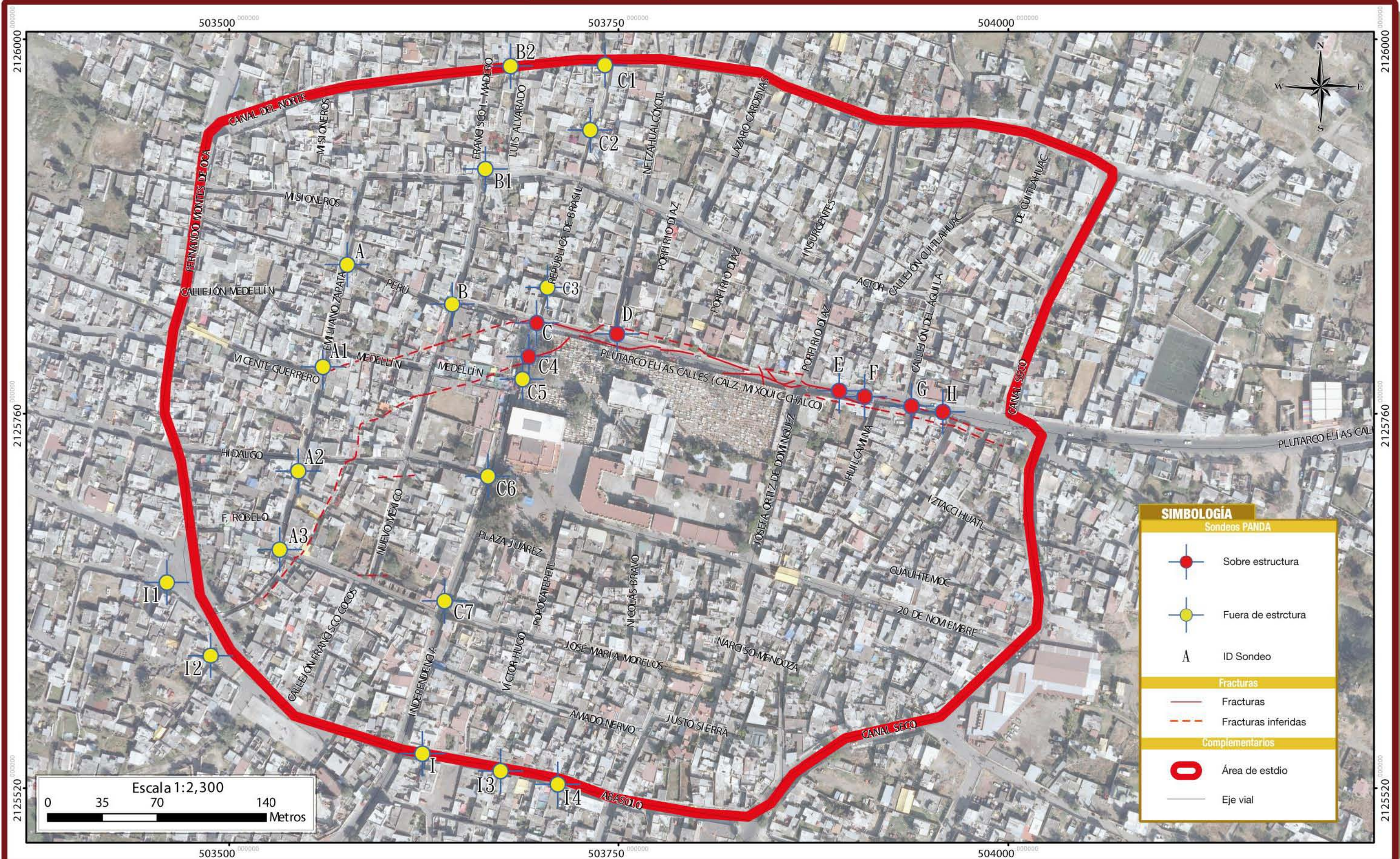
Se aplicaron un total de 25 sondeos dentro del polígono tomando como límite el área de estudio (Figura 9). La profundidad máxima alcanzada llega a los 2.4 metros. Los grados de compactación Máximos registrados fueron de 188 Mega Pascales (MPa) con un mínimo de 0.11 MPa, promediando 13.87 Mpa.

La distribución de los sondeos es la siguiente (Figura 20) Sondeos aplicados dentro de la estructura 7: *C, C4, D, E, F, G, H*. Sondeos elaborados fuera de esta 18: *A, A1, A2, A3, B, B1, B2, C1, C2, C3 C5, C6, C7, I, I1, I2, I3, I4*.

Mediante los sondeos C2 y C4 y sus penetrogramas (sondeos elegidos al azar teniendo un sondeo dentro y otro fuera de la estructura), se realizará un análisis con la finalidad de identificar tendencias y anomalías en las gráficas, esto ayudará a un posterior tratamiento de todos los demás sondeos por medio de estadística descriptiva.



Figura 20. Mapa de distribución de sondeos PANDA.



Sondeo C2

Se ubica en la calle Republica de Brasil a 128 metros de la zona de hundimiento, el sondeo tiene una profundidad de 2.46 metros, se identificaron seis zonas de compactación a profundidad (Figura 21), la primer zona (A) va de los 0 a los 34.3 cm con una resistencia promedio de compactación de 6.62 MPa (esta zona presenta los grados más bajos de compactación), la segunda zona (B), va de los 34.4 cm a los 50 cm presentando una resistencia promedio de 40 Mpa, la tercer zona (C), va de los 50.1 cm a los 89.4 cm, su resistencia es de 10.60 MPa, en esta misma zona se observa un círculo amarillo con picos aislados de compactación que sobresalen del histograma llegando hasta los 25 MPa, la siguiente zona (D), inicia a los 89.5 cm a 1.25 metros, la subsecuente zona (E), inicia a los 1.251 metros y finaliza a los 2.291 metros con una resistencia promedio de 13.32 MPa, esta zona también presenta picos aislados de compactación alta llegando a los 23.5 MPa, por último encontramos la zona (F), iniciando a los 2.291 m hasta los 2.46 m con un promedio de resistencia de 7.88 MPa.

Sondeo C4

Se ubica en la calle Independencia frente la entrada de la iglesia principal, por su ubicación se encuentra dentro de la estructura de hundimiento, presenta una profundidad de 2.26 m y se clasificaron 5 zonas de compactación (Figura 22), la primer zona (A), va de los 0 a 25 cm de profundidad con un promedio de 8 MPa, la segunda zona (B), va de los 25.1 cm a los 1.129 m con una compactación promedio de 3.99 MPA, la tercer zona (C), va de los 1.130 m a los 1.500 m con un promedio de compactación de 8.24 Mpa, la

cuarta zona (D), va de los 1.501 m a los 1.879, su grado de compactación es de 3.26 Mpa, la quinta y última zona (E) va de los 1.880 m a los 2.269 m con un promedio de compactación de 6.61 Mpa.

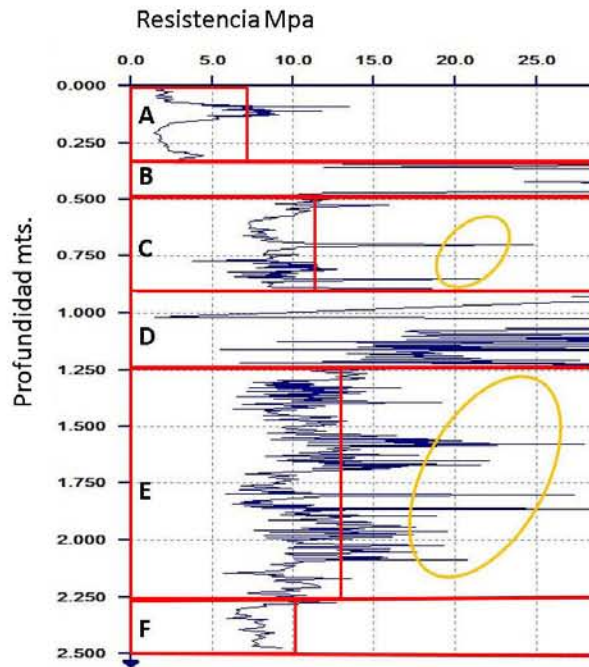


Figura 21. Gráfica del sondeo C2 ubicado en la calle Independencia, en eje horizontal se representan los grados de compactación en Mpa y el eje vertical representa los metros de penetración del sondeo. Se identifican 5 zonas con poca variación de compactación, A, B, C, D, E y F delimitadas por líneas rojas, los círculos amarillos representan picos con anomalías de compactación.

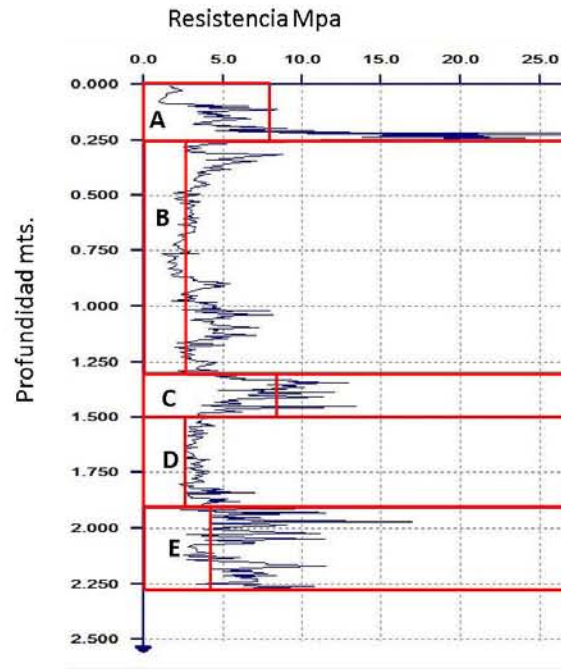


Figura 22. Gráfica del sondeo C4 ubicado en la calle Independencia, en eje horizontal se representan los grados de compactación en MPa y el eje vertical representa los metros de penetración del sondeo. Se identifican 5 zonas con poca variación de compactación, A, B, C, D y E delimitadas por líneas rojas.

En los penetrogramas anteriores observamos que la resistencia a la penetración presenta “zonas” con poca variación de compactación en relación a la profundidad, por lo tanto, es factible generar un análisis de frecuencias para determinar cuántas y cuáles son los intervalos de compactación que determinen una relación constante entre compactación-profundidad.

Por otra parte, algunas de estas zonas registran picos con altos grados de compactación de alta resistividad que sobresalen del promedio, esto se observa en la Figura 21 zonas C y E, se identifican en círculos amarillos, debido a la complejidad de composición del suelo

no se descartan materiales tales como rocas que generen dichas anomalías, éstas debe ser depuradas antes de realizar una distribución de frecuencias.

En este trabajo se utilizó estadística descriptiva partiendo de dos objetivos particulares, el primero es generar un diagrama de caja y bigotes (más adelante se definen dichos conceptos), para conocer la distribución de la totalidad de datos e identificar las anomalías respecto a los cuartiles y eliminar estos picos de altas compactaciones, el segundo es generar una distribución de frecuencias de la totalidad de sondeos e identificar los rangos y las frecuencias que los caracterizan.

