

Estudio:

**ESTUDIO GEOTÉCNICO POR LA
INFLUENCIA DE LA FALLA
GEOLÓGICA CON DIRECCIÓN
NORESTE-SUROESTE A LA SALIDA
SAN FRANCISCO DEL RINCÓN**

2024



Contenido

1. Generalidades.....	4
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Localización del área de estudio.....	6
1.4. Glosario.....	6
1.5. Etapas de desarrollo.....	7
Recopilación de información y análisis de la información.....	7
Recorridos de verificación.....	8
Caracterización de fracturas en calles, terrenos y construcciones.....	9
Evaluación de daño en edificaciones.....	9
Caracterización de los materiales que constituyen el subsuelo.....	10
Estudios geofísicos y ángulo de fricción interna.....	10
Levantamiento topográfico.....	11
Modelo geológico e hidrogeológico de la zona de estudio y sus efectos en las edificaciones.....	11
Delimitación de la zona de influencia del agrietamiento.....	11
Propuestas de mitigación y adaptación para la zona afectada.....	12
Plan de seguimiento en la zona afectada.....	13
2. Análisis de la información.....	14
2.1. Geología regional.....	14
2.2. Geología estructural de la región donde se localiza la ciudad de León.....	15
2.3. Análisis de cortes litológicos y sección geológica.....	16
2.4. Exploración geofísica histórica.....	17
2.5. Interferometría.....	19
2.6. Análisis de las variaciones del nivel estático en el área de estudio.....	24
3. Actividades desarrolladas en el proyecto para determinar la ubicación del fracturamiento y la zona de afectación.....	26
3.1. Verificación geológica.....	26

3.2. Censo de las edificaciones afectadas.....	31
Observaciones generales.....	33
Niveles de daño.....	35
Descripción de los daños por Colonia.....	37
3.2.1. Evolución de las afectaciones en algunos sitios.....	49
3.3. Estudios geofísicos y ángulo de fricción interna	58
Sondeo Transitorio Electromagnético Bajo el Dominio del Tiempo (TEM o TDEM).....	58
Radar de penetración terrestre	61
Tendidos de refracción sísmica.....	66
Correlación de velocidades de onda sísmicas y ángulo de fricción de reposo	68
3.4. Levantamiento topográfico	71
3.5. Modelo geológico e hidrogeológico de la zona de estudio	73
4. Propuestas de mitigación y adaptación para la zona afectada.....	83
5. Plan de seguimiento en la zona afectada	94
6. Conclusiones.....	96
7. Bibliografía	104

"Planear el futuro,
pensar el presente"

1. Generalidades

Este proyecto se desarrolla en el marco del Programa de Gobierno 2021-2024, que inscribe la acción de desarrollar estudios para control urbano, dentro de la Bandera Vivir Mejor, la Estrategia 6. Infraestructura para el Futuro y el Programa VM.3. León 450 que plantea el desarrollo y consolidación de la ciudad, con una adecuada articulación de la zona metropolitana.

1.1. Antecedentes

En la versión 2006 del Atlas de Riesgos del Municipio de León (IMPLAN, 2006), se reportó la existencia de afectaciones a las edificaciones derivadas de procesos de remoción de masas, en particular originados por el potencial deslizamiento de laderas y el hundimiento regional. En ese periodo fueron reportados agrietamientos en la superficie del territorio municipal, en particular en la localidad de La Sandía, pero también se advirtieron potenciales fallamientos en la zona sur del municipio; específicamente en la carretera León - San Francisco del Rincón, en donde se presenta la transición entre las zonas geotécnicas del valle y de laderas. En la actualidad, el hundimiento regional se continúa manifestando y ha afectado a vialidades, infraestructura industrial y viviendas.

El deslizamiento de laderas se ha presentado en diversos sitios del país; en ocasiones se presenta de forma natural, provocado por la inestabilidad de los materiales que constituyen el suelo al encontrarse en una pendiente, en otras la inestabilidad se incrementa por la acción de las actividades humanas, como las relacionadas con la construcción, que involucran: cambios en la pendiente natural del terreno por construcción de terrazas, alteraciones al régimen natural de escurrimiento del agua superficial, alteraciones a la posición original que tenía el agua subterránea, deforestación o excavaciones para la extracción de materiales. Como indicadores de estos movimientos se tiene: el desarrollo de grietas o abultamientos en el terreno natural o en las calles, el avistamiento o movimiento de las cimentaciones, la inclinación de la estructura principal, agrietamiento de pisos y cimentaciones de concreto, la ruptura de tubos de agua y otras estructuras subterráneas, puertas y ventanas que no cierran y espacios visibles entre los marcos de estas, entre otros (SSPC, 2021).

El hundimiento diferencial y sus efectos se han observado en México desde la década de los 50's; de las experiencias que se han tenido en su investigación, se han identificado que se asocia a tres factores principales, el primero relacionado con el abatimiento del nivel piezométrico del sistema acuífero del área a través del tiempo, el segundo está relacionado con el espesor de los materiales en el subsuelo (sedimentos) susceptibles de sufrir deformación (Ávila Olivera, 2008) y

los cambios en la elevación del terreno producto de la compactación de los materiales al ya no estar saturados.

Como resultado de estos procesos se generan fracturas en el terreno, como las que se han detectado en la ciudad, por lo que es importante identificar las áreas del territorio municipal donde se presentan las afectaciones, o donde potencialmente se pueden generar, para emitir las recomendaciones que permitan al gobierno municipal en conjunto con la población tomar decisiones y establecer las medidas para prevenir y mitigar los daños en los desarrollos urbanos y en la infraestructura.

1.2. Objetivos

Determinar la susceptibilidad del riesgo y el rango de influencia del agrietamiento localizado en la salida a San Francisco del Rincón, por medio de estudios técnicos especializados para emitir las medidas de mitigación y adaptación en el desarrollo del territorio.

Para lo cual se consideraron los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la ubicación de la traza de la fractura, así como sus posibles proyecciones en terreno.
- Delimitar la zona de influencia directa del fracturamiento.
- Realizar un censo de las edificaciones afectadas en su parte externa, determinando su grado de afectación.
- Elaborar propuestas de mitigación y adaptación para la zona afectada.
- Emitir recomendaciones en la materia para futuros desarrollos que se pretendan establecer en la zona de influencia del fracturamiento.
- Diseñar un plan de seguimiento para el fenómeno que está afectando a las casas en la zona de estudio.

1.3. Localización del área de estudio

El área de estudio se ubica en las colonias Las Huertas, Santa Croce, Cumbres del Sol, San Francisco, La Condesa, Las Mandarinas, La Piscina CTM y Piscina (Km 3.5), al sur poniente de la ciudad de León, como se identifica en la siguiente Figura 1.1.



Figura 1.1. Localización del área de estudio

1.4. Glosario

En México se ha tenido un fuerte debate sobre los términos correctos para describir las rupturas del terreno, por esta razón Moro Ingeniería (Moro), realizó una revisión de documentos para establecer si las estructuras que están afectando al área de estudio son grietas (fracturas) o fallas. Como resultado se determinó que los autores diferencian a estas estructuras en función de los procesos que las origina.

En el *Fascículo de hundimiento y agrietamiento del terreno del Sistema Nacional de Protección Civil* (SNPC, 2022), se hace un análisis de las diferentes epistemologías y usos que se le da a los términos de "grietas, fracturas y fallas", y citan en su tabla 1 (pp. 29) que reiteran que tanto los autores como los conceptos están en debate; en este documento no quedan claras sus diferencias, sin

embargo, si se comenta que están relacionadas con un desequilibrio mecánico producido por sobrecarga estática, tensión y dinámica de presiones en el medio geológico.

Adicionalmente, Moro consultó documentos publicados por dependencias gubernamentales, así como documentos científicos relacionados con estructuras geológicas ((SNPC, 2022), (Auvinet, 2009), (Carreón, 2011), (Padilla, 2013), (Fossen, 2016); como resultado final de este análisis, Moro establece de una forma sustentada las siguientes definiciones:

Falla geológica: discontinuidad entre dos bloques de la corteza terrestre, a lo largo de la cual se produce un desplazamiento paralelo a la discontinuidad, de un bloque con respecto al otro; este desplazamiento puede ser vertical, horizontal o en ambos sentidos. Se presenta cuando las rocas de la corteza han sido sometidas a tensiones y/o compresiones de grandes dimensiones, relacionadas con procesos tectónicos (son procesos naturales), que las lleva hasta su punto de ruptura.

Fractura: discontinuidad entre dos bloques a lo largo de la cual se produce un desplazamiento perpendicular a esta, producida por esfuerzos de compresión o de tensión; su origen puede ser variado y no necesariamente natural.

Grieta: es una estructura provocada a consecuencia de esfuerzos de tensión o compresión, generados por diversas causas (no necesariamente naturales), en la que hay una discontinuidad entre dos bloques; se produce a consecuencia de un desplazamiento perpendicular a la grieta.

Por lo antes expuesto, la conclusión es que la mayoría de los autores consideran a la grieta como un concepto que es sinónimo al de fractura, por lo que **en el caso de la zona de estudio se tienen grietas o fracturas que fueron producidas por desestabilización mecánica, cuyo origen no fue tectónico.**

1.5. Etapas de desarrollo

A continuación, se describen las actividades que se realizaron en este proyecto, en la secuencia en que fueron llevadas a cabo:

Recopilación de información y análisis de la información

Esta actividad estuvo enfocada en recabar información que permitiera establecer la susceptibilidad del riesgo y el rango de influencia de los daños a las estructuras en la zona de estudio.

Para iniciar la recopilación de la información, se revisó la biblioteca de la empresa Moro Ingeniería S.C., obteniendo en formato digital algunos cortes litológicos, estudios con descripciones geológicas e hidrogeológicas y datos de niveles del agua subterránea cercanos al área de estudio.

De manera paralela se realizó la búsqueda en internet en las páginas oficiales de la CONAGUA y del Servicio Geológico Mexicano, de documentos relacionados con geología, geofísica, hidrogeología, geotecnia y cualquier otro tipo de información de interés para el desarrollo del estudio.

Conjuntamente se analizó la información proporcionada por el IMPLAN, relacionada con los Atlas de Riesgos para el municipio de León, información de afectaciones por agrietamientos en la ciudad realizados por protección civil, así como de hidrogeología, geofísica, censos de obras e información piezométrica cercana al área de estudio.

Las investigaciones además de buscar información para entender y establecer el modelo físico del área de estudio y su evolución a lo largo del tiempo, se centraron también en realizar un análisis de las imágenes de radar SAR (imágenes de apertura sintética) del satélite Sentinel, para identificar de forma indirecta los cambios en la posición de la superficie del terreno, con objeto de ubicar las zonas con mayor deformación en el área de estudio, y asociarlas con la posición de las trazas de los agrietamientos, así como sus proyecciones; este análisis sirvió de complemento para definir áreas a verificar en campo.

En total se recopilaron 49 documentos que fueron útiles para los fines del estudio.

Con apoyo del sistema de información geográfico (SIG), se localizó la información de utilidad para el estudio, como son: secciones geológicas, cortes litológicos de sondeos geotécnicos, información geofísica, pozos a cielo abierto, hundimiento en casas, configuraciones de nivel del agua subterránea, ubicación de pozos con evolución del agua subterránea, sismos históricos y lineamientos estructurales. Con la integración y análisis de la información se elaboraron mapas en donde se ubicaron las zonas afectadas y se estableció la hipótesis de partida con relación al origen de los procesos que están provocando los daños a las estructuras.

Recorridos de verificación

Se llevaron a cabo recorridos por todas las calles de las colonias afectadas y áreas adyacentes dentro de la zona de estudio. Estas colonias incluyen Las Huertas, Santa Croce, Cumbres del Sol, Colinas de San Francisco, La Condesa, Las Mandarinas, La Piscina (kilómetro 3.5), La Piscina CTM y Los Laureles.

Los recorridos tuvieron dos objetivos fundamentales:

1. **Inspección de daños en edificaciones:** este fue un primer recorrido en todas las calles del área de estudio, en el que se realizó una inspección visual de la parte exterior de las casas, con el propósito de identificar:
 - Fracturas: en calles, paredes, pisos y otras estructuras.
 - Abombamientos y desplazamientos: en calles y pisos, así como desplazamientos de bloques de pavimento hidráulico.
 - Daños estructurales en edificaciones: se identificaron daños en las construcciones.

Este primer paso permitió localizar desde el exterior sitios específicos para su posterior caracterización y evaluación de los daños en las edificaciones afectadas por las fracturas. En total, se identificaron varios puntos, de los cuales se seleccionaron 33 sitios para efectuar un análisis más detallado.

2. **Inspección del entorno y materiales del subsuelo:** con base en el primer recorrido se regresó a zonas específicas para efectuar una inspección visual de las zonas afectadas con el objetivo de identificar sitios donde se pudieran conocer los materiales que constituyen el subsuelo. Esto fue muy importante para comprender las condiciones geológicas y geotécnicas de la zona. Se identificaron y seleccionaron 7 sitios para este propósito, no fue posible encontrar más debido al cubrimiento del pavimento y de las casas.

Caracterización de fracturas en calles, terrenos y construcciones

En el segundo recorrido una vez identificadas las zonas con afectaciones, se procedió a medir la orientación de las grietas en pavimentos y pisos de las edificaciones. Para ello, se utilizó una brújula y se registró el ángulo con respecto al norte magnético. Además, se midió la apertura de las fracturas o el desplazamiento de los bloques de pavimentos afectados, así como, la profundidad de las grietas o el hundimiento de los bloques afectados.

Evaluación de daño en edificaciones

Se realizó una evaluación visual externa de las edificaciones afectadas por las fracturas. Durante este proceso, se consideraron varios factores, como el uso de la edificación, su ubicación topográfica, las grietas y fracturas en el terreno, el hundimiento, la inclinación y la afectación en columnas, travesaños y muros. El objetivo fue identificar el nivel de daño de la estructura, considerando el apartado

de evaluación de daños, resumido del formato para evaluación estructural del Centro Nacional de Prevención de Desastres (2021).

Caracterización de los materiales que constituyen el subsuelo

Se llevó a cabo la caracterización de los materiales del subsuelo en los siete sitios seleccionados. Esto incluyó el análisis de su origen geológico, textura, estructura, composición mineralógica y la presencia de rasgos como fracturas. Además, se evaluó la permeabilidad de estos materiales para comprender mejor su comportamiento hidrogeológico y geotécnico. Como resultado, se elaboró un mapeo geológico del área de estudio.

Estas actividades de campo fueron esenciales para obtener una comprensión integral de los procesos geológicos y los impactos en la infraestructura urbana.

Estudios geofísicos y ángulo de fricción interna

Para determinar la profundidad a la que llegan los rompimientos de materiales en el subsuelo y el tipo de materiales en que se están generando los hundimientos, se utilizó el método geofísico de Ground Penetrating Radar (GPR) o georradar, que permite inferir la presencia de elementos emplazados en el subsuelo; con este método se realizaron 12 secciones en sitios donde se encontraba visiblemente afectado el pavimento para determinar la amplitud de afectación de las fracturas.

Adicionalmente se realizaron 5 Métodos Electromagnéticos en dominio del Tiempo (TEM) para determinar el espesor de los materiales, así como los cambios profundos que se pudieran asociar con los movimientos que se presentan en superficie; con los resultados se construyeron perfiles de resistividad, en los cuales se presenta una zonificación y en conjunto con la información geológica e hidrogeológica, se realizó una interpretación de las capas en el subsuelo, las cuales se presentan en el apartado de TEM's.

Adicionalmente se realizaron dos secciones sísmicas (MASW) con las cuales se identificaron velocidades de onda de los materiales en el subsuelo; estas fueron correlacionadas con las tablas que establecen las propiedades mecánicas de los materiales; los resultados permitieron determinar su ángulo de fricción o de reposo, para calcular de forma conjunta con el espesor de estos, el área de afectación que pueden provocar las fracturas, lo cual sirvió de base para elaborar el mapa de riesgo.

Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico, consistió en la construcción de 12 mojoneras, para determinar su posición exacta desde el punto de vista geográfico y su elevación sobre el nivel del mar; se buscó que dos estuvieran en sitios en donde el tipo de roca asegurara que no tendrían movimiento horizontal y vertical; las otras 10 en sitios que permitirán tener un control de los movimientos producidos por las grietas, por lo cual se localizaron en posiciones contrarias al movimiento que pueden producir estas estructuras.

Para determinar su posición y elevación se utilizó la técnica de nivelación del sistema global de navegación por satélite (GNSS), la cual efectúa sus mediciones sobre el elipsoide, al contrario de lo que se realiza con otros métodos en los que en los que se hace referencia a cotas sobre el geoide.

Por tal motivo, con el propósito de ligar toda la información espacial al elipsoide y datum geodésico WGS84, durante los días 7 y 8 de julio de 2024, se posicionaron 12 mojoneras, así como el banco de nivel del INEGI con denominación BN-V11272R.

Modelo geológico e hidrogeológico de la zona de estudio y sus efectos en las edificaciones

Con base a los resultados del trabajo de campo en los puntos de verificación geológica, así como los resultados de las perforaciones realizadas en 2020 y los estudios de geofísica (georradar, TEM y sísmica MASW), se delimitaron tres tipos de materiales en la zona de estudio y a partir de esto se identificaron los que se están moviendo por efecto de su inestabilidad.