3.3.4 Diagrama de caja y bigotes

Los diagramas de cajas y bigotes son representaciones gráficas de una distribución estadística unidimensional basada en valores mínimo, máximo, los cuartiles Q_1 , Q_2 o mediana y Q_3 que representan el 25%, 50% y 75% respectivamente, este diagrama proporciona una distribución de la simetría de los datos y la existencia de valores atípicos. El valor atípico es una observación numéricamente distante del resto de los datos, se obtiene tomando como referencia la diferencia entre el primer cuartil Q_1 y el tercer cuartil Q_3 o valor mejor conocido como intercuartil, considerando que el valor atípico leve se encuentra 1.5 veces esa distancia (CMA, 2015), Figura 23.

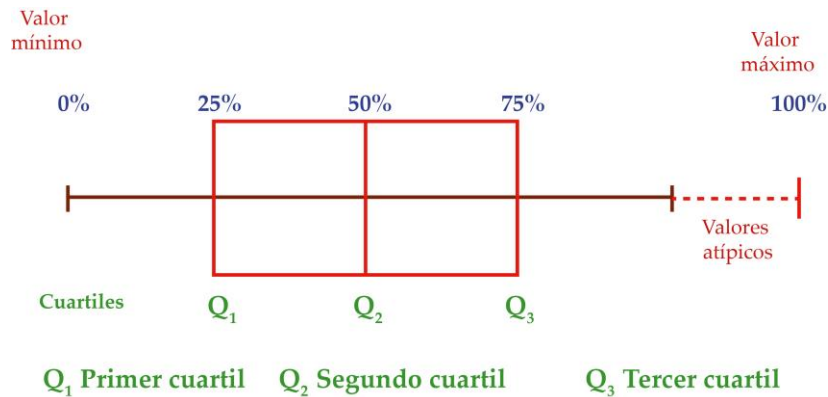


Figura 23. Diagrama de caja y bigotes donde se identifican los cuartiles Q1, Q2, Q3, valores máximos, mínimos y valores atípicos.

El diagrama de caja y bigotes se aplica a todos los sondeos teniendo total de 7,825 datos.

Los resultados se observan en la Tabla 2.

Cuartiles, min y máx.	Valor
MIN	0.11
Q1	4.15
Q2 o MEDIANA	8.41
Q3	15.99
MAX	188.05

Tabla 2. Resultados de caja y bigotes, Q1, Q2, Q3, valores máximos y mínimos.

Con esto identificamos que del 25% al 75% de los datos se encuentran entre los 4.15 MPa y los 15.99 MPa. Los valores atípicos leves identificados son a partir de -13.24 MPa para el límite inferior, este valor se descarta debido a no contamos con valores negativos en los sondeos, por otro lado el límite máximo presenta un valor atípico leve de 33.75 MPa, es decir, los valores superiores a esta cifra son atípicos y no serán contemplados en el posterior análisis de frecuencia (Figura24).

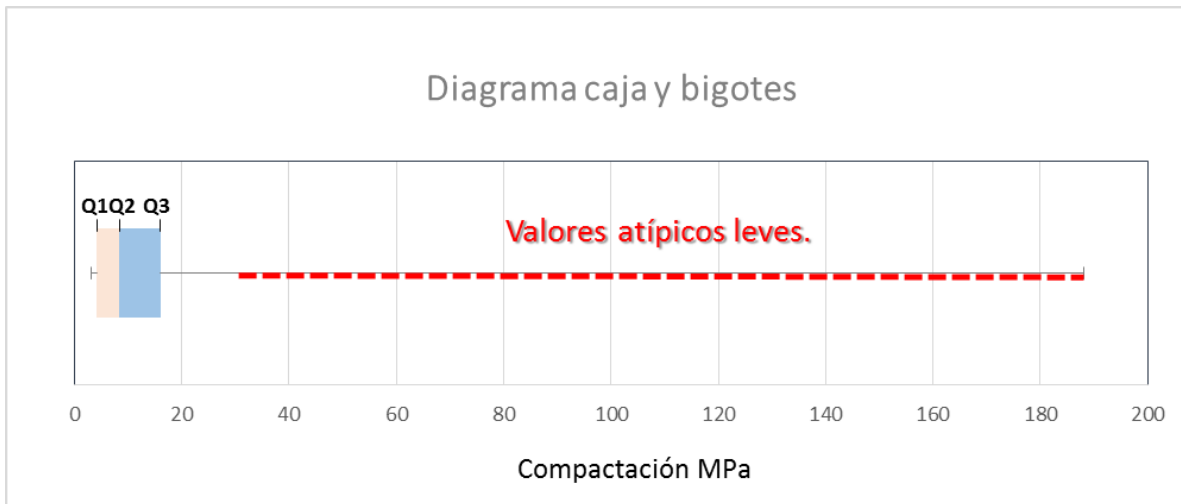


Figura 24. Diagrama de caja y bigotes aplicado a los 7,825 datos de 25 sondeos, se observa que el total de los datos se concentran entre los 4.15 y 15.99 MPa, la línea roja indica los valores atípicos que parten del 33.75 hasta 188.05 MPa, este intervalo de datos serán eliminados.

3.3.5 Distribución de frecuencias

El propósito de una distribución de frecuencias es organizar y clasificar por categorías un grupo de datos mediante características cuantitativas, en este caso (MPa) y determinar los intervalos de compactación que presentan mayores frecuencias. Esta distribución se aplicará primero a los 25 sondeos, posteriormente se dividirá en dos grupos: los 18 sondeos aplicados fuera de la estructura de hundimiento y finalmente a los 7 sondeos elaborados dentro de esta. Los intervalos se generan a partir de la teoría de Sturges según Estuardo (2015) y Valera, et al., 2015) la cual nos dice que el número de intervalos es igual a $1 + 3.3 \log_{10}$ del total de datos, la amplitud de clase se calcula mediante el rango (valor máximo menos valor mínimo) entre el número de intervalos.

Los resultados de la primera distribución de frecuencias (25 sondeos) arroja una distribución de 13 intervalos y presenta una amplitud de clase constante de 2.58 MPa, la distribución de frecuencias por porcentaje se observa en la Figura 25.

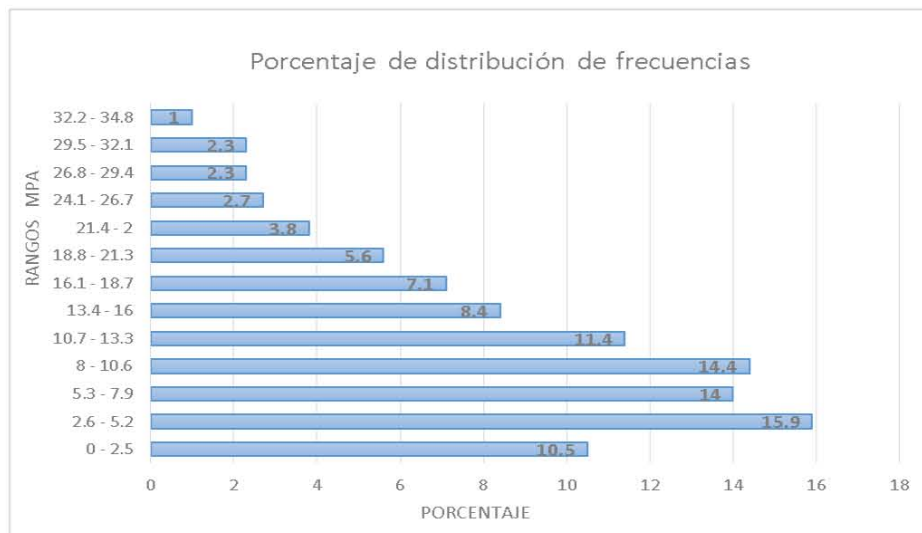


Figura 25. Gráfica de barras que representa el porcentaje de la distribución de frecuencias aplicada a 25 sondeos PANDA.

En la Figura 25 se observa que el intervalo de compactación 2.6 a 5.2 MPa concentra el 15.9% de los datos, siendo este el de mayor frecuencia, le siguen los intervalos 8 a 10.6 MPa y 5.3 a 7.9 MPa con 14.4 y 14% respectivamente, en cuarto lugar encontramos el intervalo con los grados de compactación más bajos que van de los 0 a los 2.5 MPa concentrando el 10.5% de los datos, los 8 intervalos restantes contienen menos de 10% de las frecuencias mostrando un escalonamiento descendente a partir del intervalo 13.4-16 MPa hasta el último 32.2-34.8 MPa. En términos generales, los primeros 5 intervalos (de menor a mayor compactación) contienen el 66.2% de las frecuencias.

Los resultados de la segunda y tercer distribución de frecuencias (análisis de sondeos fuera y dentro de la estructura con 18 y 7 sondeos respectivamente) en ambos casos arroja una distribución de 12 intervalos generados a partir de la teoría aplicada a la distribución anterior, su amplitud de clase es constante y para el primer caso es de 2.60 MPa y para el segundo de 2.66 MPa, la distribución de frecuencias por porcentaje se observa en la figura 26 y figura 27.

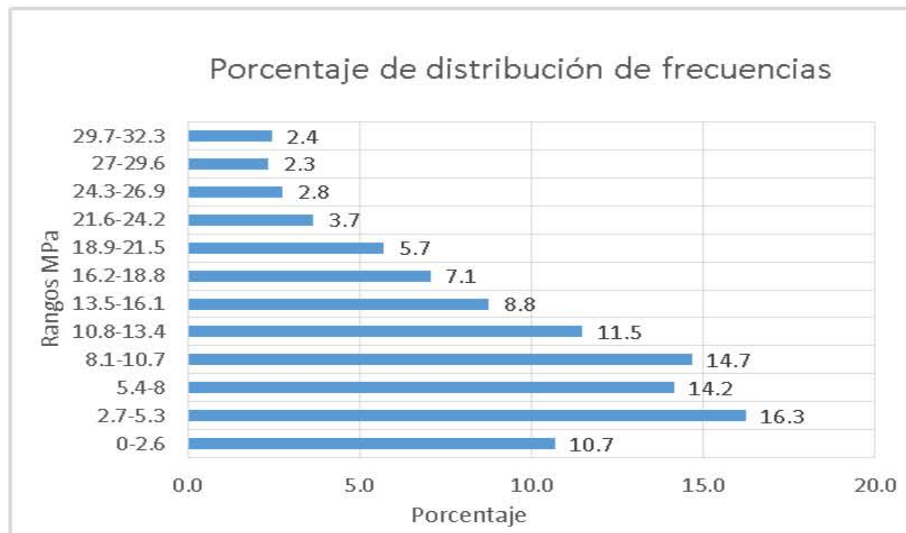


Figura 26. Gráfica de barras que representa el porcentaje de la distribución de frecuencias aplicada a los 18 sondeos PANDA aplicados fuera de la estructura de hundimiento.

En la gráfica de la Figura 26 (sondeos fuera de estructura), observamos que esta distribución de frecuencias resultó similar a la generada con los 25 sondeos partiendo de que los primeros 5 sondeos son mayores a 10% y la suma de sus porcentajes es igual a 67.4% presentando un cambio de 1.2%.

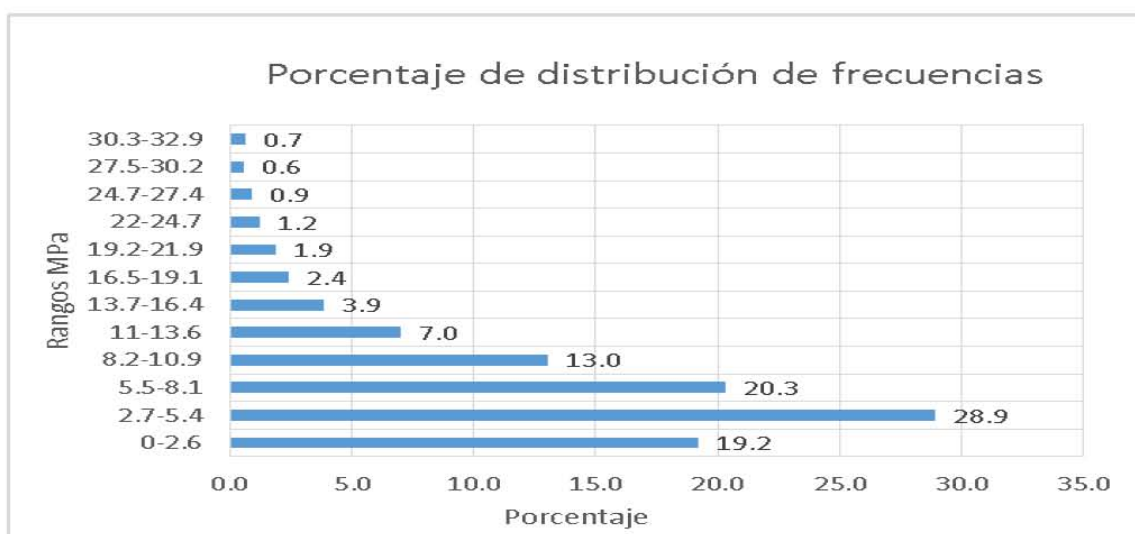


Figura 27. Gráfica de distribución de frecuencias de 7 sondeos aplicados dentro de la zona de hundimiento.

En la figura 27 (sondeos dentro de estructura) se observa que los valores de los tres rangos de más baja compactación se disparan, el rango que va de los 2.7 a 5.4 MPa presenta el mayor porcentaje con 28.9 %, le siguen los rangos 5.5-8.1 y 0-2.6 MPa, con 20.3 y 19.2 MPa, la sumatoria del porcentaje de estos tres rangos da un total de 68.4%, mayor que las dos distribuciones anteriores donde se contemplaban cinco intervalos. Los 9 rangos restantes presentan un escalonamiento descendente partiendo del 13% que presenta el rango 8.2-10.9 MPa, este porcentaje es distante por 6.2 % de los tres primeros rangos.

La diferencia de estas dos últimas distribuciones de frecuencias se observa en la Figura 28.

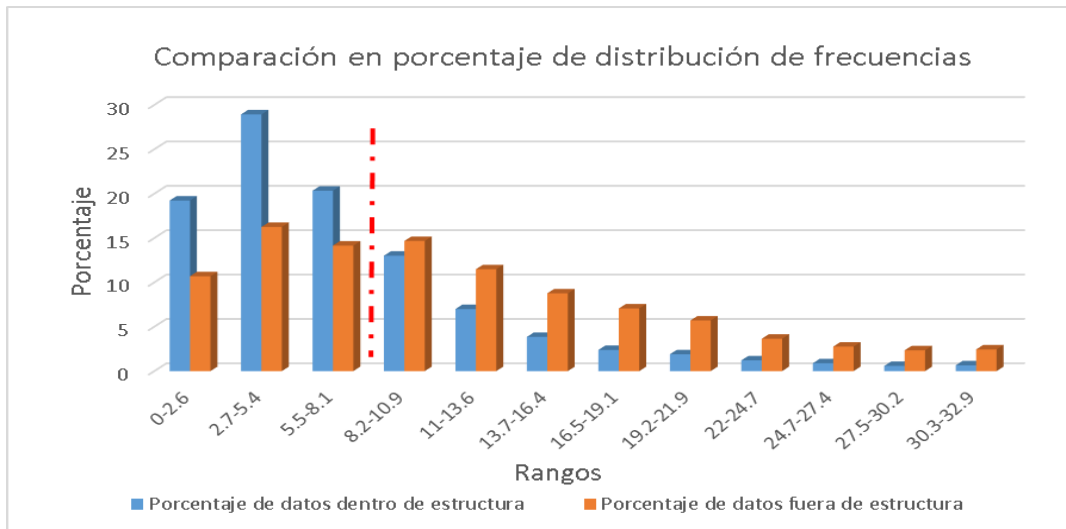


Figura 28. Sobreposición de gráficas de barras, en color naranja se observa el porcentaje de los sondeos fuera de la estructura de hundimiento y en color azul de los sondeos aplicados dentro de la estructura de hundimiento, la línea discontinua indica la división de los rangos en función del porcentaje que predomina.

3.3.6 Rangos

Con los resultados anteriores definimos que los tres rangos de menor compactación son representativos de la zona de hundimiento o son los grados en MPa suficientes compactación para que el fenómeno se manifieste, por esta razón se genera una clasificación tomando como elemento la agrupación de tres rangos, el primero constará de la agrupación los siguientes: 0.11-2.6, 2.7-5.4, 5.5-8.1 MPa, estos rangos se unificarán en un solo intervalo que partirá de 0.11 MPa a los 7.9⁴ MPa.

⁴ Se tomará el valor de 7.9 MPa en lugar de 8.1 MPa basados en la distribución de frecuencias de los 25 sondeos con la finalidad de buscar homogeneizar intervalos.

La clasificación de los intervalos subsecuentes se obtendrá mediante una proporción de rangos similar a la anterior, es decir generalizando y unificando rangos de tres, esto resultará un total de 4 intervalos de compactación (Figura 29).

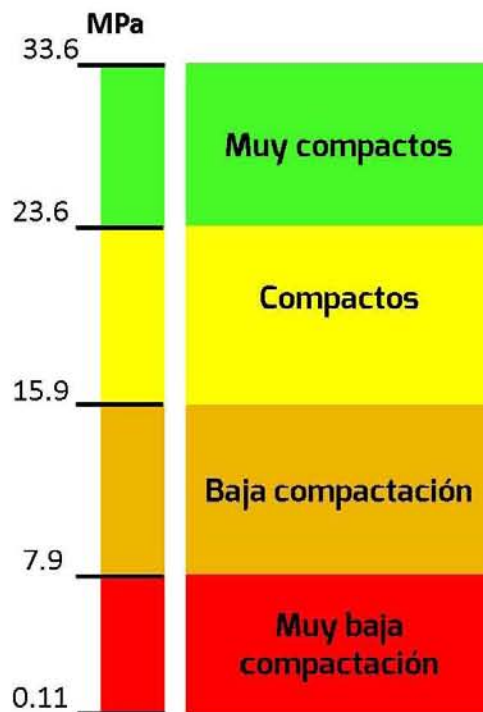


Figura 29. Intervalos de resistencias en MPa asociadas al grado de compactación de los suelos en Mixquic.

En la figura 29 se observa la clasificación propuesta, cuando las resistencias van de 0.11 a 7.89 MPa se asocian a **suelos con muy baja compactación**, de 7.9 a 15.78 MPa **suelos poco compactos**, de 15.79 a 23.67 MPa **suelos compactos** y de 23.68 a 33.62 MPa con **suelos muy compactos**. Bajo esta clasificación se trabajarán los perfiles de compactación.

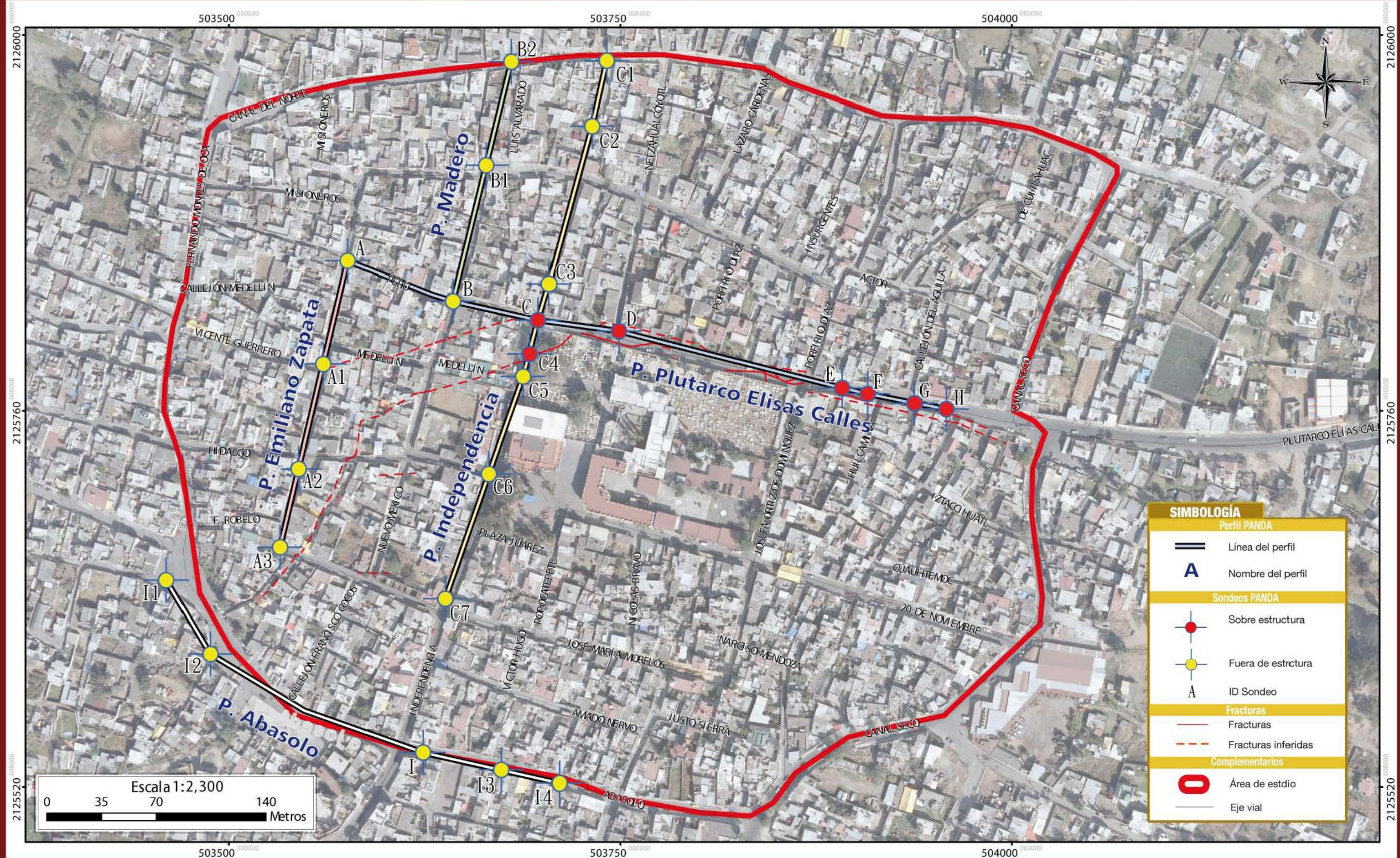
Perfiles y susceptibilidad

Los perfiles de compactación de suelo caracterizan los niveles de compactación de suelo de forma vertical, se adquieren mediante la interpolación de sondeos alineados, su finalidad es obtener datos de compactación en zonas donde no se tienen datos, de tal forma que la clasificación de compactación previamente definida ayuda a identificar zonas propensas a presentar el mismo fenómeno.