Adicionalmente, se analizó la información de SAPAL con relación a la ubicación de los pozos y la información de los niveles de agua subterránea en estos, lo cual permitió concluir el tipo de acuífero que hay en la región, sus límites con relación a la zona de estudio y que los materiales que hay en esta no están relacionados directamente con los asentamientos producidos por la sobreexplotación del acuífero.

Delimitación de la zona de influencia del agrietamiento.

Para definir la zona de influencia del agrietamiento se utilizó la información obtenida en las edificaciones dañadas, se ubicaron las trazas de las fracturas y se utilizó la interpretación de las secciones de georradar y tendidos sísmicos; con la información de los métodos geofísicos se determinó de forma aproximada el ángulo de reposo de los materiales en la zona de afectación, haciendo intervenir el tipo de materiales y su espesor para, a partir de relaciones trigonométricas,

obtener la longitud de influencia a lo largo de la fractura; los resultados del georradar permitieron observar también que algunas de las fracturas existentes en el subsuelo aún no llegan a la superficie; finalmente, con la integración de todo esto se establecieron las dimensiones de las zonas afectadas.

Una vez realizada esta delimitación, se analizaron los daños identificados en el censo de edificaciones, concluyendo que las casas con afectaciones visibles se encuentran en una franja paralela a la fractura, que tiene un ancho de entre 20 y 30m; a esta franja se le asignó un peligro alto; a la zona donde ya había fracturamiento en el subsuelo, no visible en superficie, se le asignó un riesgo medio, las dimensiones de esta segunda zona en la mayoría de los casos coincidió con los valores calculados con la información sísmica; con esta base, en los sitios donde no se realizó exploración con georradar, pero se observaron fracturas en campo, se utilizó la longitud citada para trazar de forma estimada las áreas afectadas que aún no son visibles en superficie.

Una vez que se identificaron las trazas de las fracturas, se cartografiaron y en los planos se estimó su continuidad, con base en la dirección de sus paredes, con esto se identificaron las zonas en donde puede haber daños, determinado que estas tienen un riesgo alto y medio, lo cual fue confirmado con abombamientos en el adoquín, pero no aún no con fracturas; sin embargo estas estructuras muestran que potencialmente el riesgo se incrementará en el futuro; otra forma de tener más evidencias de las proyecciones de las fracturas y confirmar el movimiento en las trazas de estas, fue el análisis de la interferometría realizada para abril del 2024.

Propuestas de mitigación y adaptación para la zona afectada.

Para realizar estas propuestas se consideraron las características geológicas, la infraestructura dañada, así como las actividades humanas que han provocado que se agrave el problema de la inestabilidad de los materiales en el subsuelo de la zona de estudio; ya que las dimensiones de las zonas donde la inestabilidad se presenta, son de magnitudes amplias, debido a que involucra a una gran masa de terreno; fue fundamental detallar los análisis en las zonas delimitadas, con objeto de que las recomendaciones que en adelante se darán, estuvieran muy bien soportadas, en posición y dimensiones.

Las propuestas de mitigación están planteadas para retardar o disminuir la afectación a las edificaciones, y atenuar o disminuir el avance del proceso de inestabilidad de los materiales en el subsuelo; otras tienen por objetivo brindar seguridad a las viviendas; con esta base fueron divididas en función de sus dimensiones, las primeras son de amplia extensión, a escala de colonia y las segundas están enfocadas a las edificaciones; adicionalmente se presentan

actividades para zonas donde el desarrollo urbano es bajo, para prevenir que se repitan las afectaciones observadas.

Plan de seguimiento en la zona afectada

Para continuar la evaluación del proceso de inestabilidad de los materiales en el subsuelo y la afectación de este a las edificaciones, se propusieron actividades de seguimiento a este proyecto y otras que por falta de presupuesto no se cubrieron en este estudio, pero que son necesarias para complementar el conocimiento del comportamiento de los materiales en el subsuelo y la velocidad de los cambios, lo cual permitirá adecuar las propuestas de mitigación y adaptación propuestas.



"Planear el futuro,
pensar el presente"

2. Análisis de la información

2.1. Geología regional

El área de estudio se encuentra entre los límites de dos provincias fisiográficas, la Mesa Central y la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), debido a esto su arreglo, tipo de rocas y estructuras geológicas son diferentes (Figura 2.1).

La Mesa Central es una región elevada constituida por amplias llanuras y sierras dispersas, cubiertas en su mayor parte por rocas volcánicas (Figura 2.1), una de estas sierras es la de Guanajuato. Está limitada al este por un sistema de fallas inactivas, al sur donde se encuentra el área de estudio, está limitada por una larga falla normal denominada como la falla del Bajío (Nieto-Samaniego et al., 1999), también inactiva, con una orientación NW-SE, la cual originó a una cuenca donde se ubica parte de la Faja Volcánica Transmexicana.

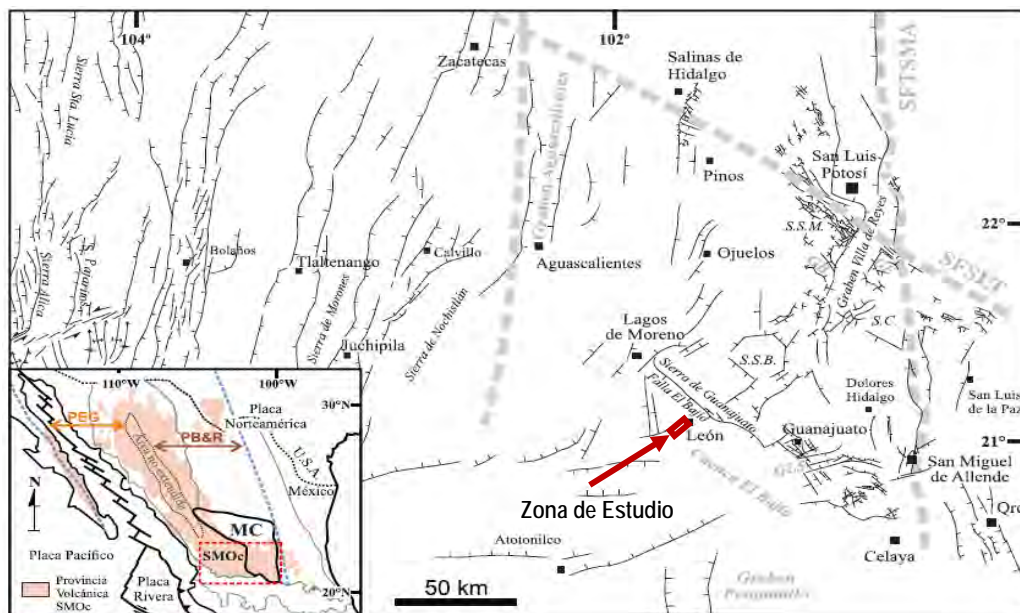


Figura 2.1. La ubicación del área de estudio se encuentra el límite de dos provincias fisiográficas con características diferentes: Mesa Central y Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Modificado de Nieto-Samaniego et al. (1999)

En estas provincias existen una gran cantidad de estructuras geológicas, sin embargo, la que más importancia tiene para la zona de estudio es la falla León-San Francisco del Rincón, debido a que originó la zona donde ahora se asienta la ciudad de León; estas fallas formaron en el pasado lagos en donde se depositaron materiales lacustres, alternados con volcánicos.

2.2. Geología estructural de la región donde se localiza la ciudad de León

Para definir el arreglo estructural regional en que se encuentra el área de estudio, además del registro que se tiene en estudios previos, se encuentran estructuras que no son observables en superficie, para entender su arreglo se analizó el mapa magnético de la región, el cual permitió conocer las estructuras geológicas regionales que hay en la parte profunda del subsuelo, con el fin investigar si los procesos que están ocurriendo en la superficie del terreno, pudieran estar vinculados con estructuras geológicas profundidad (fallas de origen tectónico).

Con este análisis se identificó que en la parte profunda del subsuelo del área de estudio hay una serie de lineamientos, representadas en la Figura 22 por las anomalías de color magenta, que representan tendencias lineales seguramente vinculadas con fallas y fracturas, profundas ya inactivas, sobre las cuales se depositaron materiales volcánicos y sedimentarios, que no fueron afectadas por las citadas fallas y fracturas.

Los valores bajos de anomalías magnéticas de color verde y azul están asociados con depresiones que con el paso del tiempo geológico fueron rellenas por materiales de diferente composición y origen, ya no vinculadas o afectadas por las fallas citadas.

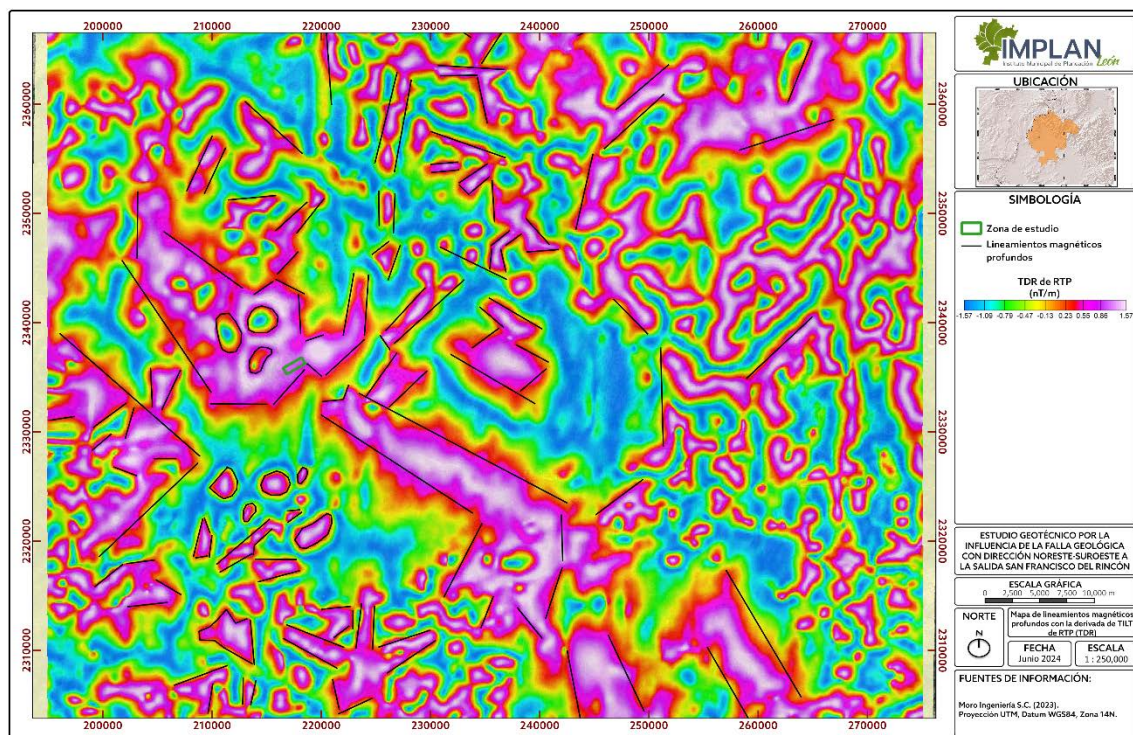


Figura 2.2. Principales lineamientos identificados en la cartografía magnética del Servicio Geológico Mexicano, interpretada por Moro

2.3. Análisis de cortes litológicos y sección geológica

De acuerdo con el documento "Perfiles estratigráficos para el estudio geofísico en la Falla Blvd. Torres Landa, Col. Las Huertas, León Gto." ubicado dentro del área de estudio (ver Figura 2.3), se reportó la perforación de tres sondeos geotécnicos de los cuales se obtuvieron muestra a las que se les realizaron ensayos de laboratorio, en la tabla 2.1 se muestran las coordenadas de cada sondeo.

Tabla 2.1. Localización de los sondeos (2020)

Clave	UTM (X)	UTM (Y)	Profundidad (m)
SP1	216,696	2,335,341	18.60
SP2	216,949	2,335,559	19.35
SP3	217,111	2,335,680	22.60



Figura 2.3. Localización de la sección geológica y de los sondeos perforados

Con la información geotécnica se realizó la interpretación geológica para determinar el arreglo de los materiales en el subsuelo y se construyó la sección geológica de la Figura 2.4, en la que se observa la variación horizontal y vertical de los materiales; en el sondeo SP1 los materiales son de granulometría más gruesa por lo que probablemente estén relacionados con sedimentos aluviales o de pie de monte; en los sondeos SP2 y SP3 predominan sedimentos areno-

limosos, que debe estar asociados con materiales volcánicos del tipo toba arenosa.

Estas variaciones están vinculadas también a cambios en la permeabilidad y por tanto en su respuesta al paso del agua; es importante mencionar que en los reportes de los sondeos no se encontró nivel de agua, y se reportó que los materiales superficiales son de baja compactación, mientras que la toba arenosa tiene alto grado de compactación.

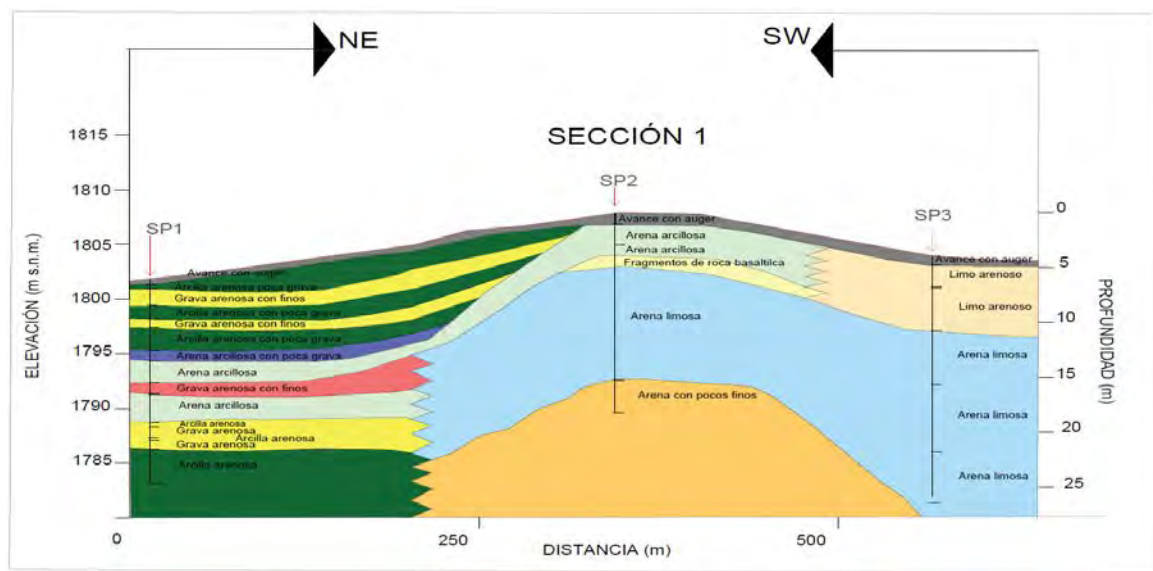


Figura 2.4. Sección geológica de las perforaciones realizadas en el 2020. Fuente. Elaboración propia

Esta sección muestra el arreglo de las rocas y sedimentos donde se realizaron los sondeos, complementariamente en los trabajos de campo se buscaron excavaciones, se visitaron arroyos y otros sitios, para establecer las variaciones laterales de los materiales en superficie para finalmente elaborar un mapa geológico detallado.

2.4. Exploración geofísica histórica

Como parte de la recopilación de información del área de estudio, se encontró que la empresa Ciencias de la Tierra Asesores, realizó el "Estudio geológico-geofísico en el sector poniente de la ciudad de León", en donde llevaron a cabo tomografías geoelectricas y sondeos geomecánicos para conocer un modelo del subsuelo.

A partir de las tomografías geoelectricas se realizaron siete secciones, las cuales se distribuyeron sobre calles con las que se nombró a las secciones. Su

profundidad de exploración llegó hasta una profundidad máxima de 80 metros; de estas se utilizaron cinco para ser reinterpretadas, su localización se observa en la Figura 2.5.

Con estas secciones se determinaron los espesores aproximados de los materiales en el subsuelo, en especial los materiales sedimentarios y su contacto con la secuencia volcánica; se puso especial atención en los sedimentos superiores debido a que son los más permeables e inestables, en los que se están desarrollando las grietas.