Los perfiles se elaboran con los datos de resistencias, profundidad y la distancia entre cada uno de los sondeos. Se utiliza el software Surfer para realizar la interpolación de los sondeos que conforman el perfil. Finalmente se agrega la clasificación de compactación previamente caracterizada y se generaron 5 Perfiles de compactación, su distribución se muestra en la Figura 30.



Figura 30. Mapa de distribución de perfiles y sondeos PANDA.



SIMBOLOGÍA	
Perfil PANDA	
	Línea del perfil
	Nombre del perfil
Sondeos PANDA	
	Sobre estructura
	Fuera de estructura
	ID Sondeo
Fracturas	
	Fracturas
	Fracturas inferidas
Complementarios	
	Área de estudio
	Eje vial

La susceptibilidad se refiere a la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico (Soldano, 2009), esta clasificación se basa en una escala de tres grados de susceptibilidad alta (A), media (M) y baja (B) (Figura 31) y parte de lo siguiente: como análisis cualitativo se basa primordialmente en la identificación de zonas en todo el perfil (ZA, ZB o ZC), estas son proyectadas a superficie con la clasificación de la Figura 31, de tal forma que los resultados se observan como una línea con tres tonalidades de colores en la parte superior del perfil las siglas de cada susceptibilidad (A), (M) o (B) según sea el caso.



Figura 31. Escala de grados de susceptibilidad para la generación de fracturas y hundimientos locales basados en los grados de compactación de suelos.

Susceptibilidad Alta (A) Es aquella donde el fenómeno de fracturas y hundimiento local se presenta y debido a las condiciones de compactación de suelo existe una probabilidad alta para que el fenómeno se siga presentando.

Susceptibilidad Media (M) Esta presenta grados de compactación que pueden condicionar una probabilidad media para que el fenómeno se presente, sin embargo aún no muestra evidencia.

Susceptibilidad Baja (B) Es aquella donde las sus condiciones de compactación de suelo son estables y existe probabilidad baja de que el fenómeno se presente.

Perfil Plutarco Elías Calles

Este perfil se generó a partir de 8 sondeos, de los cuales A y B se encuentran fuera de la estructura de hundimiento, C, D, E, F, G y H se aplicaron dentro de ella, la distancia total es de 394 metros es el perfil de mayor longitud (Figura 32). La finalidad de este perfil fue caracterizar el comportamiento del fenómeno de manera longitudinal. Se observan 4 zonas de compactación (ZA, ZB, ZC y ZD), en la zona ZA predominan intervalos de baja compactación, intercalados con suelos compactos y muy compactos, superficialmente presentan una zona de alta resistencia. La zona ZB cuenta con valores de muy baja compactación, los sondeos con los que se generó se encuentran en la zona de hundimiento y superficialmente se encuentra la zona de fracturas en pavimento. La zona ZC presenta valores de baja compactación a muy compacta, sin embargo esta zona es aislada. Por último encontramos la zona ZD que inicia a partir del metro de profundidad, la mayor parte de esta zona presenta valores de baja compactación y aisladas interacciones con intervalos de muy baja compactación. Los grados de susceptibilidad derivados de las zonas antes definidas son 4, encontramos susceptibilidad alta y media identificadas con letras en color negra (**M** y **A**).

Perfil Emiliano Zapata

Se generó a partir de 4 sondeos A, A1, A2, y A3, ninguno de ellos se encuentra dentro de la estructura de hundimiento, se trazó al final de la estructura cartografiada de forma transversal y tiene una distancia de 187 metros (Figura 33). Se definieron 3 zonas de compactación (ZA, ZB y ZC), la zona ZA presenta rangos de compactación baja

intercalados con alta hasta los 70 cm, de los 70 cm a 1 metro de profundidad se encuentran resistividades compactas a muy compactas. Por otro lado la zona ZB está caracterizada por presentar en su totalidad un grado de compactación muy baja que parte de la superficie a más de 2 metros y abarca la mayor área del perfil. Por último la zona ZB presenta intervalos de suelos con baja compactación, compactos y muy compactos, estos intercalados llegando hasta el metro de profundidad. En este perfil encontramos los tres tipos de susceptibilidades predominando el de susceptibilidad alta, identificadas con letras en color negra (**A**, **M** y **B**).

Perfil Madero

Este perfil se trabajó con 3 sondeos B, B2 y B3, ninguno de los cuales se encuentra dentro de la estructura de hundimiento, tiene una distancia de 157 metros (Figura 34). Se observa el perfil de compactación con una distribución de intervalos de compactación es heterogénea, por ese motivo no se realizó una clasificación de áreas, cabe resaltar que la mayor parte de la superficie de este perfil presenta niveles de muy compactos a compactos, sin embargo existe una pequeña zona cerca del sondeo B2 que presenta muy baja compactación. En términos generales predomina baja compactación con intercalaciones de muy baja compactación, a partir de 1.20 metros de profundidad, los valores se generalizan a suelos muy compactos. En este perfil se identifican dos grados de susceptibilidad debido a que las condiciones superficiales ofrecen una compactación alta y los grados de compactación muy baja son mínimos, se identifican con letras en negro (**M** y **B**).

Figura 32. Perfil y modelo Plutarco E. Calles.

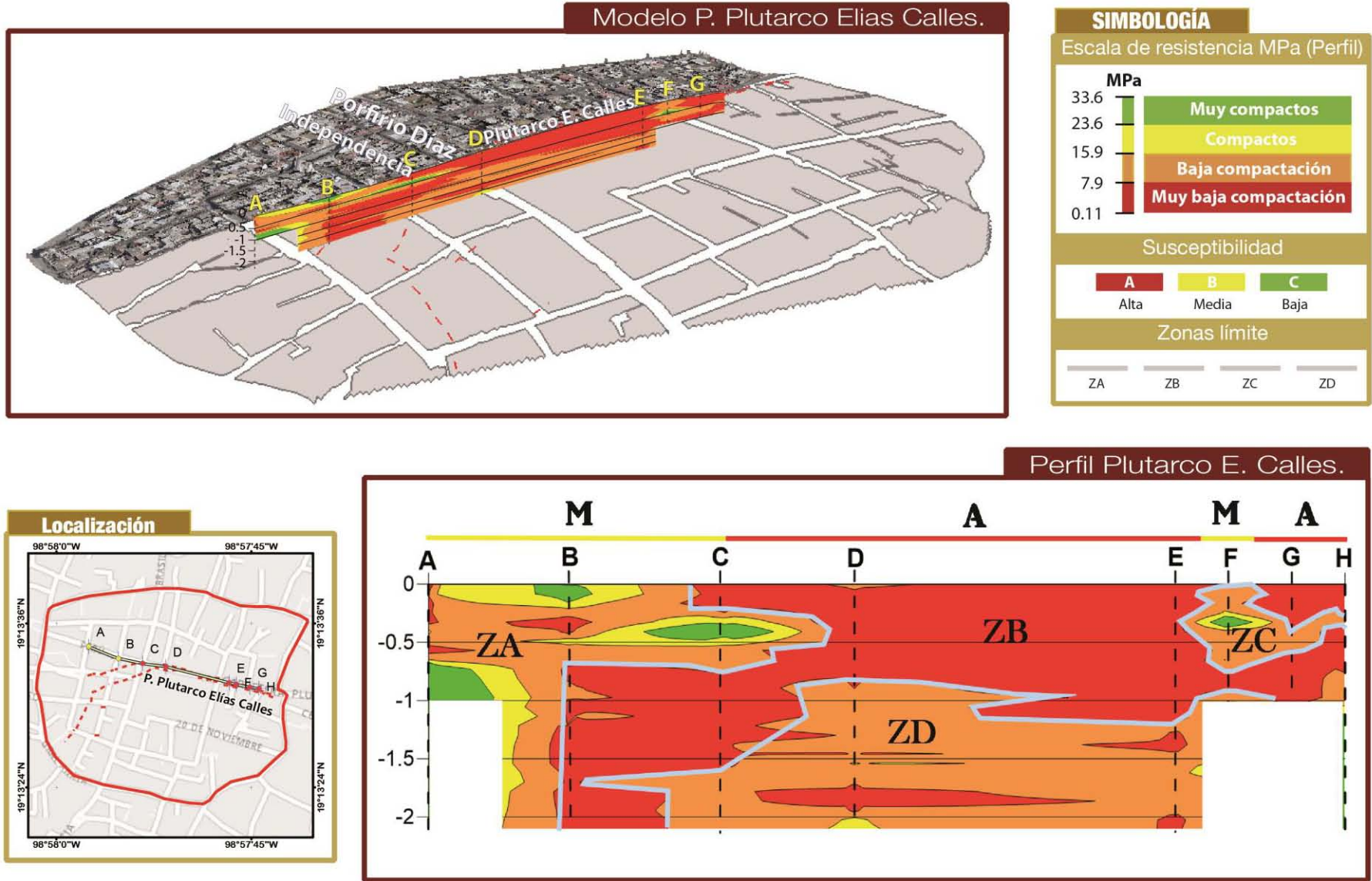
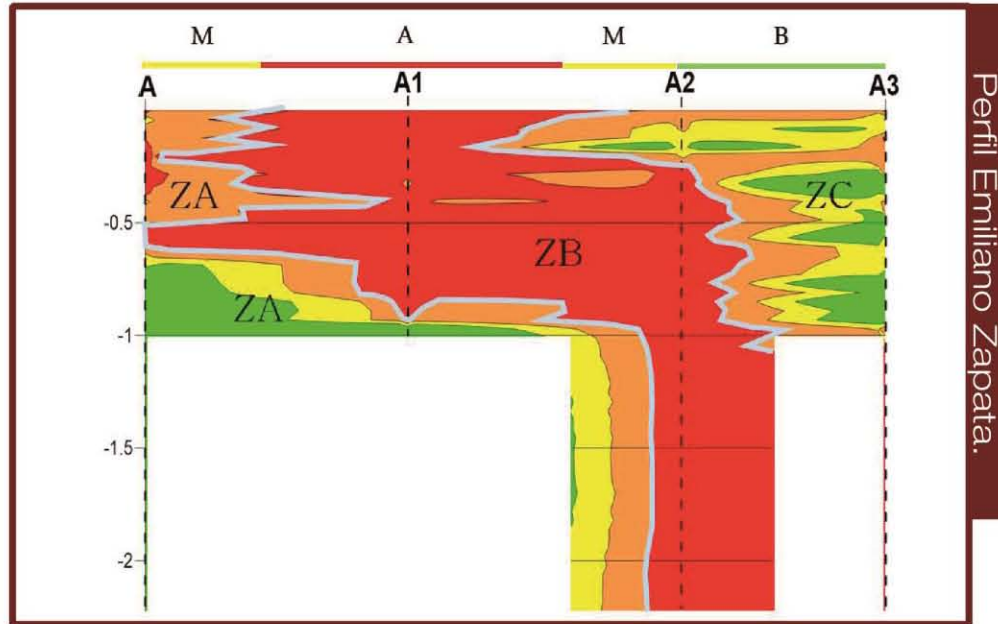