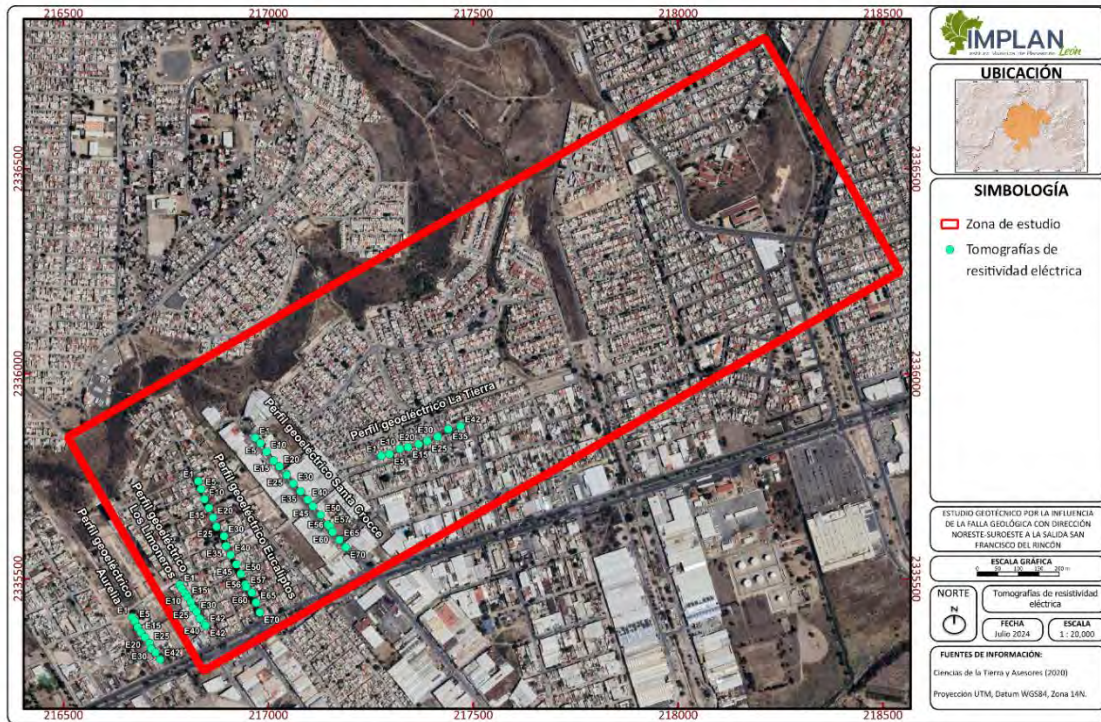


Figura 2.5. Localización de los perfiles geoelectricos del estudio geofísico-geotécnico Las Huertas, 2020

Debido a que las secciones presentadas por la empresa que realizó el estudio no tomaron en cuenta la topografía, Moro para evaluar que tan importante considerar esta variable, utilizó la sección Eucaliptos para fragmentarla en bloques y disponer cada uno de estos en la sección con base en su posición topográfica real; los resultados mostraron que debido a que la pendiente es suave no había un cambio significativo en la delimitación de las unidades, por esta razón las demás tomografías ya no fueron modificadas para su análisis.

Un aspecto importante fue que las tomografías realizadas en las diferentes calles no pudieron ser comparadas de manera integrada, debido a que la empresa no usó un mismo rango resistivo para clasificar a los materiales, por esta razón los colores usados no siempre representan a los mismos intervalos de resistividad.

En la interpretación que Moro efectuó de estas secciones, se concluyó que los valores intermedios de resistividad representan sedimentos de relleno, ya fueran naturales o bien acumulados en los procesos de construcción; estos sedimentos son los que pueden llegar a ser afectados por el agrietamiento; los valores más bajos de resistividad se correlacionaron con los depósitos de tobas que son materiales volcánicos estables, y finalmente los valores más altos de resistividad se asociaron con la secuencia volcánica en la que están intercaladas tobas con rocas soldadas de composición riolítica, siempre estables y sin posibilidad de ser afectadas por grietas.

2.5. Interferometría

Para confirmar el proceso de desplazamiento que se presenta en el área de estudio e identificar las zonas donde se tiene una mayor tasa de hundimiento, se utilizó como herramienta complementaria la técnica denominada "Interferometría de Radar de Apertura Sintética" (InSAR), la cual es una técnica de percepción remota cuyo funcionamiento se basa en interponer 2 imágenes generadas a partir de datos de radar de apertura sintética y comparar sus diferencias; entre sus principales aplicaciones se encuentra la detección de cambios en la elevación del terreno.

Técnica InSAR



La técnica InSAR se fundamenta en medir la diferencia de fase de las ondas electromagnéticas entre dos imágenes SAR, que adquieren información de la superficie de una misma región en diferentes épocas y a diferentes ángulos (Rocca et al., 2000, citado por García Blanco, 2021). Una imagen SAR es una representación visual de la superficie terrestre creada mediante la tecnología de radar de apertura sintética (SAR), puede verse como una matriz de dos dimensiones (filas y columnas) donde cada elemento se denomina pixel y cada uno tiene un valor que representa la información de amplitud y fase de las microondas dispersadas por la superficie terrestre (ESA et al, 2007). Un radar es un sensor activo, capaz de emitir de forma artificial su propia radiación, el funcionamiento consiste en enviar un haz de luz a la superficie terrestre y al rebotar el sensor captura las señales reflejadas (Chuvieco, 1995, citado por Alpala Aguilar, 2021).

La señal de SAR contiene información de fase y amplitud. La amplitud es la intensidad de la respuesta, es decir la cantidad de energía reflejada por la superficie de la Tierra hacia el sensor. La fase se refiere al cambio en la señal de la onda que es transmitida y la que es recibida, esto se usa para medir la distancia precisa entre el radar y el objetivo, dado que la velocidad de las ondas de radar es

constante, la fase de la señal proporciona una medida precisa de la distancia recorrida por la señal (ESA et al, 2007).

Cuando se forma el interferograma entre 2 imágenes SAR, se calcula la diferencia de fase, sin embargo, esta diferencia se debe a varios factores, estos son: deformación de la superficie, topografía, condiciones atmosféricas como humedad, temperatura y presión, y otros como el cambio de la superficie de dispersión y diferente ángulo de visión (ESA & Ferretti, et al 2007). Para separar el cambio de fase debido únicamente a la deformación del terreno, se lleva a cabo un proceso complejo de varias etapas, mediante el uso del software SNAP desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA), en este proceso se filtran los datos del interferograma para obtener únicamente la diferencia de fase que es debida a la deformación de la superficie terrestre, posteriormente, estos datos son transformados a valores de distancia, los cuales, en caso de ser negativos representan un hundimiento del terreno (incremento en la distancia entre el sensor y la superficie terrestre) y en caso de ser positivos una elevación del terreno (disminución en la distancia entre el sensor y la superficie terrestre).

Paralelamente al procesamiento del interferograma, se calcula la coherencia, la cual representa el coeficiente de correlación cruzada entre el par de imágenes SAR utilizadas. Esta se calcula para estimar el ruido de fase del interferograma, para definir si el pixel es apto para ser usado en el cálculo del desplazamiento. Esto muestra si las imágenes tienen grandes similitudes y, por tanto, si son utilizables para el procesamiento interferométrico. El rango de valores del coeficiente de coherencia va de 0 (la fase interferométrica es solo ruido) a 1 (ausencia total de ruido de fase) (ESA & Ferreti et al, 2007). La pérdida de coherencia puede producir resultados interferométricos deficientes y está causada por las fuentes de ruido comentadas.

Las condiciones atmosféricas afectan la información recopilada por los sensores, cuando la señal del radar pasa la atmósfera tanto de ida como de regreso, esta sufre un retraso el cual provoca que la misma pierda exactitud generando errores que aumentan o exageran los valores de deformación (García Blanco, 2021). Zebker y Rosen (1996) en García Blanco (2021) mencionan que el factor de la humedad genera mayores distorsiones que la presión y temperatura, ya que determinan que bajo condiciones de humedad relativa del 20% el error en los datos puede rondar entre los 10 y los 14 cm.

Aunado a los factores mencionados anteriormente, los cambios en la reflectividad del terreno causan que disminuya la correlación de la señal de radar, lo que hace que la fase sea ilegible y por lo tanto limitan la obtención de resultados confiables; si la fase de un pixel estuviera determinada por un solo dispersor puntual estable, la descorrelación se reduciría a cero. Debido a que en

este proyecto se buscó tener una referencia de las zonas donde se concentraban los cambios en el terreno para fines de planeación de los trabajos de campo, no se utilizaron técnicas con un enfoque multitemporal, así se evitaron muchas limitaciones del InSAR convencional, que buscan conservar cierto grado de correlación (dispersores persistentes), lo que reduce la varianza de la señal de tal manera que permite extraer las variaciones de la fase debidas a la deformación. (Perissin, 2016; Hooper et al, 2004; INEGI, 2015).

Algunos ejemplos de la aplicación de técnicas InSAR en México para el monitoreo del hundimiento del terreno en la ciudad de México y la ciudad de Aguascalientes, son los estudios elaborados por Osmanoğlu et al (2010) y por INEGI (2016), respectivamente, en donde ha sido posible dar un seguimiento a este fenómeno.

Metodología

Se calculó el desplazamiento para cada mes del año 2023 en el área de estudio, mediante el uso de la técnica InSAR se procesaron 12 interferogramas, para su procesamiento se siguió la metodología descrita en Alpala y Montenegro (2021) y en el manual "TOPS Interferometry Tutorial" (ESA & Braun et al, 2021). Para la elaboración de cada uno de los interferogramas se descargaron de la plataforma "Copernicus Browser" de la Agencia Espacial Europea (ESA), dos imágenes SAR capturadas por el satélite Sentinel-1, la primera capturada a inicio de mes y la segunda a final de mes, con una diferencia temporal de 24 días.

Una vez obtenidos los interferogramas, cada uno de estos se filtró para mostrar únicamente los píxeles que cumplieran la condición de tener una coherencia con un valor mayor a 0.5. Posteriormente se calculó el desplazamiento total durante el año en la zona de estudio, para esto se sumaron los valores de desplazamiento de los píxeles con coherencia mayor a 0.5 de los 12 interferogramas del año, mediante el software QGIS 3.34.

El producto final fue una imagen en formato .tiff con una resolución espacial de 13 m x 13 m (Figura 2.6), la cual muestra el hundimiento total que tuvo la zona de estudio para el año 2023. La imagen que se obtuvo muestra espacios en blanco debido a la manera en que fue calculada, ya que para su procesamiento se tomaron en cuenta solamente los píxeles que tuvieran un valor de coherencia mayor a 0.5, lo que implica que la señal captada por el sensor del satélite no varió demasiado entre una imagen y otra.

El hundimiento calculado para el 2023 varió en un rango de 0.16 a 0.20 m; donde el método obtiene mejores resultados, corresponden con edificaciones grandes, como las bodegas industriales ubicadas en la colonia Santa Croce.

Como resultado, el mayor hundimiento se localizó al sur del área, con un valor mayor a 0.19 m y por otra parte la zona con menor variación en su cota, fue la cercana a la ladera, donde el hundimiento tuvo alrededor de 0.17 m.

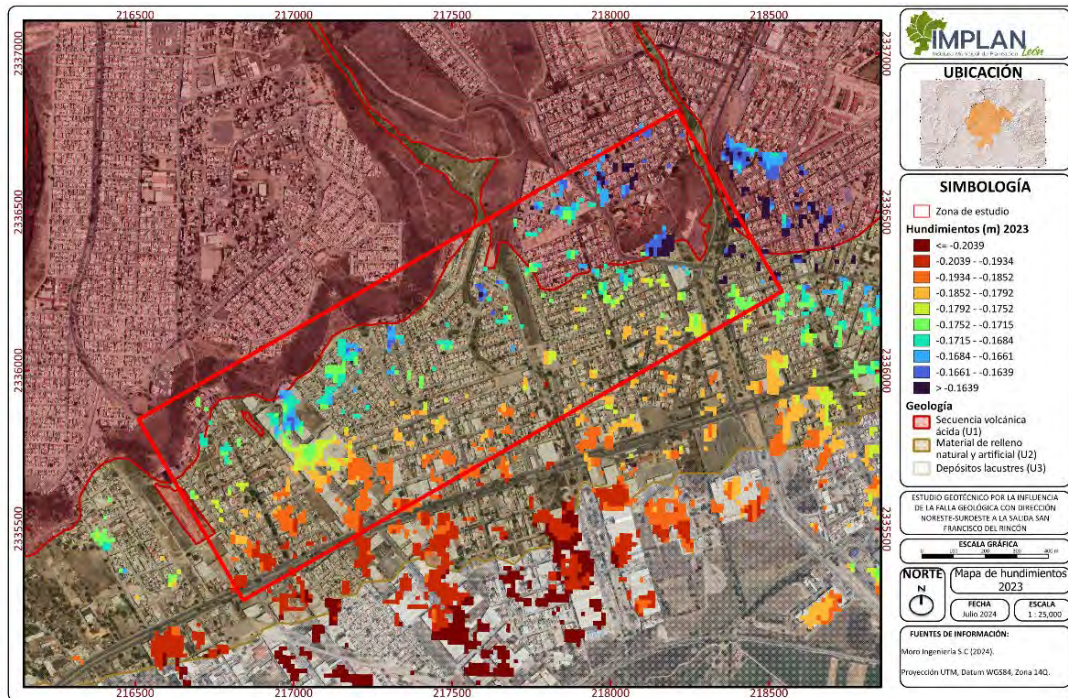


Figura 2.6. Mapa de hundimiento de 2023 generado por superposición de interferogramas

Al comparar esta información con la geología de la zona, el hundimiento en donde se presentan los rellenos lacustres el hundimiento prácticamente fue siempre mayor a 0.185 m y la zona de pie de monte tuvo valores de entre -0.180 y -0.1660 m; estos valores negativos están relacionados más bien con la calidad de las imágenes más que un cambio en la posición de la superficie del terreno.

Relación entre el hundimiento y la precipitación

Se elaboraron tres gráficas (Figura 2.7) de hundimiento para tres zonas que se conoce que han sido afectadas por los agrietamientos (Las Huertas, La Condesa y La Piscina CTM) y la precipitación acumulada mensual; los resultados muestran que la tasa de hundimiento se incrementa en los meses de junio a septiembre; para buscar una explicación a este hecho, las gráficas se compararon con la de precipitación acumulada mensual para 2023, para lo cual se utilizó la información de SAPAL de tres estaciones meteorológicas del municipio de León, cercanas a la zona de estudio: "Centro", "El Faro" y "Las Amalias".

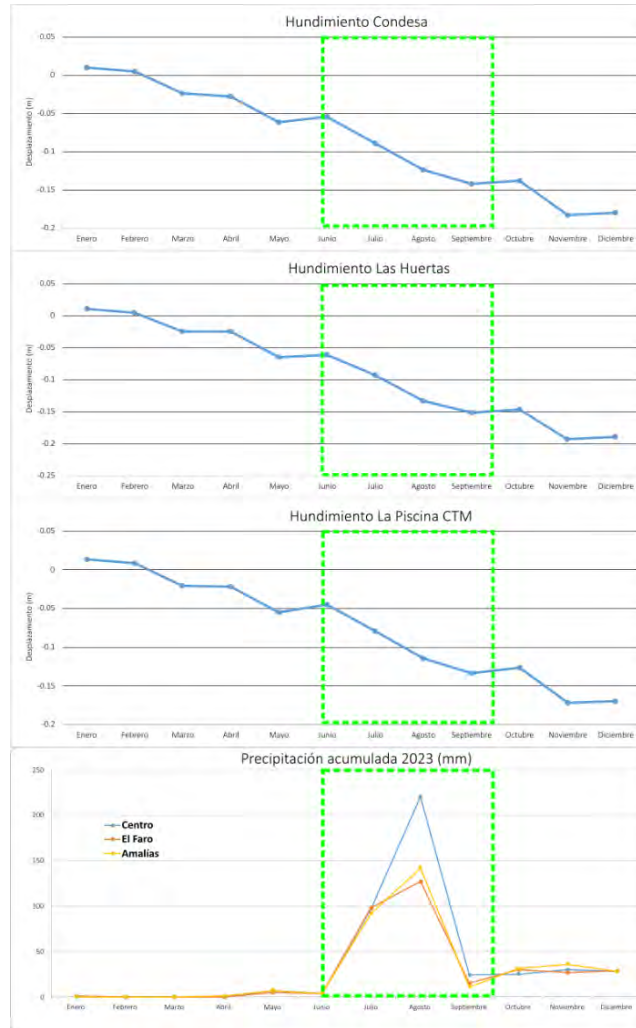


Figura 2.7. Gráficas de hundimiento por mes para las colonias A) La Condesa, B) Las Huertas y C) La Piscina CTM Y Precipitación acumulada mensual para el año 2023

El hundimiento que se registró cada mes con el análisis InSAR no es constante durante todo el año, en las gráficas anteriores se registra un hundimiento mayor durante los meses de julio a septiembre, durante este lapso el hundimiento total registrado para los tres casos fue varió entre 0.08 m y 0.1 m, que es la tasa más alta con respecto a cualquier otro período del año. Estas gráficas permiten concluir también que durante los primeros meses del año (enero-abril) los hundimientos son menores a los 0.05 m, esto coincide con la temporada de secas.

En resumen se concluye que el método InSAR permitió establecer que el hundimiento para el año 2023 se incrementó en la temporada de lluvias y fue menor en época de secas; los valores calculados mediante esta técnica se consideran como una aproximación del hundimiento en la zona de estudio, y se

utilizaron con el fin de identificar que tan importante es la presencia de agua en el proceso; sin embargo, se debe tomar en cuenta el grado de incertidumbre del método y que existen técnicas como la PSI que ofrecen resultados más precisos, pero que requieren de un mayor tiempo de procesamiento.

2.6. Análisis de las variaciones del nivel estático en el área de estudio

Se contó con información de censos históricos, en los pozos dentro y cerca del área de estudio (Figura 2.8), sin embargo no todos tuvieron información para establecer las variaciones del nivel del agua subterránea, ya que de acuerdo con la información (ver Tabla 2.2. Pozos con historial de mediciones dentro del área de estudio), no todos cuentan con la medición de la profundidad del nivel estático (NE) y las mediciones que se realizaron del nivel dinámico (ND) no pueden ser utilizados para esta comparación.

Las obras con mayor información para efectuar el análisis de la variación del nivel estático son los pozos Poniente 6 y Poniente 12; en el primero se observa un ascenso y una disminución del nivel (ver Gráfica 2.1 y Figura 2.8), mientras en el segundo se observó un descenso fuerte del 2017 al 2023 de 21.8 m, como se puede ver, esta información y los pozos con datos, no permiten establecer un comportamiento definido.

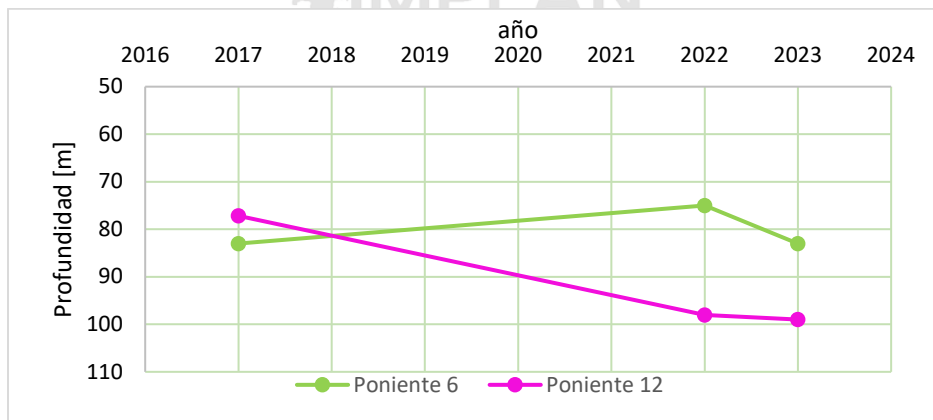
Tabla 2.2. Pozos con historial de mediciones dentro del área de estudio

Clave Pozo	2017 (CEAG)		2022 (SAPAL)		2023 (MORO)		2023 (SAPAL)		PROF. TOTAL [m]	PROF. BOMB A [m] 2022	PTO BOMBA (MORO) [m] 2023	Cauda I [l/s] 2017	Cauda I [l/s] 2023	Cauda I [l/s] 2023 SAPAL
	NE [m]	ND [m]	NE [m]	ND [m]	NE [m]	ND [m]	NE [m]	ND [m]						
Ciudad 59		117.72	97	135						150		29		17.8
Ciudad 52		109.73	98					108				23		15
Poniente 6	83.01		75	102		118	83	118	305	124	130	48	33	
Poniente 11		90.76		97		98		98		124		56	22	
Poniente 12	77.18	94.07	98	107		109	99	109	450	136	126	35	25	
Poniente 4A		143.56				151.24	140	150	400	124	174	15	16	
Poniente 8		166.69						166	294			7	3.96	

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.8 Localización de pozos cercanos al área de estudio. Fuente. Elaborado con información de la CEAG (2017)



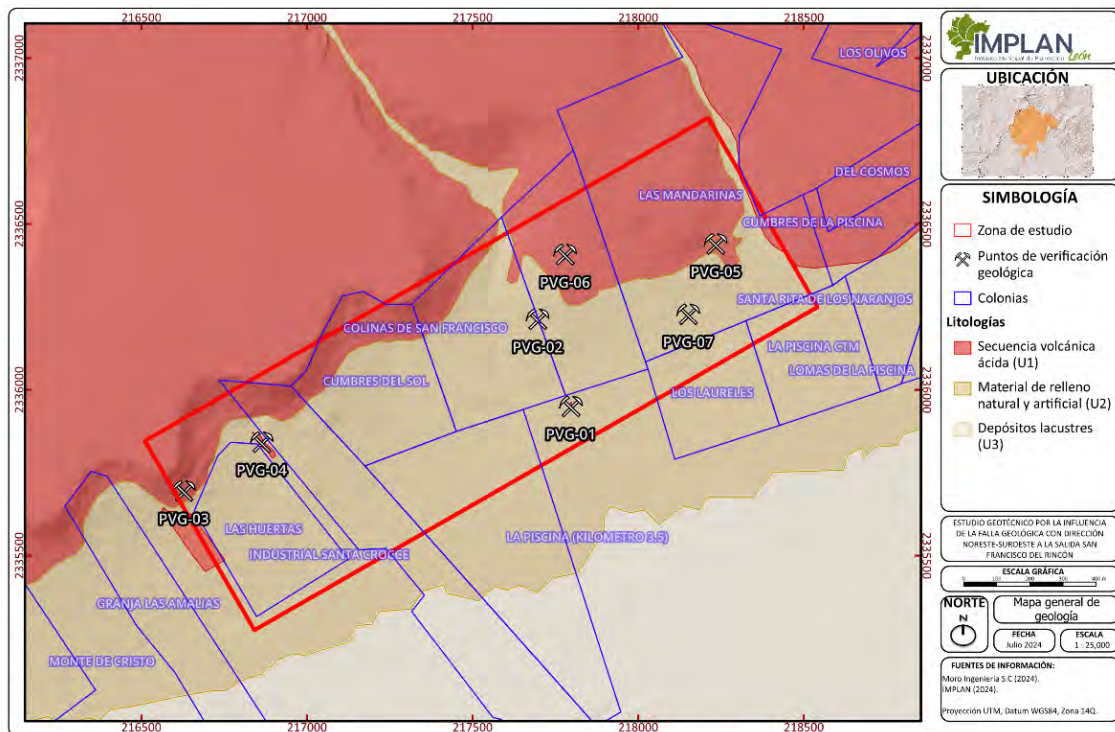
Gráfica 2.1. Hidrógrafo de pozos
Fuente: Elaboración propia

De los pozos registrados en los diferentes censos solo uno se encuentra dentro del área de estudio (ciudad 59); de acuerdo con la profundidad de la bomba, del nivel estático y las secciones de la tomografía se encuentra en tobas, que de acuerdo con las observaciones de campo, son de baja permeabilidad y se consideran con bajas posibilidades de compactación, por lo que el nivel del agua subterránea se asocia con un acuífero profundo de tipo semiconfinado a confinado, por lo que las variaciones de sus niveles no afectan a la saturación de los materiales en superficie.

3. Actividades desarrolladas en el proyecto para determinar la ubicación del fracturamiento y la zona de afectación

3.1. Verificación geológica

Se realizó la descripción y caracterización de los materiales del subsuelo en siete sitios en donde los materiales naturales no han sido cubiertos por la infraestructura urbana; durante las visitas se incluyó el análisis de su origen geológico, textura, estructura, composición mineralógica, grado de compactación y la existencia de estructuras como fracturas; además, se evaluó cualitativamente la permeabilidad de estos materiales, para establecer su comportamiento ante el paso del agua y su comportamiento geotécnico. Como resultado, se elaboró un plano geológico del área de estudio (Figura 3.1).



Dentro de la zona de estudio, los materiales más antiguos que se encuentran expuestos son rocas volcánicas conformadas por tobas e ignimbritas (tobas soldadas), las cuales en conjunto se denominan en este trabajo como secuencia volcánica ácida; en el punto de verificación geológica 1 (PVG-1), se observó una toba formada por fragmentos del tamaño del limo y arcilla, altamente compactada; por sus características físicas y mecánicas es un material totalmente estable; sus fracturas se encuentran cerradas por lo que no permiten

el paso del agua (son materiales prácticamente impermeables); la secuencia volcánica está cubierta por materiales artificiales de relleno, con un espesor irregular de entre 1.30 y 12 m; el contacto entre estos es irregular (Figura 3.2), debido a que la secuencia volcánica fue erosionada antes de que fuera cubierta por materiales artificiales de relleno.



Figura 3.2. PVG-1 en la calle León II, colonia Granjas Campestre
Fuente. Elaboración propia en recorrido de campo

En el sitio del PVG-3 se observó una toba de color rosa, compactada, que en su parte más alterada por las variables climáticas se rompe al golpe del martillo; presenta fracturamiento en dos orientaciones; las fracturas están cerradas por lo que no permiten el flujo del agua; en los recorridos no se encontraron evidencias de que presente algún tipo de desplazamiento, por el contrario se trata de un material totalmente estable (Figura 3.3).



Figura 3.3. PVG-3, en la colonia Las Huertas
Fuente. Elaboración propia en recorrido de campo

En el PVG-4, se observó una secuencia de tobas altamente compactadas, está formada por limos, arenas finas y gruesas y algunos bloques; las fracturas que presenta están cerradas por lo que no permiten el paso del agua; debido a su alto grado de compactación presenta paredes verticales, estables; en los recorridos no se observó que presentaran algún tipo de movimiento o desplazamiento.

En este sitio se observó el contacto de los sedimentos de pie de monte y desarrollo de suelo natural; los primeros presentan baja compactación y están constituidos por arenas medias a gruesas, gravas, y bloques, aunque su porosidad es baja si permiten el paso del agua; en este sitio no conforman acuíferos, están totalmente secos.

El contraste de permeabilidad entre las tobas (prácticamente impermeables) y los sedimentos de pie de monte (permeabilidad baja a media), es alto (Figura 3.4), por lo que cuando la obra de retención se llena y el agua sube hasta este contacto, se infiltra a través de los sedimentos de pie de monte.



Figura 3.4. Sitio del PVG-4, zona donde se encuentra el vaso regulador de SAPAL

Fuente. Elaboración propia en recorrido de campo

En cuanto al sitio del PVG-5, en la parte superior se tiene una alternancia de tobas e ignimbritas (tobas soldadas); las ignimbritas tienen fracturamiento abierto, pero al llegar al contacto con las tobas no continúa, por lo que el paso del agua se presenta únicamente en las fracturas abiertas de las ignimbritas; esta secuencia volcánica está cubierta por material de pie de monte, constituido de arenas gruesas, gravas y bloques, los cuales tienen una permeabilidad media (Figura 3.5). En las inmediaciones de este sitio se observó en la parte superior suelo con un espesor máximo de 1.5 m (Figura 3.6).



Figura 3.5. Sitio del PVG-5 en la colonia Las Mandarinas Fuente. Elaboración propia en recorrido de campo



Figura 3.6. Sitio del PVG-5 en la colonia Las Mandarinas Fuente. Elaboración propia en recorrido de campo

Con los trabajos de verificación geológica, se observó que la mayoría de la zona de estudio está cubierta por sedimentos de pie de monte, como fue el caso del sitio del PVG-2, en el cual se tienen materiales de tamaño de bloques de 30 a 50 cm, con gravas y arenas gruesas, todo este conjunto tiene un bajo grado de compactación; estos materiales por su porosidad o porque presenta grietas

permiten el paso del agua; sus espesores son muy variados y en el subsuelo de la zona de estudio se encuentran distribuidos irregularmente (Figura 3.7).

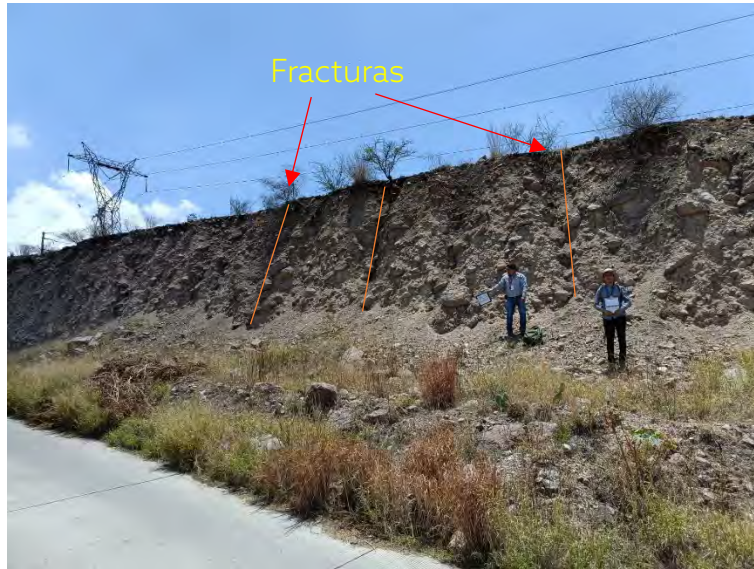


Figura 3.7. Materiales expuestos en el sitio del PVG-2, calle León II Col. Colinas de San Francisco
Fuente. Elaboración propia en recorrido de campo

Los sedimentos de pie de monte cubren de forma irregular a la tobas e ignimbritas (secuencia volcánica ácida); en su contacto hay un fuerte contraste de permeabilidad, siendo los sedimentos los que tienen relativamente hablando la mayor permeabilidad, y las tobas son prácticamente impermeables.

Los materiales de pie de monte, están constituidos por sedimentos de diferentes tamaños, entre estos abundantes finos (limos y arcillas), por lo que durante la infiltración del agua se puede generar un proceso de migración de partículas finas, dejando una mayor proporción de partículas gruesas que sufren un reacomodo para cubrir los espacios vacíos; esto provoca cambios en su volumen y agrietamientos, este proceso es conocido como sofusión y es una de las causas del proceso de fracturamiento en la zona.

3.2. Censo de las edificaciones afectadas

Se llevaron a cabo recorridos por todas las calles de las colonias afectadas y áreas adyacentes dentro de la zona de estudio, estas colonias fueron Las Huertas, Santa Croce, Cumbres del Sol, Colinas de San Francisco, La Condesa, Las Mandarinas, La Piscina (kilómetro 3.5), La Piscina CTM y Los Laureles como se muestra en la Figura 3.8.



Figura 3.8. Recorridos de verificación.
Fuente: Elaboración propia

Se realizó una caracterización de fracturas en calles, terrenos y construcciones, así como una inspección visual de los daños en las edificaciones desde el exterior, es decir, desde la calle. Se determinó el nivel de daño en las edificaciones afectadas por las grietas visibles o la inclinación de las edificaciones, en 34 sitios (ver Figura 3.9); se evaluaron de acuerdo con el apartado de evaluación de daños del formato de captura de datos para evaluación estructural del formato breve de captura de datos para evaluación estructural del Centro Nacional de Prevención de Desastres (2021), los sitios visitados se distribuyeron en las colonias: Las Huertas, Santa Croce, Cumbres del Sol, Colinas de San Francisco, La Condesa, Las Mandarinas, La Piscina (kilómetro 3.5), La Piscina CTM, Granja Las Amalias y Los Laureles, el número de sitios visitados por colonia se presenta en Tabla 3.1.

Estos sitios fueron seleccionados durante los recorridos de verificación; estas visitas permitieron identificar las diferentes tendencias de las fracturas y evaluar el comportamiento de acuerdo con el tipo de construcción; su localización se puede observar en la Figura 3.9 .

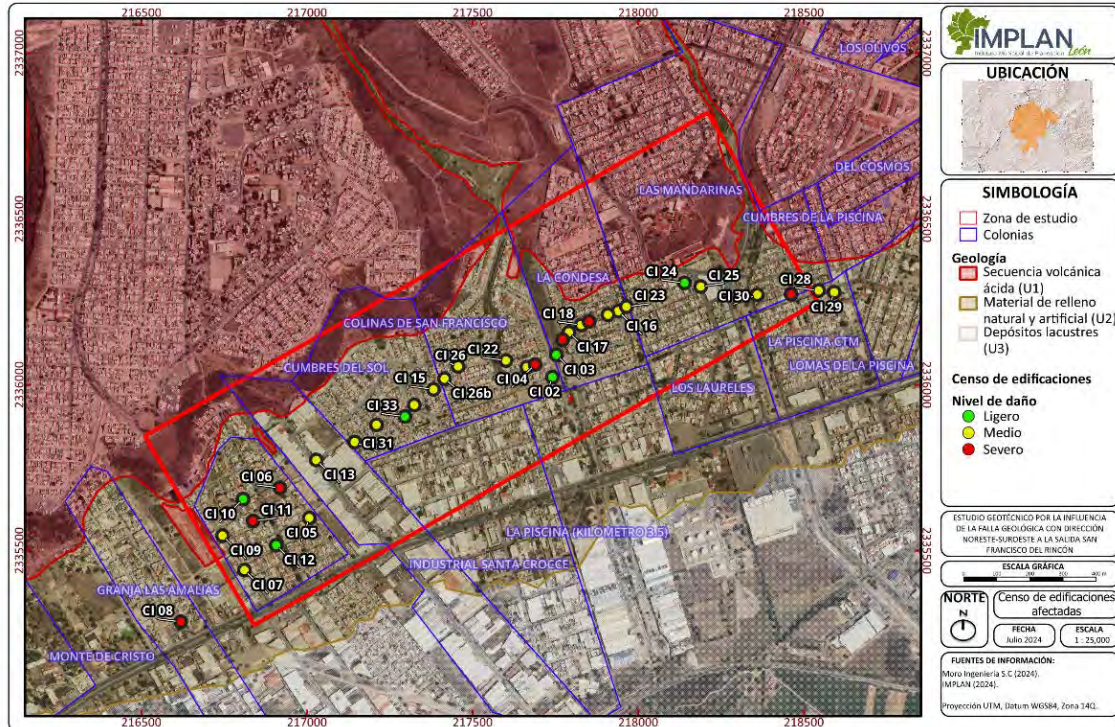


Figura 3.9. Censo de edificaciones afectadas.