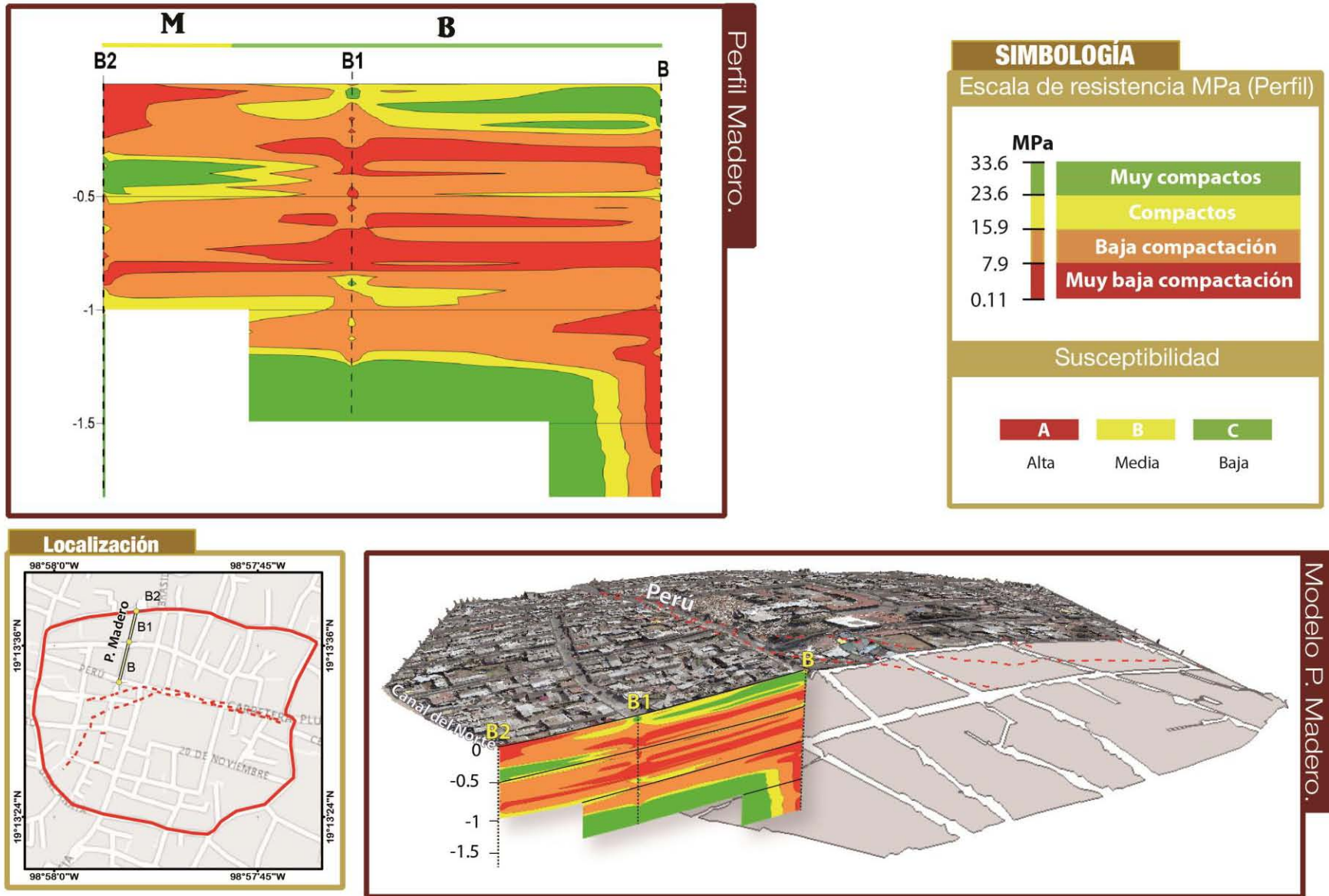
Figura 33. Perfil y modelo Emiliano Zapata.



Modelo P. Emiliano Zapata.



Figura 34. Perfil y modelo Madero.



Perfil Independencia

Este perfil se generó con 8 sondeos, de los cuales C1, C2, C3, C5, C5 y C7 se encuentran fuera de la estructura de hundimiento, C y C4 se aplicaron dentro de ella, la distancia del perfil es de 358 metros (Figura 35). La finalidad de este perfil fue cortar de forma transversal la estructura de hundimiento donde éste tuviera una mayor expresión (frente entrada de la iglesia principal) y con el mayor número de sondeos. Se observan 3 zonas de compactación (ZA, ZB y ZC), la zona ZA presenta rangos de muy baja compactación prácticamente superficiales excepto en los sondeos que se aplicaron dentro de la zona de estructura, C y C4, donde este valor se mantiene constante hasta los 2 metros de profundidad. La zona ZB presenta valores intercalados de suelos muy compactos y de baja compactación, presentes a partir de los 40 cm hasta más de dos metros. La última zona ZC, predominan valores de compactación que va de los muy compactos a compactos llegando hasta los dos metros de profundidad. En este perfil encontramos los tres tipos de susceptibilidades predominando el de susceptibilidad alta, identificadas con letras en color negra (**A, M y B**).

Perfil Abasolo

Este perfil se trabajó con 5 sondeos, ninguno de ellos se encuentra sobre la estructura de hundimiento, sin embargo se trabajó en este lugar para identificar si la dinámica del fenómeno continua, la distancia del perfil es de 293 metros (Figura 36). Se identifican 3 zonas de compactación (ZA, ZB y ZC), la zona ZA presenta una profundidad de 50 cm, en su base presenta suelos muy compactos y a medida que se acerca a la superficie se sobreponen suelos compactos y de baja compactación hasta iniciar la zona ZB, esta última presenta valores de muy baja compactación, los cuales en el sondeo I3 llegan hasta los 2 metros de profundidad. Por último, encontramos la zona ZC que en su mayoría predominan suelos de baja compactación, sin embargo, en superficie se encuentra una pequeña zona con valores compactos. Este perfil cuenta con tres tipos de susceptibilidad predominando la media, identificadas con letras en color negra (**A, M y B**).

Figura 35. Perfil y modelo Independencia.

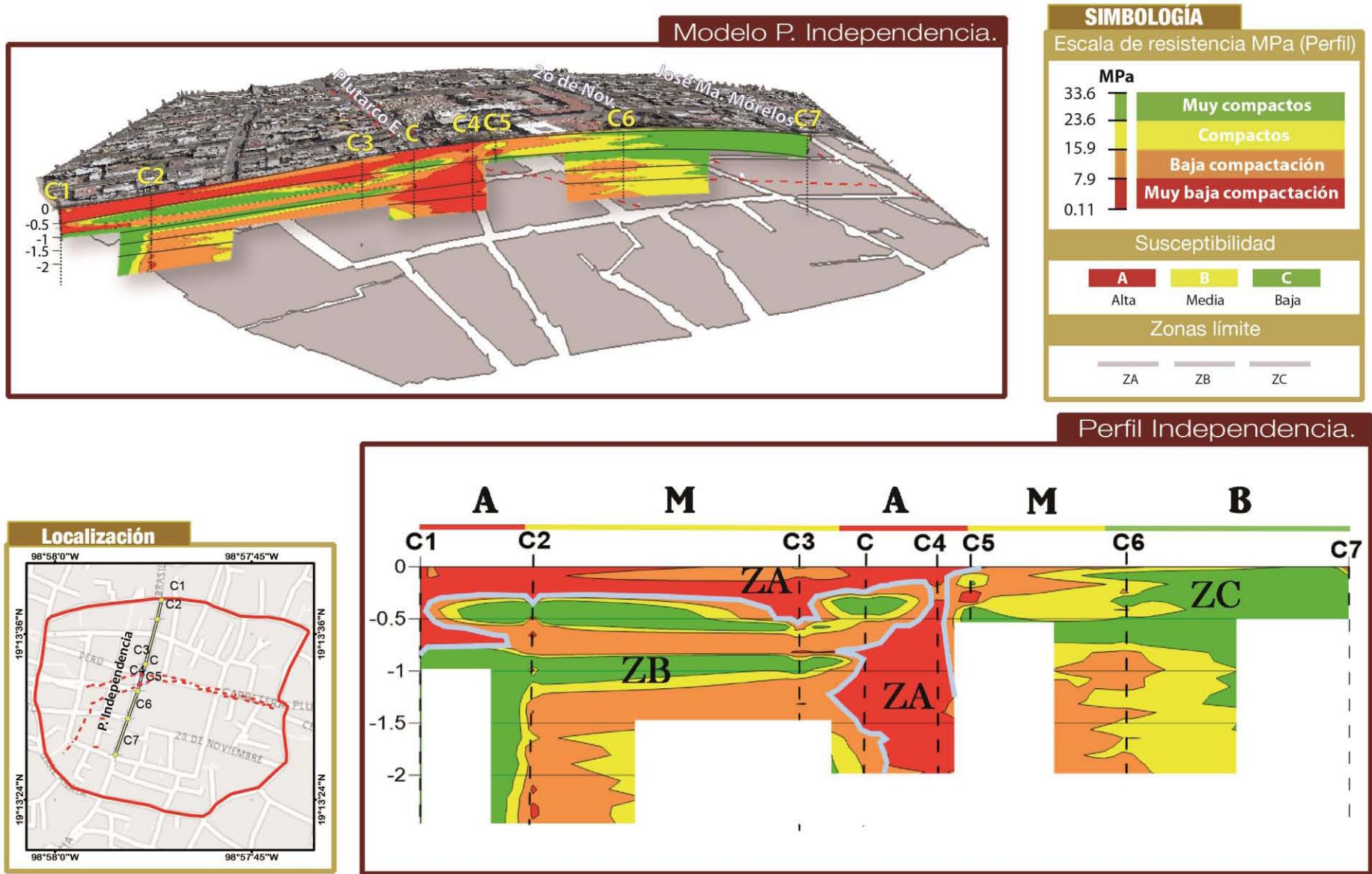
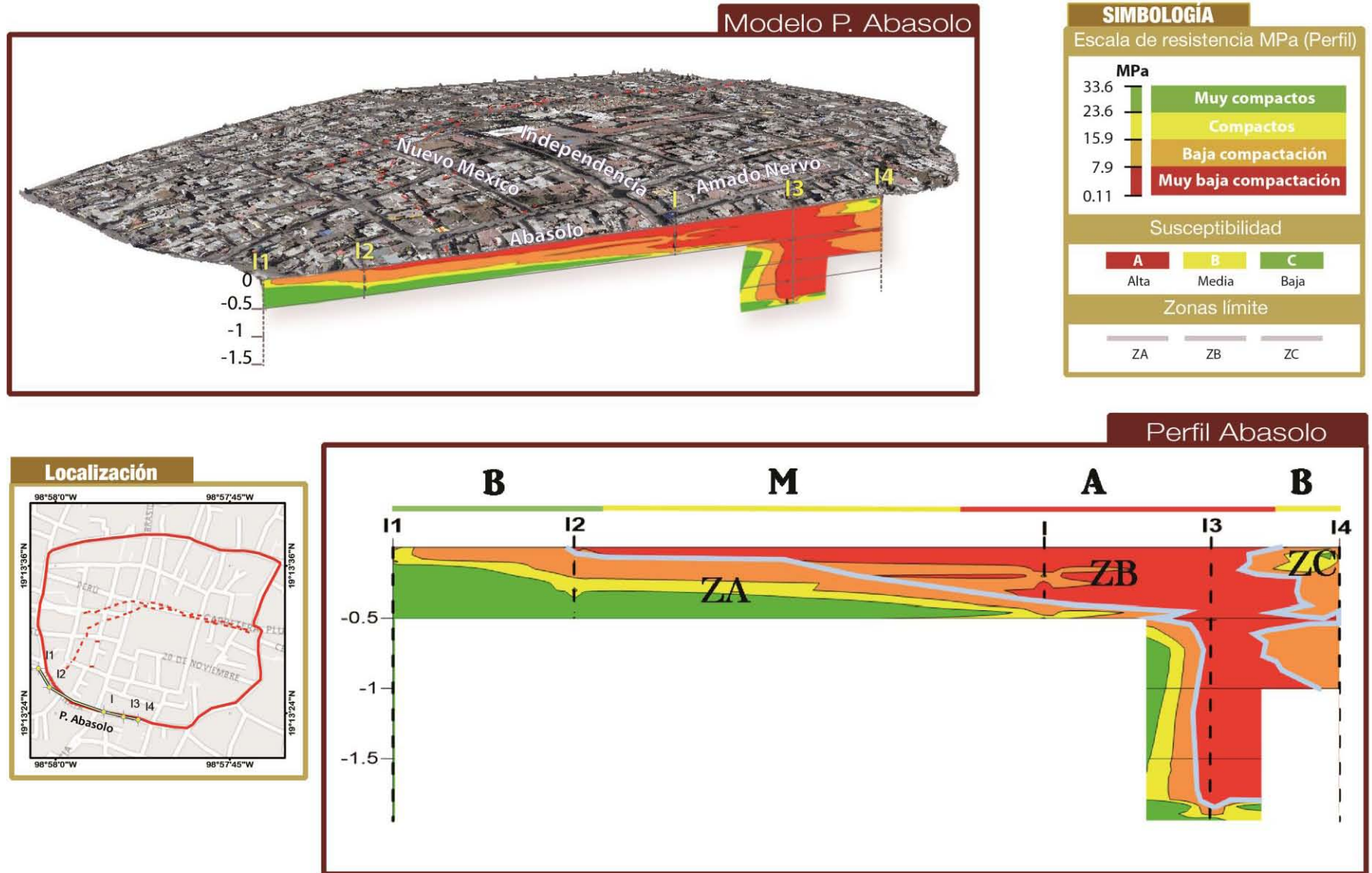