Fuente: Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.1. Sitios visitados por colonia

Colonia	Clave	Dirección	Nivel daño
Colinas de San Francisco	CI 01	Calle San Máximo M. del Colve entre las casas No. 114 y No. 115, entre las calles León II y Río	Medio
	CI 02	Calle Pascual de Barón, en el cruce con la Calle León II	Ligero
	CI 03	Calle León II No. 1718-A	Ligero
	CI 04	Calle San Máximo M. del Colve No. 106 y No. 107	Severo
	CI 22	Calle San Lorenzo No. 125 entre calles León II y San Máximo	Medio
Las Huertas	CI 05	Calle de Los Limoneros esquina con Las Tunas	Medio
	CI 06	Blvd. De los Eucaliptos, Escuela Juan N. Álvarez	Severo
	CI 07	Calle Limoneros No. 127 entre Nísperos y Dátiles	Medio
	CI 09	Calle de los Limoneros No. 736, esquina con Las Guanábanas	Medio
	CI 10	Calle de las Limas No. 207	Ligero
	CI 11	Capilla Nuestra Señora del Camino. Entre calle Guanábanas y Persimones	Severo
Granja Las Amalias	CI 08	Calle Eloísa Jiménez No. 196A	Severo

Santa Croce	CI 13	Calle Santa Croce No. 205 esquina Sales	Medio
Cumbres del Sol	CI 14	Calle Pedro de Alcántara	Medio
	CI 15	Calle de los Robles No. 115. Entre calles Bautista y Pedro de Dueñas	Medio
	CI 26	Calle San Carlos de Sezze No. 119	Medio
	CI 26B	Calle San Félix de Cantalicio No. 115	Medio
	CI 31	Calle Cumbre de los Alamos No. 212 y 212A	Medio
	CI 32	Calle Cumbres de los Olmos	Medio
	CI 33	Calle Cumbre de los Enebro No. 110	Ligero

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.1. Sitios visitados por colonia (continuación)

Colonia	Clave	Dirección	Nivel daño
La Condesa	CI 16	Calle Condesa de Rocafort No. 78	Medio
	CI 17	Calle Condesa de Rocafort No. 550A	Medio
	CI 18	Calle Condesa de Villalba No. 108	Medio
	CI 19	Calle Condesa de Villalba No. 114	Severo
	CI 20	Calle Condesa de Villalba No. 126A	Medio
	CI 21	Calle Gobernadores de Guanajuato	Severo
Las Mandarinas	CI 23	Calle Manuel González esquina con Nectarinos	Medio
	CI 24	Calle Nectarinos No. 109	Ligero
	CI 25	Calle Dr. J. de Jesús Rodríguez Gaona, casi en esquina con Vid	Medio
	CI 30	Calle Plan de Guadalupe No. 221	Medio
La Piscina CTM	CI 27	Calle Horóscopo No. 1030	Severo
	CI 28	Calle Horóscopo No. 1007	Medio
	CI 29	Calle Obrero No. 704	Medio
La Piscina (kilómetro 3.5):		No se identificó afectaciones a las edificaciones asociadas con el fracturamiento	
Los Laureles		No se identificó afectaciones a las edificaciones asociadas con el fracturamiento	

Fuente: Elaboración propia.

Observaciones generales

Durante el recorrido de inspección se identificaron diversas afectaciones en estructuras y vialidades de las zonas aledañas a la grieta, con esta información se agruparon en las siguientes observaciones:

- Todos los sitios inspeccionados se encuentran en zonas de ladera, lo que contribuye a la inestabilidad del terreno y a la aparición de grietas.
- En las zonas afectadas, los habitantes reportaron frecuentes fugas de agua potable y en el drenaje.
- En varias inspecciones, las edificaciones están ubicadas cerca de alcantarillas pluviales, lo que puede influir en la aparición de grietas y hundimientos por la infiltración de agua.
- Algunos sitios reportan que los daños se incrementan durante la temporada de lluvias.

- Se observaron abombamiento en calles, así como descuadres de puertas y zaguanes.
- Las mayores afectaciones en viviendas se generan principalmente en aquellas que tienen distintas fases de construcción.
- Las estructuras ubicadas en las zonas aledañas a la grieta, están construidas principalmente con un sistema de muros de carga de mampostería confinada, sobre los cuales se apoyan losas de concreto reforzado; estas estructuras suelen ser de uno o dos niveles, en donde la solución de cimentación más común consiste en el uso de zapatas corridas o losas de cimentación.

A continuación, se detallan los procesos que se identificaron con base en los daños observados.

Asentamientos diferenciales en estructuras cercanas a la grieta.

La afectación más común observada en las estructuras fue la presencia de asentamientos diferenciales bajo sus cimentaciones. Como consecuencia de estos asentamientos, las estructuras presentan fracturas en sus muros, con inclinación aproximadamente 45°, lo que indica que los muros han sido sometidos a una tensión diagonal, la cual es causada por el asentamiento diferencial a lo largo de la longitud de éstos, lo que genera fracturas tanto en las juntas de pegado como, en algunos casos, en las propias piezas de mampostería.

Pérdida del soporte del suelo

Las afectaciones más graves en las estructuras se producen cuando la fractura atraviesa directamente debajo de la edificación, en estos casos, a medida que la fractura crece en ancho y profundidad, la cimentación pierde progresivamente el soporte del suelo de apoyo, esto genera la aparición de fracturas verticales en los muros de la estructura, por la fractura de los elementos de cimentación. Por ejemplo, la ruptura de una zapata corrida puede provocar un desnivel entre los dos tramos fracturados, lo que a su vez produce las grietas verticales en la estructura.

Esta condición se magnifica cuando coincide con juntas constructivas de las edificaciones, debido a que se hacen ampliaciones del edificio y el sistema constructivo y la cimentación son diferentes entre sí.

Separación entre estructuras adyacentes

En algunos casos, la grieta se encuentra aproximadamente en el límite entre dos propiedades colindantes, en estas situaciones, las estructuras adyacentes a la grieta presentan una inclinación, llegando incluso a separarse considerablemente o "recargarse" sobre las estructuras vecinas.

La combinación y avance de estos procesos propician que el nivel de daño en la estructura sea diferenciado en una misma área o incluso en edificaciones contiguas.

Niveles de daño

Con las visitas del censo se identificaron las diferentes afectaciones a las estructuras producto del movimiento del terreno que se describen a continuación.

- **Fracturas en pavimento:** Las fracturas varían en ancho, desde 2 mm hasta 60 mm.
- **Separación de bloques de pavimento:** En algunos sitios, los bloques de pavimento están separados hasta 13 cm.
- **Hundimientos:** Se reportaron hundimientos significativos en varios sitios, con profundidades que varían de 2.5 cm hasta 74 cm.
- **Fracturas en muros:** Las fracturas varían en ancho, desde 1 mm hasta 23 cm.
- **Daños en columnas y trabes:** Se observaron daños estructurales en columnas y trabes, las fracturas que varían en ancho desde 1 mm hasta 125 mm.
- **Inclinación de casas.** Se observaron inclinaciones de las edificaciones desde 4° hasta 13°, lo cual provoca aperturas entre los muros de colindancia o recargamiento entre las edificaciones, generando esfuerzos laterales. Esta situación se acentúa más debido a las construcciones adicionales que incrementan el peso de las edificaciones.
- **Afectación por agua:** En algunos casos, las filtraciones de agua han sido factor para acelerar los daños.

En las casas donde se identificaron daños se llenó el formato de captura de datos para evaluación estructural, que fue tomado de algunas partes de la evaluación estructural del Centro Nacional de Prevención de Desastres (2021); de esta forma se obtuvieron las siguientes evaluaciones daños, cuya distribución se observa en la Figura 3.9:

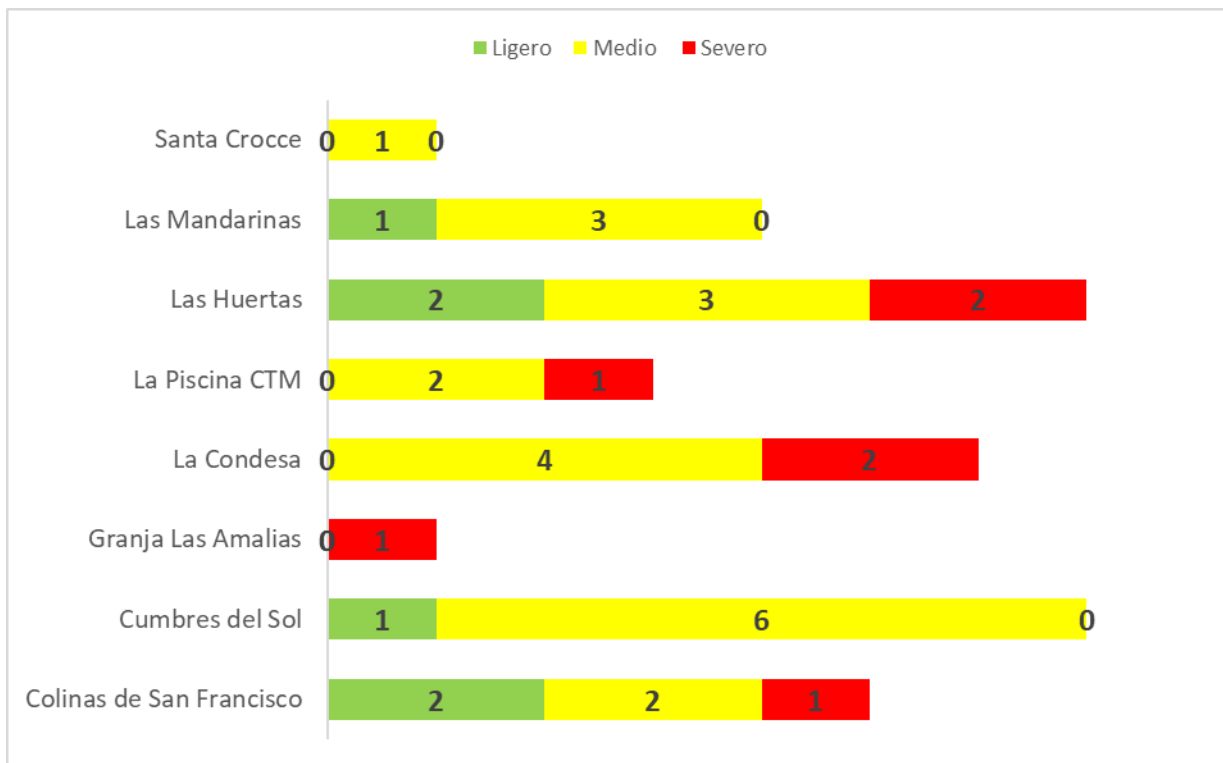
- **Ligero:** en total 6 sitios, CI 02, CI 03, CI 10, CI 12, CI 24, CI 33.
- **Medio:** en total 21 sitios, CI 01, CI 05, CI 07, CI 09, CI 13, CI 14, CI 15, CI 16, CI 17, CI 18, CI 20, CI 22, CI 23, CI 25, CI 26, CI 26B, CI 28, CI 29, CI 30, CI 31, CI 32.
- **Severo:** en total 7 sitios, CI 04, CI 06, CI 08, CI 11, CI 19, CI 21, CI 27.

Tabla 3.2. Sitios con daño por colonia.

Colonia	Daño	Sitios
Colinas de San Francisco	Ligero	2
	Medio	32
	Severo	1
Las Huertas	Ligero	2
	Medio	3
	Severo	2

Granja Las Amalias	Severo	1
Santa Croce	Medio	1
Cumbres del Sol	Ligero	1
	Medio	6
La Condesa	Medio	4
	Severo	2
Las Mandarinas	Ligero	1
	Medio	3
La Piscina CTM	Medio	2
	Severo	1

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 3.1. Nivel de daño por colonia.
Fuente: Fuente: Elaboración propia.

Descripción de los daños por Colonia

Colonia San Francisco

En esta colonia en los pavimentos (ver Figura 3.10), se observan fracturas de hasta 9 cm de ancho (CI 01) y hundimientos de hasta 23 cm en algunas áreas (CI 03) y de 4 cm en otras (CI 22). En los muros, se han detectado fracturas cortantes (fracturas por tensión en diagonal) de 23 cm de ancho (CI 04) y fracturas más pequeñas de 4 mm (CI 22). Respecto a las columnas y traveses, se observan fracturas de 1 mm de ancho en las traveses (CI 03) y deformaciones por sobrecarga debido a estructuras adicionales. Además, una vivienda (CI 03) presenta una inclinación de 4° , equivalente a un 9% (Figura 3.11).

Se identificó y midió una fractura en el camellón ubicado entre la calle León II y Gobernadores de Guanajuato, con abertura de 5 cm a 30 cm, una profundidad de 30 cm y longitud de 20 m, la cual no es continua (ver Figura 3.12). Las direcciones medidas en campo de esta fractura son de $80^\circ - 260^\circ$ (CI 02) y $50^\circ - 230^\circ$ (CI 03), esta última corresponde a la grieta medida en camellón, en donde se observa la afectación en materiales de relleno artificial. En esta colonia, de acuerdo con las casas visitadas, el nivel de daño varía desde ligero hasta medio.

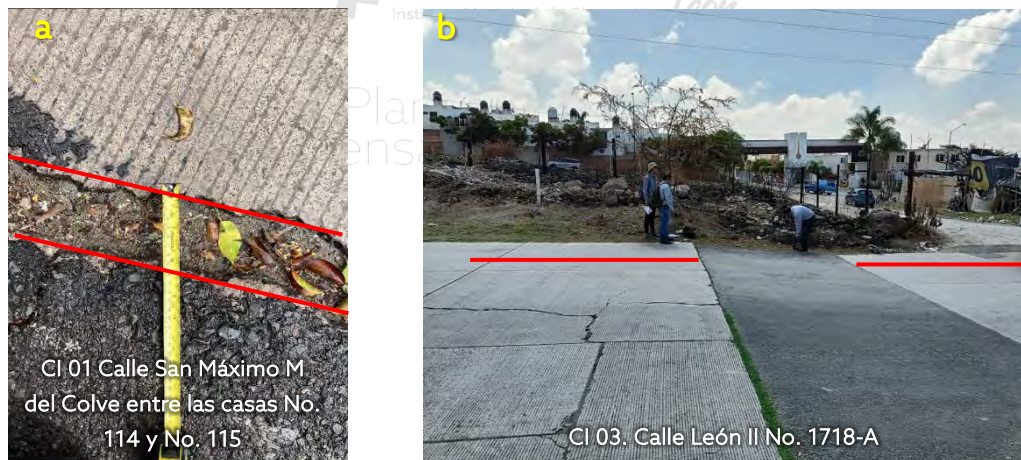


Figura 3.10. a) Fracturas en pavimento y b) hundimiento.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.11. a) Fractura en muro, b) sobrecarga frontal y c) inclinación de edificación.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.12. a) Grieta en camellón y b) continuación de la traza de la grieta en camellón.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.

Colonia Las Huertas

En esta colonia, se observan dislocamientos en bloques de concreto de 10 cm además de separaciones de 10.6 cm y fracturas de 3 a 6 mm de abertura (CI 06), ver Figura 3.13. También se han detectado hundimientos significativos, en el sitio CI 07 de 45 cm (Figura 3.14). En términos de fracturas en muros, se observan fracturas cortantes de 2 a 3 cm en muros de mampostería (CI 09) y en otros casos, como en la escuela Benito Juárez (ver Figura 3.15), en la Capilla de Nuestra Señora del Camino (CI 11) y en viviendas como la de Los Limoneros 127 (CI 07), se reportan fracturas severas de hasta 5 cm en pisos, muros y columnas (ver Figura 3.16).

La vivienda en el sitio CI 07 presenta una inclinación de 13° , es decir del 28%, y en la capilla una inclinación de 9° , es decir del 20%. La fractura identificada tiene una dirección $40^\circ - 220^\circ$ (CI 09). Durante los recorridos se identificó que las calles se encuentran adoquinadas, lo que favorece la infiltración del agua de lluvia que ayuda a que se desarrollen abombamientos. El daño en esta colonia varía desde ligero hasta severo, de acuerdo con la evaluación que se realizó con observaciones desde la calle.



CI 06. Blvd. De los Eucaliptos, escuela Benito Juárez

CI 06. Blvd. De los Eucaliptos, escuela Benito Juárez

Figura 3.13. a) Dislocamiento de bloques de concreto y b) separación de bloques de concreto.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



CI 07. Calle Limoneros No. 127 entre Nísperos y Dátiles

Figura 3.14. Hundimiento de 45 cm.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.

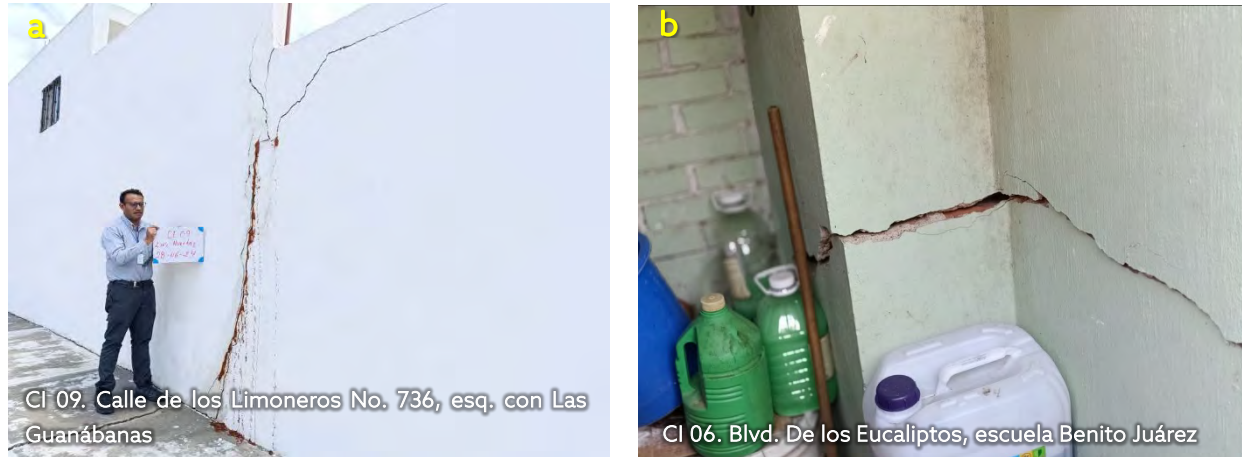


Figura 3.15. Fracturas en a) muros y b) columnas.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.16. a) Fracturamiento en columnas, muro e inclinación de la Capilla de Nuestra Señora del Camino y b) separación de bloques en piso y fractura en muro, escuela primaria Benito Juárez.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.

Colonia Granja Las Amalias

Esta colonia se encuentra fuera del área de estudio, sin embargo al ser notoria la relación con la fractura de la Colonia Las Huertas, se realizó la evaluación de un sitio (ver Figura 3.17), en donde se identificó un severo hundimiento, con 74 cm de profundidad (CI 08). Esta fractura continúa en el material de relleno artificial con un ancho de 8 cm y 30 cm de profundidad, afectando severamente a las viviendas cercanas con inclinaciones y aberturas entre los muros colindantes. Se han observado afectaciones significativas en muros, traveses y columnas, indicando un nivel de daño severo (ver Figura 3.18).



Figura 3.17. a) Dirección de la grieta y b) hundimiento.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.18. a) Abertura de muros colindantes y b) fracturamiento de muros en viviendas.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.

Colonia Santa Croce

En esta colonia se observaron daños en muros, con fracturas de 5 mm a 3 cm de ancho (CI 13), afectando tanto la estructura principal como la edificación adyacente. La dirección de la fractura se midió entre 32° y 212°, esta fractura se observó detrás de la bodega y se encontró fracturado el material de relleno artificial. Se clasificó con un nivel de daño medio.



Figura 3.19. Fracturas en a) muros y b) columnas.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.

Colonia Cumbres del Sol

En esta colonia en los pavimentos se detectaron separaciones de hasta 10 cm y hundimientos en la calle de hasta 15 cm (CI 14) y de 7 cm en diferentes áreas (CI 15), ver (Figura 3.20. a) Recarga y b) apertura entre muros colindantes provocando esfuerzos laterales y fracturamiento horizontal.) y en algunos casos abombamientos, como en el CI 14. Respecto a las fracturas en muros y columnas, se reportan aberturas de hasta 90 mm en muros (CI 26), ver Figura 3.21 y de 3 a 4 mm en otras ubicaciones (CI 33).

También se observaron aperturas entre colindancias de casas de hasta 21 cm y recarga en edificaciones (CI 15), afectando la grieta hasta seis casas perpendicularmente a su traza del lado del labio que cae (ver Figura 3.20). La dirección de la fractura tiene una ligera variación de $40^\circ - 220^\circ$ (CI 15, CI 26) y $32^\circ - 212^\circ$ (CI 14). Durante la visita en el sitio CI 31, comentaron que la separación de las casas inició hace 5 años y en los últimos dos años se ha incrementado; y el número de casas afectadas es mayor hacia el bloque de abajo en al menos 4 casas. En esta colonia de acuerdo con las vistas los niveles de daño varían desde ligeros a medios.



Figura 3.20. a) Recarga y b) apertura entre muros colindantes provocando esfuerzos laterales y fracturamiento horizontal.

Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.21. a) Hundimiento y b) separación de pavimento.

Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.

Colonia La Condesa

En esta colonia se identificaron afectaciones en pavimentos, se observaron fracturas de 2 mm hasta 50 mm (CI 21) y desplazamientos de 13 cm (CI 17). En términos de hundimientos (ver Figura 3.22), se midieron de hasta 42.5 cm (CI 16), de 18 cm y 15 cm (CI 21, CI 17). Respecto a fracturas en muros (ver Figura 3.23), se observaron de 2 mm hasta 70 mm de apertura (CI 19), así como de 1 mm hasta 50 mm en columnas (CI 21). En el CI 16 y CI 17 cuando se realizó la visita, informaron que el fracturamiento inició hace 13 años aproximadamente y comentaron que durante la época de lluvias se vuelve a agrietar lo que se había

reparado, estas observaciones se identificaron en casas orientadas perpendicularmente a la fractura.

También se observaron aperturas entre colindancias de casas de hasta 15 cm (ver Figura 3.24), en donde las casas son paralelas a la fractura, afectando la grieta hasta seis casas perpendicularmente a su traza en el labio que cae, con un nivel de daño que varía desde medio hasta severo. En esta colonia la grieta se midió con una ligera variación en la dirección $25^\circ - 205^\circ$ (CI 16) y $30^\circ - 210^\circ$ (CI 19).



Figura 3.22. Hundimiento en la colonia La Condesa.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.23. Fracturamiento en a) barda perimetral de la colonia y b) barda perimetral de vivienda afectada.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.24. Apertura de a) muros de colindancia y b) barda perimetral.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.

Colonia Las Mandarinas

En esta colonia hay fracturas en pavimentos y el terreno, se identificaron fracturas en el piso de 4 cm (CI 30) y separaciones entre bloques de concreto de hasta 6 cm (ver Figura 3.25) y 5 cm en la bodega industrial (CI 25). Respecto a los hundimientos, se midieron hasta 5 cm (CI 23), 20 cm en una bodega industrial (CI 25) y 14 cm en viviendas (CI 30). En términos de fracturas en muros, se observan fracturas cortantes de 3 mm hasta 5 cm de ancho en muros (CI 24), en cuanto a las columnas y trabes, se observan fracturas de 3 mm de ancho en las columnas (ver Figura 3.26); se identificaron inclinaciones como en el sitio CI 23 con una inclinación de 7° , equivalente al 15%.

En esta colonia varía la dirección de agrietamiento, en la zona suroeste de la colonia, tiene una dirección de $40^\circ - 220^\circ$ (CI 23), similar a las colonias que se encuentran al suroeste; la segunda, observada en la zona sureste de la colonia, tiene una dirección de $90^\circ - 270^\circ$ (CI 30). Estas direcciones convergen en la calle de Nectarino, la cual, según comentarios de los habitantes estaba partida por la mitad con un escalon de 30 cm aproximadamente, sin embargo, por los trabajos de pavimentación realizados la semana anterior a la visita (ver Figura 3.27), no fue posible encontrar evidencias.

En la calle Nectarino en el CI 24 cuando se realizó el recorrido se encontró una casa sin daños, que estaba entre otras que sí los tenían, la dueña de esta casa comentó que cuando la construyeron, los cimientos llegaron hasta la roca dura, lo que favoreció que no fuera afectada. De acuerdo con las observaciones realizadas el nivel de daño en esta colonia varía desde ligero hasta medio.

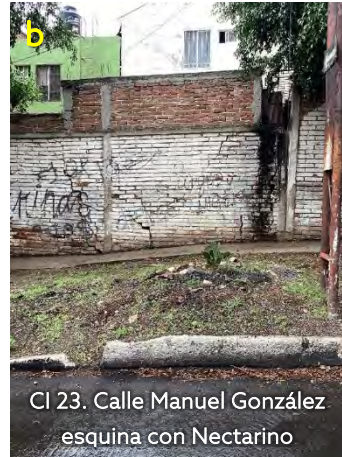


Figura 3.25. a) Fracturamiento y separación de bloques de pavimento y b) hundimiento e inclinación de barda.

Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.26. Fracturamiento a) en muros de vivienda y b) barda perimetral.

Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.27. Calle Nectarino, recién pavimentada, estaba partida por el agrietamiento.

Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.

Colonia La Piscina CTM

En la calle Horóscopo (ver Figura 3.28) se observan separaciones de bloques de pavimento de hasta 8 cm, fracturas de hasta 4 cm y hundimientos de 27 cm, durante las visitas comentaron que el agrietamiento inició hace dos años y hace un año se hizo más evidente cuando se comenzó a hundir el pavimento. Se observaron fracturas de 50 a 100 mm en muros y de 125 mm en columnas (CI 27) (ver Figura 3.29). En la escuela ubicada en la Calle Obrero No. 704 (CI 29), se observaron fracturas en columnas y traveses de 10 mm y en muros de 20 mm. En esta colonia la dirección de la grieta es de 100° - 280° (CI 28). Con los recorridos para evaluar los daños, se concluye que tienen un nivel de afectación que varía de medio a severo, afectando la estabilidad estructural de las edificaciones y requiriendo ya de la intervención de alguna dependencia para mitigar los riesgos.



Figura 3.28. a) Hundimiento, b) fracturamiento y separación de bloques de pavimento
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.



Figura 3.29. Fracturamiento de a) muros y b) bardas.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo.

Con base en las afectaciones que se han identificado y considerando el fascículo de inestabilidad de laderas publicado por la Secretaría de Seguridad Ciudadana, la Coordinación Nacional de Protección Civil y el CENAPRED (2021), **los daños se asocian principalmente con deslizamientos de laderas, un fenómeno complejo que resulta de la interacción de factores geológicos, hidrológicos, geomecánicos y afectaciones por cambios en la topografía, lo que ha provocado el desplazamiento de una porción del terreno pendiente abajo, por la pérdida de estabilidad del material.**

Después de los recorridos efectuados, se llegó a las siguientes conclusiones:

- La zona se encuentra en laderas con capas inclinadas y fracturas que facilitan el deslizamiento.
- La infiltración de agua de lluvia, junto con flujos provenientes de fugas de agua potable y drenaje, humedecen y/o casi saturan el suelo, aumentando su peso y reduciendo la cohesión entre partículas, lo que disminuye la resistencia al deslizamiento y genera desplazamientos y hundimientos que varían desde milímetros hasta decímetros.
- El constante paso del agua en materiales de pie de monte hace que haya un lavado de materiales finos (sofusión).
- Se presentan abombamientos en calles, así como descuadres de puertas y zaguanes.
- Se observaron daños en viviendas, vialidades e infraestructura.
- Cuando el ángulo que forma la dirección del agrietamiento del suelo y la orientación de la calle es menor a 30° , las viviendas presentan un mayor daño, en comparación con las viviendas situadas en calles donde el ángulo es mayor de 30° .
- Las fuerzas generadas por el movimiento del suelo actúan de manera desfavorable en las edificaciones, sobre todo en las estructuras que se construyeron posteriormente a la edificación de la casa; en este caso su peso y rigidez pueden agravar los daños.
- Se observó que el número de casas afectadas es mayor en el bloque que cae.

3.2.1. Evolución de las afectaciones en algunos sitios

Como parte del análisis de la evolución de los daños en las edificaciones, se compararon los puntos visitados en el censo, con imágenes obtenidas por medio de recorridos en Street View de Google Maps; en la mayoría de los puntos se compararon imágenes del 2009, 2014, 2015, 2018 y 2022; sin embargo, en algunos puntos también se pudo comparar con imágenes de 2016 y 2017.

De esta comparación se identificaron 17 puntos que fueron visitados en campo, y solo en 15 se compararon daños puntuales para diferentes años, con imágenes que permitieron determinar los cambios; con estas imágenes se identificaron los cambios en la apertura del fracturamiento, separaciones entre las estructuras o hundimientos y en algunos casos fue posible determinar cuantitativamente el cambio en la apertura de las fracturas.



Figura 3.30. Localización de los puntos con evolución de las afectaciones.

Fuente: Fuente: Elaboración propia.

1. Colonia Las Huertas

En la colonia Las Huertas se pudieron comparar los puntos CI-06, CI-07, CI-09, CI-10 y CI-12, sin embargo, únicamente en los puntos CI-06, CI-07 y CI-09 se obtuvo la medición en la diferencia de aperturas.

Las afectaciones no rebasan los 5 cm de apertura actualmente, para el caso de los puntos CI-06, CI-09, CI-10 y CI-12, los daños están presentes sobre los muros, donde la velocidad de apertura va en el orden 1 cm al año en promedio; como es el caso del punto CI-09 (ver Figura 3.31) donde se calculó una apertura de la fractura principal de 2 cm del año 2022 al 2024.



Figura 3.31. Fracturamiento del 2022 y 2024 para el punto CI-09.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo y de Google Maps.

En el punto CI-07 se detectó un hundimiento de aproximadamente 1.5 cm del año 2022 al 2024, teniendo los años anteriores un hundimiento prácticamente imperceptible.

A partir del año 2015 es cuando se detecta el fracturamiento con un mayor grado de afectación para la colonia, sin embargo, desde el 2009 (año con los primeros registros en imagen), en algunos puntos ya se detectaban afectaciones.

De acuerdo con los perfiles geoelectrónicos Eucaliptos y Los Limoneros de la información recopilada, las afectaciones reportadas se localizan cercanas a los electrodos E15 y E20, E25 a E35, y E45 y E50 para Eucaliptos y E20 para Los limoneros, mismas que contienen bloques de material aluvial. Todas las afectaciones se correlacionan a puntos en la sección en donde empieza a incrementarse el espesor del material aluvial. Los puntos que detectaron estas afectaciones en las secciones se relacionan con las afectaciones en los puntos CI-10, CI-11 y CI-12 para Eucaliptos y CI-07 para la sección Los Limoneros.

2. Colonia Granja Las Amalias

En la colonia Granja Las Amalias, solo en el punto CI-08 se calculó el cambio de apertura y el diferencial de hundimiento. Se tuvo que de 2022 a 2024 hubo una apertura en la separación de las casas de aproximadamente 1.5 cm, actualmente, el hundimiento es de 74 cm.

Para años previos, el ángulo de las imágenes no permitió conocer el cambio de apertura y hundimiento, sin embargo, se puede apreciar que, a partir del año 2018, las afectaciones tuvieron un mayor grado de avance.

El perfil geoelectrónico Aurelia, realizado en la colonia en estudios previos, registra material aluvial ubicado entre los electrodos E20 y E25, y de igual forma, se reportaron afectaciones para esa zona, misma que se correlaciona con las afectaciones reportadas el punto CI-08 (ver Figura 3.32), a pesar de no ubicarse sobre la misma calle, coincide con su proyección.



Figura 3.32. Fracturamiento y hundimientos del 2022 y 2024 para el punto CI-08.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo y de Google Maps.

3. Colonia Industrial Santa Croce

En la colonia Industrial Santa Croce en el punto CI-13 (ver Figura 3.33) se calculó el cambio de apertura en el muro de una bodega industrial; entre 2022 y 2024 hubo una apertura de aproximadamente 1 cm.

De 2009 a 2018 el incremento en la apertura de las fracturas fue de milímetros por año, manteniendo los daños iniciales hasta la actualidad, sin embargo, a partir del año 2018 el número de fracturas se ha incrementado considerablemente.

Cruzando la calle se encuentra una fractura sobre el muro de una edificación, esta edificación ha tenido mantenimiento, sin embargo, constantemente vuelve a

abrirse la fractura. De igual manera, la tasa de apertura es de milímetros al año y las aperturas más grandes no superan los 5 cm.

En la parte central del perfil geoelectrico Santa Croce, realizado en estudios previos, entre el electrodo E25 y E35, se aprecia una gran masa de material aluvial, el cual coincide con la zona de afectaciones de acuerdo con el censo de edificaciones que se desarrolló dentro de los trabajos de campo, en concreto referida al punto CI-13.



Figura 3.33. Fracturamiento del 2022 y 2024 para el punto CI-13.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo y de Google Maps.

4. Colonia Cumbres del Sol

En la colonia Cumbres del Sol se han podido comparar los puntos CI-14, CI-15, CI-32 y CI-33. En los puntos CI-15, CI-32 y CI-33, se midió la separación entre los muros divisorios de las casas, mientras que en el punto CI-14 se midió la apertura del fracturamiento presente.

La apertura del fracturamiento del punto CI-14 (ver Figura 3.34) fue de 1 cm del año 2015 al año 2018, mientras que del año 2022 al 2024, el cambio de apertura fue casi imperceptible. Para ellos demás años previos, el cambio fue mínimo, por

lo que tampoco pudo medirse. Por lo tanto, su tasa de apertura es de milímetros al año y las fracturas iniciales se mantienen casi idénticas hasta el año 2022. Para el año 2024, a pesar de que la apertura no aumento, el número de fracturas si se incrementó con respecto al 2022.

Con respecto a los puntos CI-32 y CI-33, la apertura de separación entre las casas se mantuvo constante, con una apertura de 1.5 cm de 2022 a 2024 en ambos casos, además, la tasa de apertura por año osciló en el rango de los milímetros, sin embargo, a partir del año 2022, la apertura acumulada ya supera los 10 cm en ambos casos.

El punto CI-15 registró una mayor tasa de apertura, del año 2022 al 2024 la separación entre las casas aumento aproximadamente 4 cm, mientras que de 2018 a 2022 fue de aproximadamente 10 cm, es decir, 2.5 cm al año. Por otro lado, del año 2014 al 2018 la apertura fue más lenta, teniendo un cambio de 4 cm, que representa 1 cm de apertura al año.

La separación actual entre casas es de 21 cm, mientras que en el año 2014 la separación era de pocos centímetros.



Figura 3.34. Separación entre muros divisorios del 2022 y 2024 para el punto CI-15.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo y de Google Maps.

5. Colonia Colinas de San Francisco

En la colonia Colinas de San Francisco se compararon dos puntos el CI-04 y el CI-26b, de los cuales el primero tuvo una apertura en un muro por fracturamiento y en el segundo es una apertura por separación entre viviendas.

El punto CI-04 solo se pudo comparar con el año 2018 (Figura 3.35), en este año no se presentaba ningún daño en el muro y solo un daño mínimo al pavimento, por lo que se interpreta que los daños graves se originaron posteriores al 2018, dado que en la actualidad se tiene una apertura de 23 cm.