Figura 36. Perfil y modelo Abasolo.



3.3.7 Interpolación de datos y zonificación de susceptibilidad

Para la generación de una zonificación por susceptibilidad, se crearon una serie de puntos a lo largo de los perfiles, estos están basados en el análisis de susceptibilidad (**A**, **M** y **B**) de manera tal, que a cada punto se le asignará un valor: **Susceptibilidad Baja: 1**, **Susceptibilidad Media: 2**, **Susceptibilidad Alta: 3**. Sumado a esto se generan puntos donde el fenómeno se presenta, es decir, sobre las fracturas ya cartografiadas y con un valor de 3. Los puntos presentan una espacialidad de 5 a 15 metros para así obtener una mejor resolución, la dispersión se observa en la Figura 37. La interpolación de valores asignados a los puntos se trabajan con el método *Inverse distance weighted* (IDW) con un tamaño de pixel de 50 cm, la imagen generada se reclasifica en tres categorías, por último se tomará una distancia aproximada de 10 a 20 metros fuera de los perfiles generando un polígono límite de interpolación con el cual se corta la el ráster. El mapa de la figura 38 se presenta los resultados de la interpolación antes mencionada, las áreas de susceptibilidad: susceptibilidad alta (Rojo) presenta un área de 33,246 m², su distribución dentro del mapa presenta una correlación directa con la zona de fracturas ya que ninguna de estas se sale de este polígono, sin embargo se identificaron dos nuevas zonas de susceptibilidad alta: al norte y al sur del área de estudio donde no se identificaron fracturas en campo, sin embargo dadas las características de compactación son zonas propensas al desarrollo de nuevos hundimientos locales y fracturas. La susceptibilidad media cuenta con un área de 21,629 m², rodea el área de susceptibilidad alta y por último la susceptibilidad baja con 12,032 m² que presenta pequeñas áreas dispersas y no homogéneas.



Figura 37. Mapa de puntos de susceptibilidad.

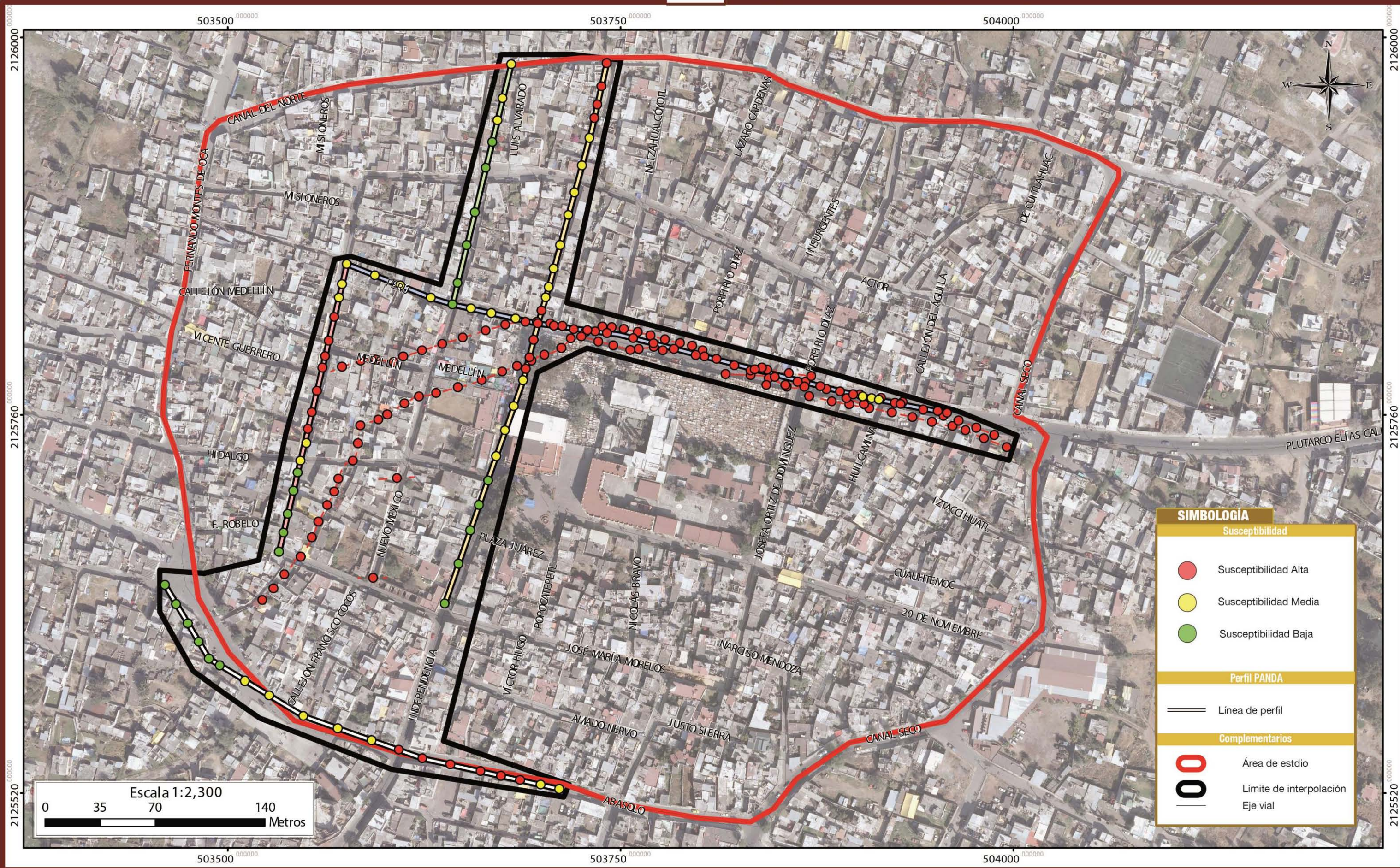
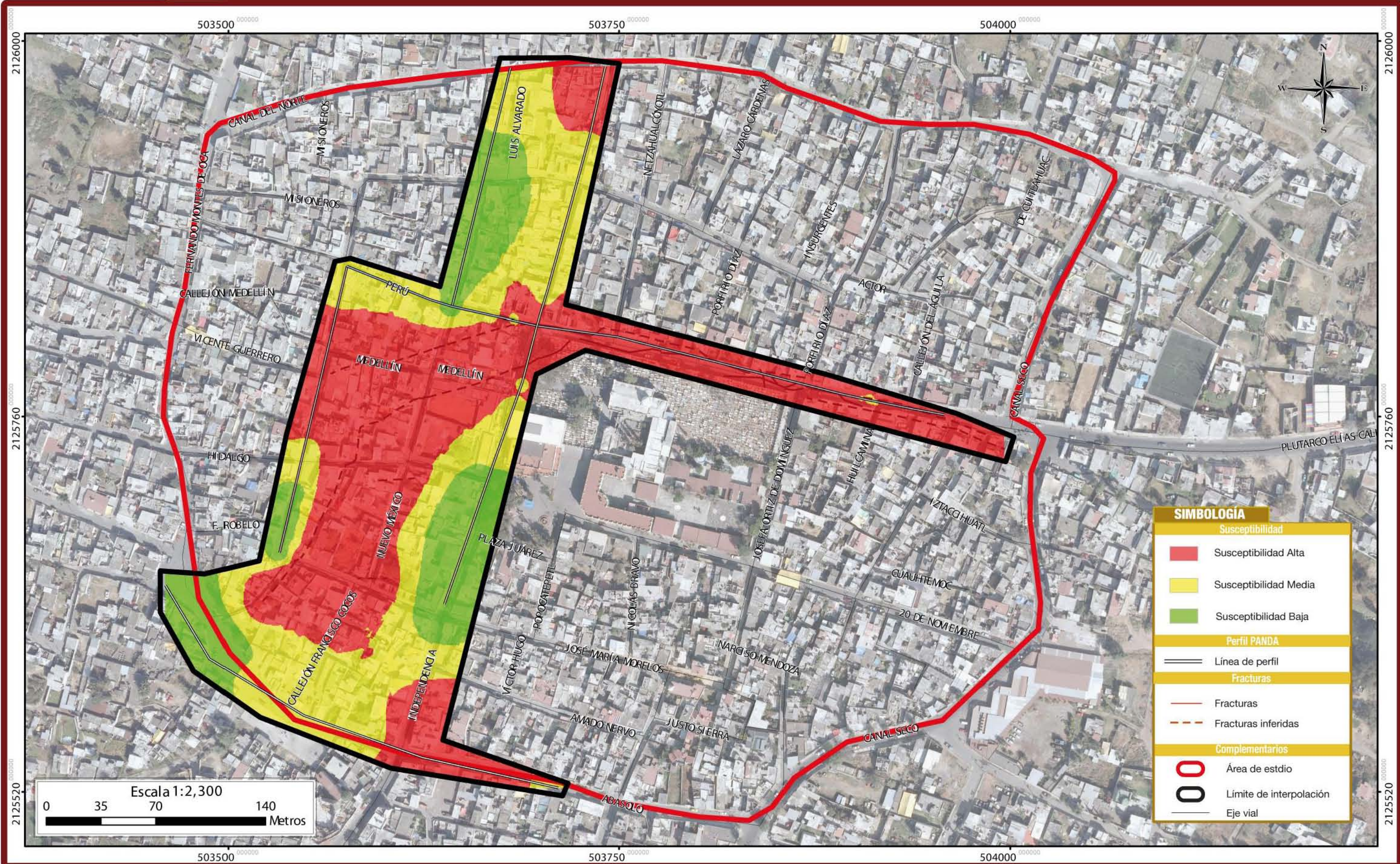




Figura 38. Mapa de susceptibilidad a hundimiento local y fracturas.