El punto CI-26b, es muy similar al punto CI-15 de la colonia Cumbres del Sol, presenta una alta tasa de apertura en la separación entre las casas en los últimos años. Del año 2022 al año 2024 hubo una apertura de aproximadamente 5 cm, del año 2018 al 2022 la apertura fue de aproximadamente 4 cm y del año 2015 al 2018 fue de 3 cm.

Con esto, se aprecia que, del 2022 a la actualidad, se ha incrementado la velocidad de apertura, siendo de 2.5 cm al año, mientras que del 2015 al 2022 se mantuvo constante 1 cm al año.



Figura 3.35. Fracturamiento en muro de 2018 a 2024 para el punto CI-04.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo y de Google Maps.

6. Colonia La Condesa

En la colonia La Condesa se registraron dos puntos en la barda perimetral, CI-21 y CI-23. El primero presenta fracturamiento en un muro y separación en una columna, mientras que el segundo solo presenta fracturamiento en un muro. Ambos puntos cuentan con registro de imágenes desde el 2009, sin embargo, solo en CI-21 se puede comparar la apertura del fracturamiento desde ese año (ver Figura).

En ambos puntos, la apertura en el fracturamiento de 2022 a 2024 fue de 1 cm, mientras que en los años previos la apertura en el fracturamiento tiene una tasa de milímetros al año.

Para el punto CI-21 la separación en la columna fue de 1 cm del año 2022 al 2024, e igualmente en años previos, la separación se dio de milímetros a pocos centímetros.

En la actualidad, la separación de la columna en el CI-21 es de 10 cm y la apertura de la fractura es de 6 cm, mientras que en el CI-23, la apertura de la fractura es de 3 cm.



Figura 3.36. Fracturamiento en muro y separación en columnas de 2022 a 2024 para el punto CI-21.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo y de Google Maps.

7. Colonia Las Mandarinas

En la colonia Las Mandarinas se registraron dos puntos en dos viviendas, CI-24 y CI-27, de los cuales se obtuvieron las diferencias en aperturas para diversos años. Ambas viviendas presentan fracturamiento sobre el muro, sin embargo, en el punto CI-27 también se tiene separación entre las columnas, trabes y escalones (ver Figura 3.37).

Existe una diferencia entre la apertura del fracturamiento de los muros entre ambos puntos; en el punto CI-24 solo se pudo comparar con el año 2022, que tuvo una apertura de la fractura de 5 mm del 2022 al 2024.

Por otro lado, en la actualidad el punto CI-27 tiene una separación en las columnas de 12.5 cm, una apertura de las fracturas en el muro de 5 a 10 cm y un escalón en el pavimento de 10 cm.

De 2022 a 2024 la separación de las columnas fue de 5 cm y la apertura del escalón fue de 6 cm, con una apertura promedio de 3 cm al año, mientras de 2018 a 2022 la apertura del escalón fue de 5 mm y de 2015 a 2018 fue de 3 cm.

Esto muestra que la velocidad de apertura ha sido variable, sin embargo, a partir del 2022 la velocidad se ha incrementado y los daños reflejados en la estructura ya son catalogados como severos.



Figura 3.37. Fracturamiento en muro y separación en columnas de 2014 a 2024 para el punto CI-27.
Fuente: Elaboración propia en recorrido de campo y de Google Maps.

A manera de síntesis, las colonias Las Huertas, Granja Las Amalias, Santa Croce y La Condesa, presentan en su mayoría fracturamiento sobre los muros de las casas con una tasa de apertura de aproximadamente 1 cm al año, sin embargo, a partir del año 2018 la velocidad de apertura en el fracturamiento aumentó y también el número de fracturas.

Las colonias Cumbres del Sol y Colinas de San Francisco presentan una alta tasa de separación en los muros divisorios entre casas, sin embargo, el movimiento de la apertura no presenta una tendencia constante, en algunos años la separación fue de 1 cm al año, pero en otros rebasó los 2.5 cm por año. En ambas colonias, a partir del 2018 la velocidad de apertura se incrementó y en la actualidad los daños son considerados de moderados a severos.

Con respecto a la colonia Las Mandarinas, se tiene separación de muro divisorio entre casas en su parte más al occidente y fracturamiento en los muros en su parte más oriental. En ambos casos la apertura ha sido lenta en años previos, sin embargo, a partir del 2022 la velocidad de apertura aumentó, por lo que en la actualidad los daños son considerados de moderados a severos.

Al comparar los resultados de la precipitación de 2012 al 2023 con la información de las estaciones climatológicas de SAPAL (Centro, El Faro y Amalias; ver Figura 3.38), se observó que el año 2018 fue un año con mayor precipitación, lo cual favoreció que hubiera más agua disponible para ingresar al subsuelo, y se incrementara el lavado de materiales finos y el incremento del peso de los materiales, así como el movimiento por efecto de la lubricación entre los materiales con diferente cohesión, favoreciendo el movimiento y fracturamiento.

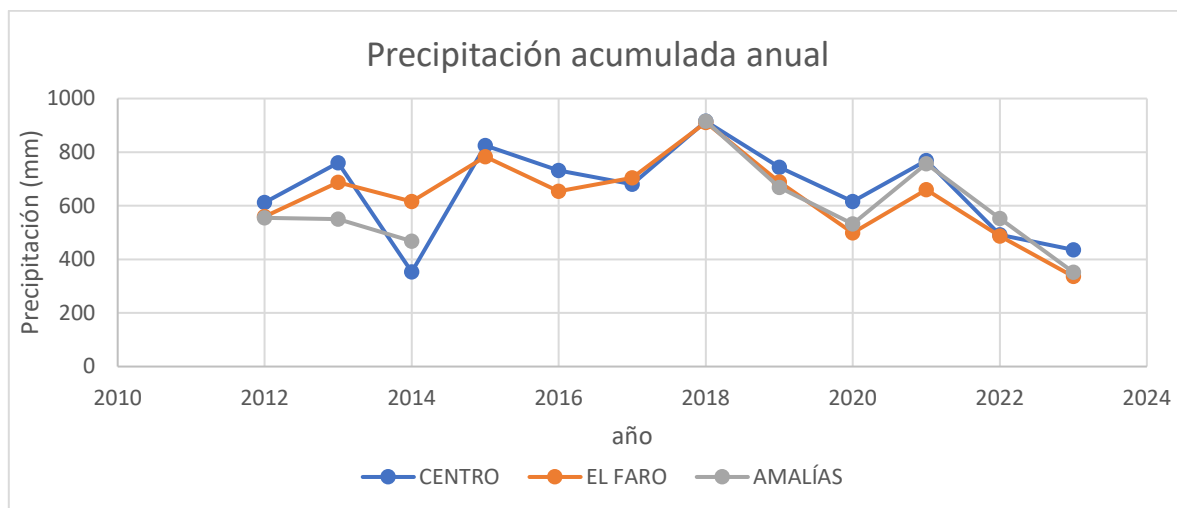


Figura 3.38. Distribución de la precipitación acumulada anual

Elaborado con datos de precipitación de SAPAL.

3.3. Estudios geofísicos y ángulo de fricción interna

Los métodos geofísicos aplican técnicas que permiten identificar variaciones de las propiedades físicas de los materiales del subsuelo (densidad, resistividad, velocidad de propagación de las ondas elásticas, susceptibilidad magnética, etc.) y con la distribución de estas variaciones, es posible inferir algunas condiciones estructurales del subsuelo, con mejor detalle cuando puede ser correlacionado con información de perforaciones y observaciones de campo, que en conjunto permiten elaborar perfiles y mapas; en este proyecto se utilizaron tres diferentes métodos para establecer las características del subsuelo, los cuales se describen a continuación con sus resultados.

Sondeo Transitorio Electromagnético Bajo el Dominio del Tiempo (TEM o TDEM)

Este método permite establecer el espesor de los materiales que constituyen el subsuelo a través de pulsos de corriente eléctrica de forma cuadrada, para lo cual se genera una bobina o espira de alambre en forma de cuadro, la cual en instantes es transmisora y en otros receptora; con esta disposición se realizan varios registros, para generar un conjunto de datos, que permitan graficar una curva de resistividad eléctrica desde las respuestas tempranas (cerca de la superficie), hasta las tardías (datos a mayor profundidad), con lo cual en conjunto se genera un modelo unidimensional para cada sitio en que se ejecuta un TEM; cuando se realizan mediciones en diversos sitios es posible construir secciones resistivas del subsuelo, las cuales se correlacionan con información de campo y/o de pozos para hacer una interpretación de los materiales en el subsuelo.

En este estudio se efectuaron cinco TEM, con los resultados se realizaron tres secciones (ver Figura 3.39), en donde los valores de resistividad se asociaron con la información de las perforaciones geotécnicas históricas y con los puntos de verificación geológica, lo que en conjunto permitió establecer dos unidades georesistivas y litológicas; la primera (U1) asociada con la secuencia volcánica ácida, la cual como se puede ver en la tabla 3.3, se dividió en tres subunidades y la unidad U2, las cuales se muestran en la siguiente tabla, la inferior es la más antigua:

Tabla 3.3. Correlación geológica geofísica.

Unidad	Resistividad [Ohm*m]	Profundidad [m]	litología
U2	14 a 26	0 a 24	Pie de monte y relleno artificial
U1a	15-28	0 a 25	Tobas e ignimbritas
U1b	2 a 9	0 a 80	Tobas
U1c	12 a 24	45 a 75	Tobas e ignimbritas

Con estas resistividades se determinaron los espesores del material de pie de monte, que como se vio en las observaciones de campo, son los materiales

menos compactados y con menor cohesión, que además al encontrarse en la superficie son más propensos a sufrir cambios en sus características mecánicas por la interacción con el agua meteórica, las fugas y la sobrecarga de las edificaciones; todo esto en conjunto favorece a que se generen desplazamientos de los materiales más superficiales.

A continuación, se presentan las secciones geológico-geofísicas realizadas, así como su ubicación, en estas se puede observar que el espesor del material de pie de monte se hace mayor hacia la zona del valle y se adelgaza hacia la sierra.



Figura. Tendidos de las líneas de las tomografías de resistividad eléctrica (TEM)
Fuente: Elaboración propia en trabajos de campo.

"Planear el futuro,
pensar el presente"

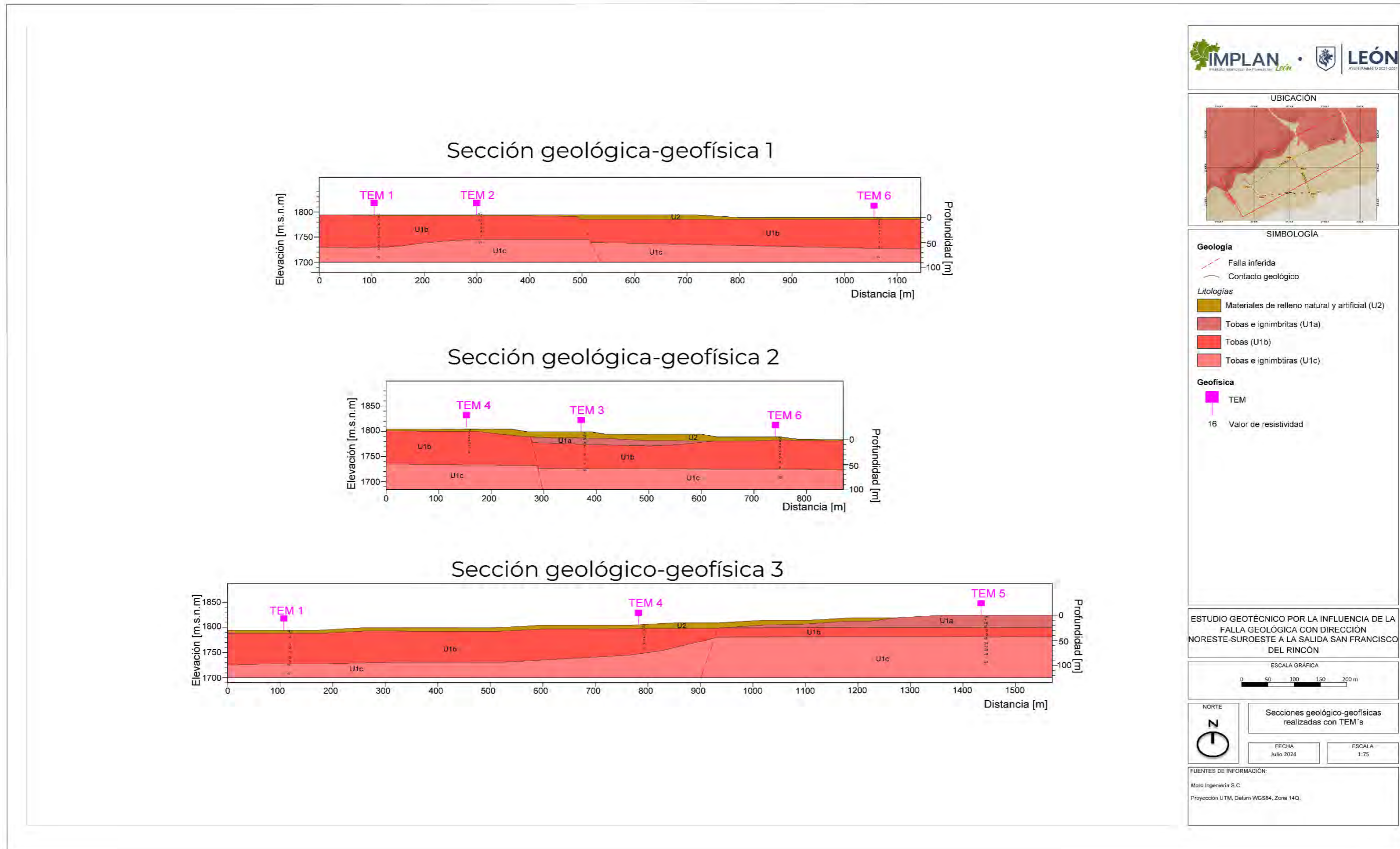


Figura 3.39. Secciones geológico geofísica realizadas con TEM's
Fuente: Elaboración propia

Radar de penetración terrestre

El empleo del georradar (ground penetrating radar, GPR), es una técnica que utiliza ondas de alta frecuencia para liberar energía electromagnética al subsuelo y mediante el análisis de las distorsiones de esta energía, permitió analizar las variaciones de la continuidad de los estratos del subsuelo, identificando las condiciones de las estructuras subterráneas.

En el área de estudio se realizaron 12 secciones de georradar con una longitud total de 811 m, cada una se realizó a dos frecuencias, la primera a 100 MHz, para tener detalle en las estructuras hasta los 5 m de profundidad, la segunda a 50 MHz para evaluar las características de los 5 a los 12 m; con los resultados se construyeron las secciones de la Figura 3.40; el análisis de las secciones identificaron la variación de los espesores de los materiales de relleno natural (pie de monte) y artificial (ver Tabla 3.4), el cual estuvo entre 4.5 y 6.28 m; estos sedimentos al tener moderada compactación y estar mal seleccionados (constituidos por rocas de distinto tamaño), se considera que son susceptibles a deformación y alteración cuando se presentan modificaciones de las condiciones de peso, humedad o saturación, debido a que provocan cambios en su resistencia y estabilidad.



Figura. Tendidos de radar en la zona de estudio
Fuente: Elaboración propia en trabajos de campo.

Los perfiles del georradar, se realizaron en sitios donde en el censo de edificaciones, se habían identificado fracturas y desniveles, lo cual permitió definir la zona de influencia de la fractura (ver Figura 3.41); adicionalmente se identificaron otras fracturas que no se observan aún en la superficie del terreno,

por lo que este método de exploración geofísica fue de gran apoyo para identificar zonas afectadas en el subsuelo a través de anomalías laterales.

En las secciones se identificó la longitud de afectación la cual siempre resultó mayor en el lado del bloque del terreno que cae, como se observa en la Figura 3.41, lo que coincide con los datos de las casas afectadas que se identificaron durante la etapa de censo de edificaciones; el resto de las secciones interpretadas se presenta más adelante.

Al identificar las discontinuidades verticales en los materiales de relleno, las cuales se asociaron con fracturas, se localizaron las zonas donde se está generando el proceso de fracturamiento y que aún no ha tenido repercusiones en superficie, esto permitió reconocer los sitios que potencialmente se verán afectados por el desarrollo de fracturas para determinar las acciones a seguir para mitigar sus efectos.

Este proceso de interpretación fue realizado para cada una de las secciones de radar, por lo que las conclusiones de su interpretación se presentan en la Tabla 3.4 y en las secciones en la Figura 3.42.