3.4 Vulnerabilidad y lotes expuestos

Según INEGI (2015), el catastro es el inventario público, sistemáticamente organizado, gráfico y alfanumérico descriptivo de los bienes inmuebles urbanos y rurales de un país. Su representación gráfica es de forma vectorial mediante polígonos que expresan la extensión de una propiedad. Partiendo de esta definición y retomando lo planteado en el marco teórico (cuantificación de lotes factibles a ser dañados por su grado de exposición), se utiliza el inventario para identificar los lotes urbanos vulnerables expuestos al peligro (fracturas ya cartografiadas) y a zonas susceptibles con la finalidad de llegar a una cuantificación y clasificación de los lotes, así mismo, se identificará el uso de suelo de cada uno de los inmuebles expuestos con el uso de catastro.

Tomando como base los tres niveles de susceptibilidad obtenidos, los lotes se clasificarán de la siguiente forma:

- 1) **Vulnerabilidad a hundimiento local y fracturas**, son todos los lotes que se encuentran sobre la estructura de hundimiento.
- 2) **Exposición a susceptibilidad alta**, son todos los lotes expuestos a la zona de susceptibilidad alta.
- 3) **Exposición a susceptibilidad media**, son los lotes expuestos a la zona de susceptibilidad media
- 4) **Exposición a susceptibilidad baja**, son los lotes expuestos a la zona de susceptibilidad baja

El registro de los lotes expuestos en cada una de las zonas de susceptibilidad, se obtiene mediante una sobreposición de la capa de lotes de San Andrés Mixquic (Figura 39A) con las zonas de susceptibilidad y el polígono de peligro (zona de fracturas; Figura 39B), esta sobreposición determina el tipo de exposición y vulnerabilidad presenta cada lote.

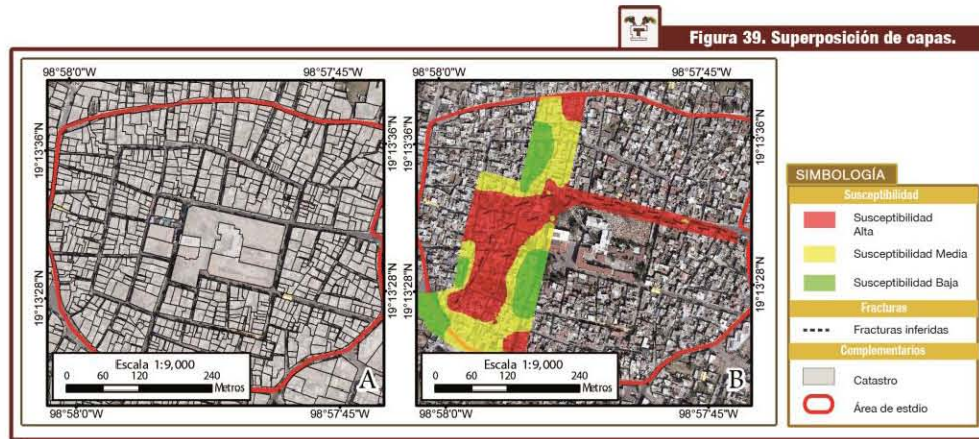


Figura 39. Mapa de capas utilizadas para superposición de lotes (A) y zonas de susceptibilidad y sistemas de fractura (B).

El resultado de la superposición se observa en la Figura 40, resultando 266 lotes expuestos:

Vulnerabilidad a hundimiento local y fracturas: 51 lotes, con uso de suelo: 1 cementerio, 1 iglesia y 49 lotes de uso habitacional.

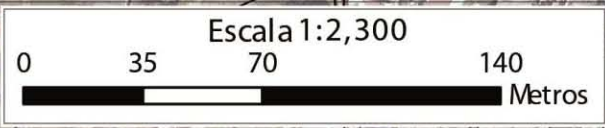
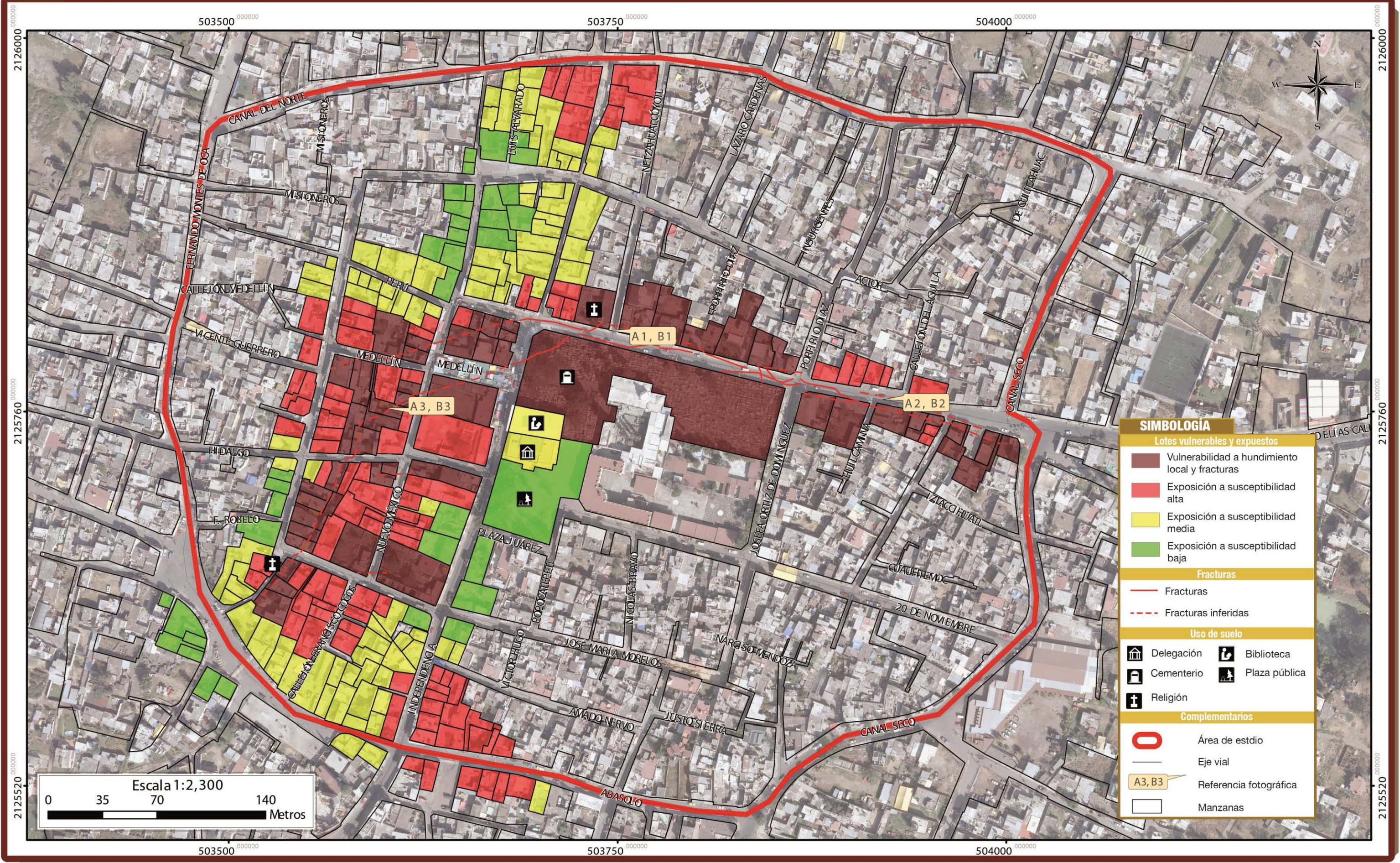
Exposición a susceptibilidad alta: 94 lotes, con uso de suelo: 1 iglesia, y 93 lotes de uso habitacional.

Exposición a susceptibilidad media: 85 lotes con uso de suelo: 1 biblioteca, 1 coordinación territorial y 83 lotes de uso habitacional.

Exposición a susceptibilidad baja: 36 lotes, con uso de suelo: 1 plaza pública y 35 lotes de uso habitacional.



Figura 40. Mapa de lotes expuestos a zonas susceptibles y lotes vulnerables a hundimiento local y fracturas.



Algunos ejemplos fotográficos de viviendas expuestas al sistema de fracturas y con algún tipo de daño son las siguientes.



Figura 41. Fotografías A1 y B1 (Ubicadas en el mapa de la Figura 40. Mapa de lotes expuestos a zonas susceptibles y lotes vulnerables a hundimiento local y fracturas.). En la fotografía A1 se observa una iglesia ubicada sobre la estructura de hundimiento, los daños causados se identifican en la torre principal de esta y en la barda perimetral. Se observa en la fotografía B1 los daños causados por el desplazamiento vertical de la estructura de hundimiento, estos se evidencian en fracturas de la barda perimetral.



Figura 42. Fotografías A2 y B2 (Ubicadas en el mapa de la Figura 40. Mapa de lotes expuestos a zonas susceptibles y lotes vulnerables a hundimiento local y fracturas.). En la fotografía A2 se observan una serie de fracturas transversales en una purificadora de agua. Se observa en la fotografía B2 el interior de la purificadora, presenta fracturas y fisuras en sus castillos y muros.



Figura 45. Fotografías A3 y B3 (Ubicadas en el mapa de la Figura 40. Mapa de lotes expuestos a zonas susceptibles y lotes vulnerables a hundimiento local y fracturas.). En la fotografía A3 se observan fracturas en el patio de una vivienda y en los muros de esta. Se observa en la fotografía B3 el interior de la vivienda, esta presenta fracturas en muros y castillos con desprendimiento de material, por otra parte la loza presenta una separación respecto a los muros, es una de las viviendas con más daños.

Conclusiones

Los resultados de esta investigación muestran una significativa importancia debido a la aplicación de métodos y técnicas de otras disciplinas (geología estructural y geotecnia) las cuales ayudaron a definir una zonificación de peligro y susceptibilidad haciendo posible una cuantificación de lotes vulnerables y expuestos, estos resultados implican una mejor comprensión del fenómeno y sus implicaciones en el sistema urbano.

El análisis estructural que si bien no es un aporte nuevo, ayudó a caracterizar, identificar e inferir las fracturas que componen la estructura de hundimiento, obteniendo así una cartografía total del peligro.

La implementación de compactación de suelo mediante sondeos PANDA es uno de los aportes con mayor relevancia en esta investigación, su análisis para la zonificación de susceptibilidad es notable ya que se lograron identificar dos nuevas zonas con susceptibilidad alta donde aún no se han identificado sistemas de fracturas. Esta herramienta resultó fácil de aplicar y analizar sin embargo se reconoce que el análisis implementado es un primer acercamiento y se pueden buscar nuevas formas de analizar los resultados e interrelacionarlos con otras variables.

La identificación de lotes vulnerables y expuestos es quizá la contribución con mayor potencial de esta investigación, funge como un inventario de lotes tanto vulnerables como susceptibles a serlo en una cartografía con el detalle suficiente para la planeación de obras de mitigación, reubicación o programas que fortalezcan la resiliencia.

Bibliografía

- Auvinet**, G., Lermo, J., & Méndez, E. (2008). Avances en la caracterización geotécnica del agrietamiento del subsuelo de la cuenca de México. *Reunion Nacional de Mecánica de Suelos*, (pp. 495-499).
- Ávila**, O. J. (2008). *Evolución de los procesos de Subsistencia-Creep-Falla, casos: Morelia, Mich. y Celaya, Gto.* Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bosque**, G. I., Fernández, F. C., Forero M. L., & Pérez, A. E. (2012). *Los Sistemas de Información Geográfica y la Investigación en Ciencias Humanas y Sociales*. Madrid: CSIC.
- Brom**, J. (2007). *Esbozo de historia de México*. México: Grijalbo. (pp. 53-63)
- Cardona**, O. D. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. En *Los desastres no son naturales*. La RED (pp. 45-65).
- Carreón**, F. D., Hernández M. M., Hidalgo M. C. (2006). *Mecanismo de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México*. Boletín de la sociedad geológica Mexicana, (pp. 237-250).
- Chávez**, A. J. M. (2006). *GEOTECNIA*. México: Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, (1ed), (pp.187-206).
- Costet**, J., & Sanglerat, G. (1975). *Curso práctico de Mecánica de Suelos*. Barcelona: OMEGA.
- Crespo**, V. C. (1993). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Monterrey: LIMUSA.

CENAPRED. (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de Peligros y Riesgos. Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica* (1 ed.). D.F.: CENAPRED.

CEPAL. (2005). *El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso.* CEPAL.

CONAGUA. (2009). *Semblanza histórica del agua en México.* México: SEMARNAT.

CONAGUA. (2007). *Geotecnia en suelos inestables.* México: SEMARNAT.

CMA. (7 Agosto 2015). Facultad de ciencias económicas, Universidad de Buenos Aires. Obtenido de:

<http://www.econ.uba.ar/www/institutos/cma/publicaciones/Libros/8%20Libros%20Tecnologia%202010.pdf>

De Cserna, G. G., & Huesca, P. E. (1987). *Sismicidad y el campo de esfuerzo en la Cuenca de México.* México: Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Díaz, R. J. (2005). Los suelos lacustres de la ciudad de México. *Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.* Vol. 6(2), (pp. 111-130).

Espinosa, C. M. (2008). Procesos y actores en la conformación del suelo urbano en el ex lago de Texcoco. *Economía, Sociedad y Territorio,* Vol. 8, Núm. 27, (pp. 770-771).

Estuardo, G. A. (15 de agosto 2015). Universidad de la frontera Tenuco-Chile. Obtenido de Departamento de matemáticas y estadística: http://dme.ufro.cl/clinicamatematica/images/Libros/Estadistica_y_Probabilidad/Estadisti

[ca%20y%20Probabilidad.pdf*busca como citar páginas electrónicas, me parece que no esta bien tú referencia](#)

Flores, C. R. (2012). El Olvido como atitud de adaptación. San Andrés Mixquic, una microhistorica. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.

García, E. (1998). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de koppen*. México. Instituto de Geografía. (pp. 42-46)

Hernández, C. G. (2007). *Zonificación de riesgos por hundimiento y agrietamiento al noreste de la delegación Tláhuac, Distrito Federal*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Herzer, H. M. (2011). *Construcción de riesgo, desastre y gestión ambiental urbana*. (pp. 73-83) REDESMA.

INEGI. (2010). *Compendio de Información Geografica Municipal*. México: INEGI.

INEGI. (2011). *Catastro Estatal y Municipal. Diagnóstico del Marco Legal Catastral Dirección General de Geografía y Medio Ambiente*. (pp. 45-47)

INEGI. (s.f.). *Recuperado el 2 de septiembre de 2015, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/catastro/>*

López, L. L., & Urcid, J. (2002). El Chacmool de Míxquic y el sacrificio Humano. *Estudios de cultra Náhuatl*, Num. 33, (pp. 25-43).

- Márquez, G. A., Pérez, R. A. Gonzáles, R., & Comas, O. (2006).** *Manual de prácticas de laboratorio de Geología.* México: UAM-Iztapalapa.
- Martínez, G. J., (2012).** *Evaluación de las grietas de la cuenca de México originadas por la morfología de la roca basal usando mediciones de microtemores.* México.
- Riquelme, R. D. (1974).** *Fracturas del Fraccionamiento Los Olivos en la región cercana al volcán San Lorenzo o San Nicolas, Tláhuac.* Investigaciones geográficas, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Número 50, (pp. 67-69).
- Rodríguez, C. R. & Rodríguez, V. I. (2006).** Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia. *Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVIII, Núm 2, (pp. 265-269).*
- Romero, G., & Maskrey, A. (1993).** Cómo entender los desastres naturales. En *Los desastres no son naturales.* La RED, (pp. 6-10).
- Santacruz, B. R. (2009).** *Causas y consecuencias de la generación de hundimientos en San Andrés Mixquic, D.F.* Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- SEDATU. (2014).** *Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgo y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo.* México: SEDATU.
- SEDUVI. (2008).** *Programa delegacional de desarrollo urbano en Tláhuac (PDDU).* México.
- SMMS. (1991).** Memoria del simposio "Agrietamiento de suelos", Sociedad Mexicana de Mecánica de suelos, México DF.

- Soldano, A.** (2009). Inundaciones: ¿Qué es Susceptibilidad?. Departamento de Desarrollo Sostenible de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, CONAE (pp. 2).
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F.** (2009). Subsistencia del terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, Vol. 17, Núm 2, (pp. 295-302).
- Varela, L., Gómez, F., & Carrete, J.** (2010). Tratamiento de datos físicos . *Universidad de Santiago de Compostela*, Manuales universitarios, Núm. 12. (pp. 46-53).
- SGM.** (s.f.). Mapa geológico del *Servicio Geológico Metropolitano*. Recuperado el 10 de Marzo de 2015, de http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/mapas_sgm/mapas_sgm2.html **esta mal ordenada esta bibliografía*

Bibliografía no citada:

- Ahamdanech, Z., Bosque, S., & Pérez, A.** (2002). Vulnerabilidad del territorio ante los riesgos naturales: una propuesta de medición en Honduras tras el paso del huracán Mitch. *Estudios Geográficos*.
- Cuevas, S. & Escobar, M. F.** (2009). Caracterización espacial de la vulnerabilidad sociodemográfica en dos distritos madrileños ante riesgos tecnológicos. *Cuadernos Geográficos*.
- Hinojosa, M. J.** (2010). *Comportamiento del suelo en la zona próxima al cerro del marqués y sus efecto en obras de infraestructura*. México.
- Hubp, L., Vega, P., & Salas, R.** (1991). Formación de grietas en la margen del antiguo lago al oriente de la cuenca de México. *Geofísica Internacional*, (PP. 87-95).

Juárez, G. H. & Arellano, M. E. (s.f.). *Método de evaluación de la vulnerabilidad sísmica desarrollado en la UAM.*

Lesser, I. J. & Cortés, P. M. (1998). El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje. *Ingeniería Hidráulica en México*, (pp. 13-18).

Anexos

1. Tabla con datos recopilados en campo.

ID	X	Y	CALLE	AZIMUT	ECHADO	DESP VERT	ORIENTACION
1	503957	2125759	PLUTARCO ELÍAS CALLES	85	78	SD	NE 85°
2	503959	2125759	PLUTARCO ELÍAS CALLES	91	62	SD	SE 89°
3	503963	2125753	PLUTARCO ELÍAS CALLES	275	39	28	NW 85°
4	503916	2125771	PLUTARCO ELÍAS CALLES	76	57	5	NE 76°
5	503921	2125770	PLUTARCO ELÍAS CALLES	88	62	5	NE 88°
6	503896	2125770	PLUTARCO ELÍAS CALLES	276	83	10	NW 84°
7	503885	2125776	PLUTARCO ELÍAS CALLES	284	70	15	NW 76°
8	503867	2125785	PLUTARCO ELÍAS CALLES	270	74	50	E-W
9	503871	2125784	PLUTARCO ELÍAS CALLES	274	69	10	NW 86°
10	503860	2125780	PLUTARCO ELÍAS CALLES	66	74	SD	NE 66°
11	503854	2125780	PLUTARCO ELÍAS CALLES	92	76	7	SE 88°
12	503869	2125780	PLUTARCO ELÍAS CALLES	304	59	SD	NW 56°
13	503863	2125777	PLUTARCO ELÍAS CALLES	65	79	5	NE 65°
14	503857	2125778	PLUTARCO ELÍAS CALLES	98	68	5	SE 82°
15	503846	2125782	PLUTARCO ELÍAS CALLES	279	84	12	NW 81°
16	503849	2125781	PLUTARCO ELÍAS CALLES	288	79	10	NW 72°
17	503843	2125781	PLUTARCO ELÍAS CALLES	165	NA	NA	SE 15°
18	503833	2125788	PLUTARCO ELÍAS CALLES	98	76	SD	SE 82°
19	503820	2125792	PLUTARCO ELÍAS CALLES	87	72	SD	NE 87°
20	503772	2125803	PLUTARCO ELÍAS CALLES	101	78	SD	SE 79°
21	503756	2125801	PLUTARCO ELÍAS CALLES	108	68	SD	SE 72°
22	503731	2125812	PLUTARCO ELÍAS CALLES	282	76	10	NW 78°
23	503725	2125810	PLUTARCO ELÍAS CALLES	299	83	SD	NW 61°
24	503716	2125816	PLUTARCO ELÍAS CALLES	283	69	10	NW 77°
25	503709	2125818	PLUTARCO ELÍAS CALLES	282	78	SD	NW 78°
26	503700	2125819	PLUTARCO ELÍAS CALLES	96	55	SD	SE 84°
27	503690	2125819	PLUTARCO ELÍAS CALLES	75	75	SD	NE 75°
28	503632	2125804	NUEVO MÉXICO	84	40	SD	NE 84°
29	503638	2125806	NUEVO MÉXICO	84	67	SD	NE 84°
30	503625	2125772	NUEVO MÉXICO	268	26	50	SW 88°
31	503607	2125720	NUEVO MÉXICO	268	NA	NA	SW 88°
32	503591	2125657	NUEVO MÉXICO	265	NA	NA	SW 85°
33	503690	2125792	INDEPENDENCIA	220	81	SD	SW 40°
34	503687	2125792	INDEPENDENCIA	255	69	180	SW 75°
35	503683	2125791	INDEPENDENCIA	259	74	SD	SW 79°
36	503606	2125795	MEDELLÍN	74	71	10	NE 74°
37	503598	2125795	MEDELLÍN	91	80	10	SE 89°
38	503591	2125796	MEDELLÍN	73	61	10	NE 73°
39	503585	2125795	MEDELLÍN	74	71	10	NE 74°
40	503575	2125728	HIDALGO	216	89	10	SW 36°
41	503580	2125731	HIDALGO	260	88	5	SW 80°

Análisis del peligro e identificación de lotes expuestos a hundimientos locales y fracturas en San Andrés Mixquic, Tláhuac.

42	503546	2125670	JOSÉ MARÍA MORELOS	218	NA	NA	SW 38°
43	503542	2125667	JOSÉ MARÍA MORELOS	210	NA	NA	SW 30°
44	503591	2125756	NA	245	80	SD	SW 65°
45	503587	2125755	NA	261	84	SD	SW 81°
46	503585	2125753	NA	24	86	SD	NE 24°
47	503708	2125800	PLUTARCO ELÍAS CALLES	243	30	150	SW 63°