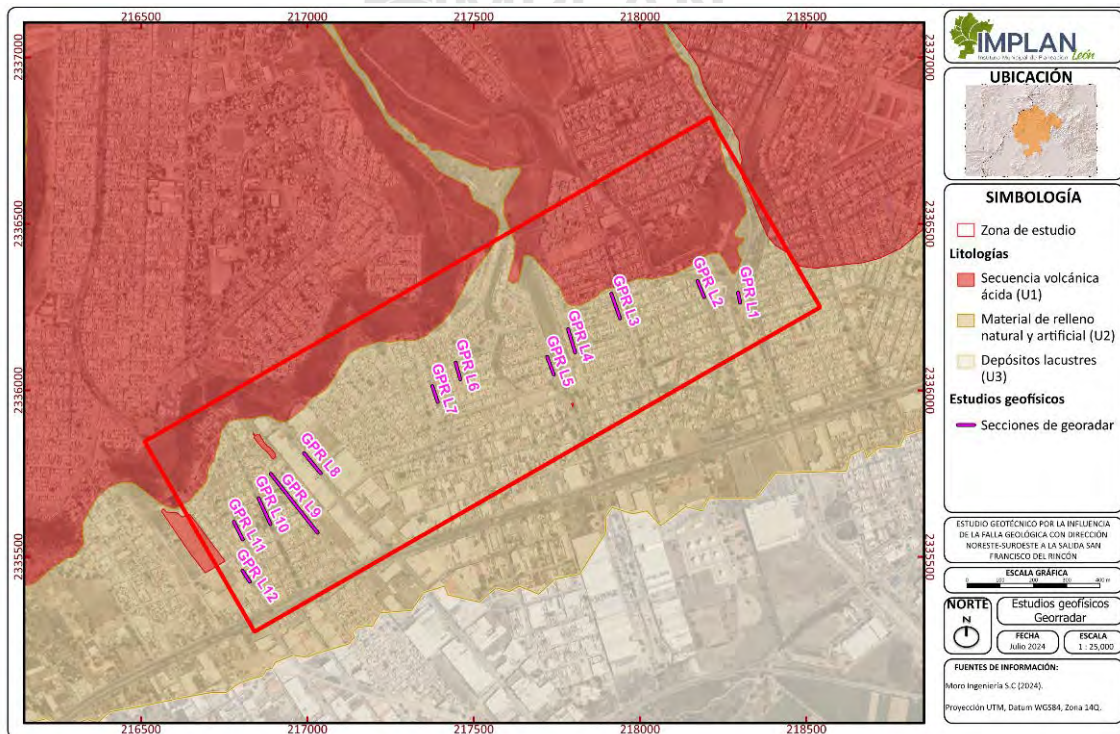


Figura 3.40. Localización de los barridos de georadar

Fuente: Elaboración propia

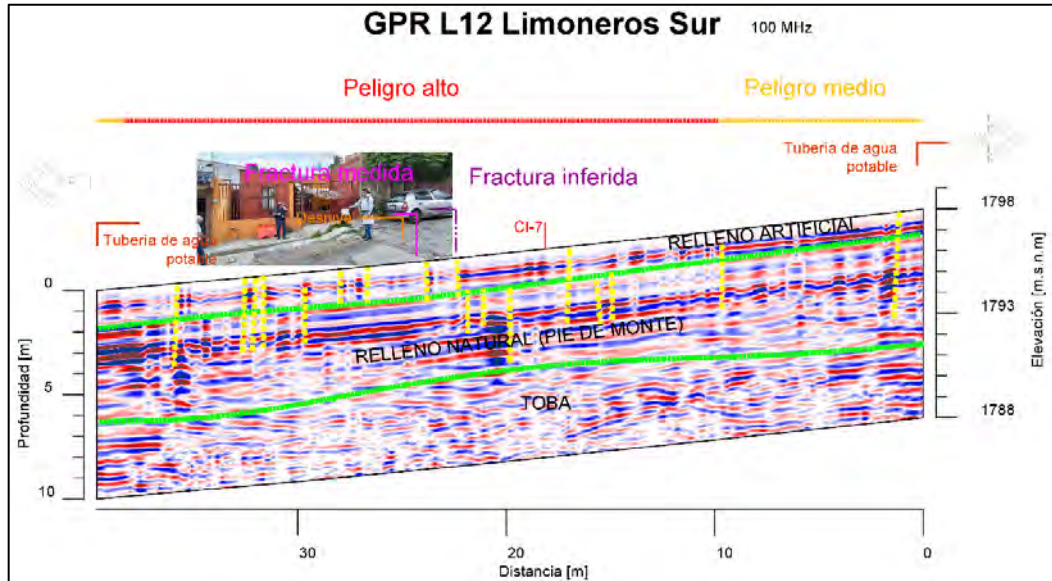


Figura 3.41. Sección de GPR 4 Limoneros Sur (100 MHz)

Fuente: Elaboración propia

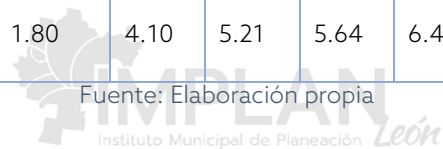
Tabla 3.4. Espesor de los materiales de relleno por sección de GPR

Ubicación	Línea georradar	Espesor relleno artificial (m)		Espesor relleno natural (m)		Profundidad del material estable (m)		Rangos de influencia en la sección (m)		
		de	a	de	a	de	a	de	a	Peligro
Miguel de Cervantes Saavedra	GPR1	1.06	1.51	4.66	5.50	6.17	6.55	0.00	6.00	Medio
								6.00	31.00	Alto
Dr. J. Jesús Rodríguez Gaona	GPR2	0.96	1.15	4.81	4.93	5.82	5.85	0.00	20.00	Medio
								20.00	46.00	Alto
								46.00	52.00	Medio
Condesa de Rocafort	GPR3	0.68	1.20	3.31	3.97	4.52	4.66	10.50	59.50	Medio
								59.50	78.50	Alto
Condesa de Rocafort Oeste	GPR4	0.66	1.13	3.63	3.75	4.66	4.89	0.00	21.00	Medio
								21.00	49.00	Alto
								49.00	56.50	Medio
León II	GPR5	0.85	1.31	3.37	4.17	4.27	5.08	0.0	9.5	Medio
								9.5	35.0	Alto
								35.0	56.5	Medio
San Carlos de Sezze	GPR6	0.96	1.02	3.91	5.02	4.88	6.04	0.0	18.5	Medio
								18.5	46.0	Alto
De los Robles	GPR7	1.04	1.34	3.42	3.88	4.79	4.92	0.0	12.5	Medio
								12.5	36.5	Alto
San Croce	GPR8	0.72	1.07	3.91	4.65	4.61	5.21	0.0	15.5	Alto
								15.5	35.0	Medio

ESTUDIO GEOTÉCNICO POR LA INFLUENCIA DE LA FALLA GEOLÓGICA CON DIRECCIÓN NORESTE-SUROESTE A LA SALIDA SAN FRANCISCO DEL RINCÓN

								35.0	69.0	Alto
								69.0	78.0	Medio
Los Limoneros	GPR9	1.21	1.69	2.64	3.35	4.24	4.57	39.0	50.1	Medio
								50.1	73.4	Alto
								73.4	84.9	Medio
								87.4	99.7	Medio inferido
								99.7	121.7	Alto inferido
								121.7	134.1	Medio inferido
								158.9	178.6	Medio
								178.6	200.6	Alto
								200.6	212.5	Medio
								Eucaliptos	GPR10	0.59
35.0	62.0	Alto								
62.0	76.5	Medio								
Las Cerezas	GPR11	1.08	1.33	4.99	5.31	6.23	6.65	0.0	4.0	Sin riesgo
								4.0	24.0	Medio
								24.0	54.0	Alto
								54.0	59.5	Medio
Los Limoneros sur	GPR12	1.21	1.80	4.10	5.21	5.64	6.40	0	9.82	Medio
								10	38.00	Alto
								38	39.50	Medio

Fuente: Elaboración propia



"Planear el futuro,
pensar el presente"

Tendidos de refracción sísmica

De forma complementaria a lo contratado, Moro Ingeniería realizó dos líneas de refracción sísmica, una en el camellón entre las calles Gobernadores y León II en la colonia Condesa y el segundo en la Calle Limoneros de la Colonia Las Huertas, estos tendidos se realizaron como complemento para asociar los resultados de los barridos del georradar y sísmica, para tener datos que permitieran conocer el ángulo de reposo, información muy útil en zonas que están afectadas por fracturas generadas por el movimiento de una parte del terreno.

Las líneas de refracción sísmica se realizaron a través dos tendidos de 114 m de longitud, con el fin de alcanzar profundidades de investigación del orden de 20 m, suficientes para caracterizar el comportamiento dinámico del subsuelo.

El método sísmico de refracción se basa en la respuesta de los materiales para permitir la transmisión de ondas sísmicas (o elásticas); es un método muy útil para conocer el grado de consolidación que tienen en función de las variaciones de la velocidad con que se propagan las ondas sísmicas y posteriormente correlacionar este parámetro con las condiciones geotécnicas que presentan, como su grado de alteración y compacidad.

En estos tendidos sísmicos se aplicó el método de análisis multicanal de ondas de superficie (MASW, por sus siglas en inglés), el cual utiliza la propagación de ondas de superficie (ondas de Rayleigh) para conocer los parámetros dinámicos del terreno, por medio de los valores de velocidad de onda cortante, sin la necesidad de realizar perforaciones.

El procesamiento, análisis e interpretación de los valores de velocidad obtenidos durante los trabajos de prospección sísmica, dieron como resultado los perfiles geosísmicos que se muestra en la Figura 3.43, cuyos valores de velocidad de onda sísmica se asociaron a los estados de compacidad de los materiales en el subsuelo; como resultado se definieron tres unidades, la más superficial U2 está constituida por materiales de relleno natural y artificial, mal seleccionados con moderado grado de compactación; estos materiales se encuentran sobre la U1b constituida por tobas con grado de compactación medio; entre la U2 y la U1b hay un contraste alto de las velocidades, lo que provoca que se genere una fricción baja en el contacto litológico, generando un proceso lento de deslizamiento en parte por la antigua forma topográfica de la secuencia volcánica; la parte más profunda de la investigación geofísica está representada por la unidad U1a que está constituida por tobas con grado de compactación alto, que están intercaladas con tobas soldadas (ignimbritas) con grado de consolidación muy alto.

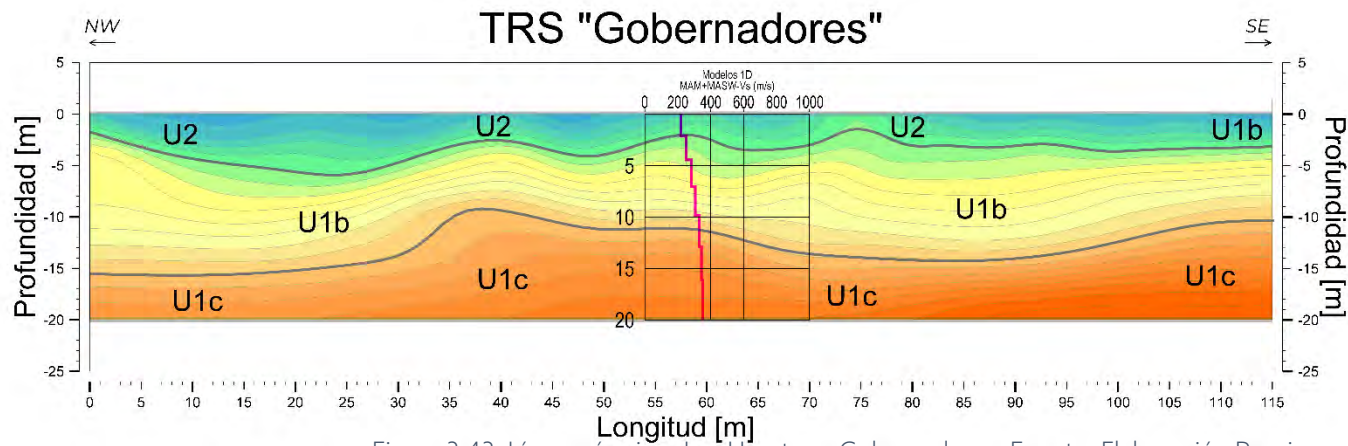
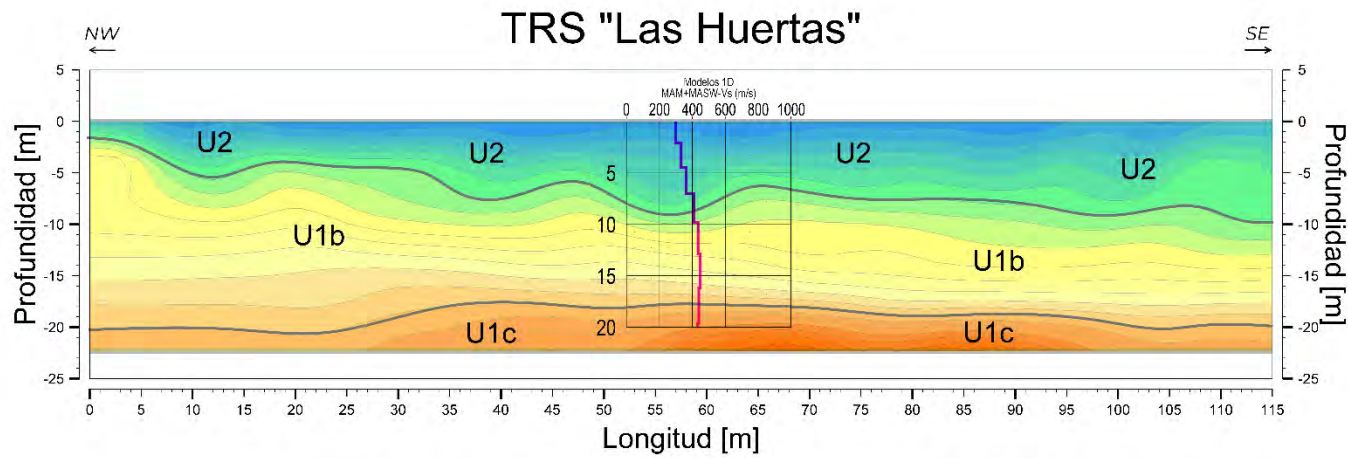


Figura 3.43. Líneas sísmicas Las Huertas y Gobernadores. Fuente: Elaboración Propia

Instituto Municipal de Planeación León | AYUNTAMIENTO 2021-2024

UBICACIÓN

SIMBOLOGÍA

Velocidad de onda P (Vp)
[m/s]

Contacto litológico

Unidad	Medios de onda (Velocidad)	Medios de onda (Densidad)	Descripción
U2	900 - 1000	2100 - 2400	Material de origen volcánico con gran contenido de cenizas y fragmentos de lavas.
U1b	1200 - 1800	2100 - 2400	Material de origen volcánico con gran contenido de cenizas y fragmentos de lavas.
U1c	1800 - 2300	2400 - 2700	Material de origen volcánico con gran contenido de cenizas y fragmentos de lavas.

ESTUDIO GEOTÉCNICO POR LA INFLUENCIA DE LA FALLA GEOLÓGICA CON DIRECCIÓN NORESTE-SUROESTE A LA SALIDA SAN FRANCISCO DEL RINCÓN

ESCALA GRÁFICA

NORTE

Secciones geosísmicas

FECHA: Julio 2024

ESCALA: 1:5

FUENTES DE INFORMACIÓN
Metrópoli ena S.C.

Correlación de velocidades de onda sísmicas y ángulo de fricción de reposo

Para determinar la zonas de afectación cercanas a las fracturas, se consideró que el material de relleno ya sea de pie de monte o artificial seguirá erosionándose hasta alcanzar la estabilidad, es decir, hasta llegar a su ángulo de reposo (ver Figura 3.44); este ángulo de reposo se estimó basándose en los datos de la interpretación del estudio geofísico y en las correlaciones entre velocidades de onda sísmica y ángulo de reposo para determinar esta longitud de influencia, que se abordarán más adelante.

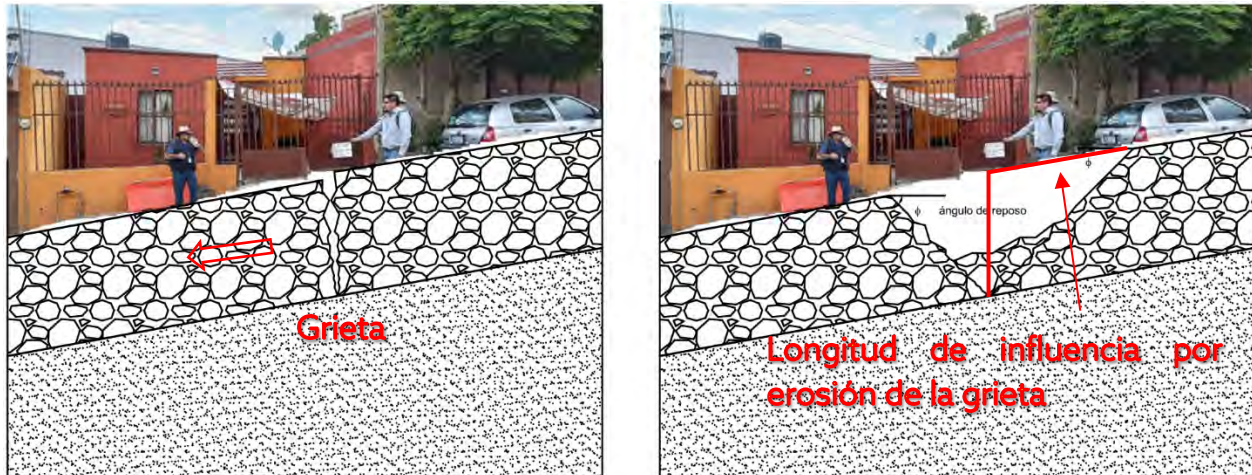


Figura 3.44. Esquema de la evolución de la erosión en las paredes de una grieta hasta alcanzar el ángulo de reposo.

Fuente: Elaboración propia.
"Planear el futuro,
pensar el presente."

A continuación, se describe la forma en que se determinó el ángulo de reposo:

Ángulo de reposo

El ángulo de fricción interna o ángulo de reposo, es el ángulo formado entre la horizontal y la máxima pendiente del material sin que presente deslizamiento, como se muestra en la Figura 3.45; este ángulo solo depende de las características de los materiales granulares, sin que se consideren cambios en la cohesión provocados por otros factores como la humedad o sobrecarga.

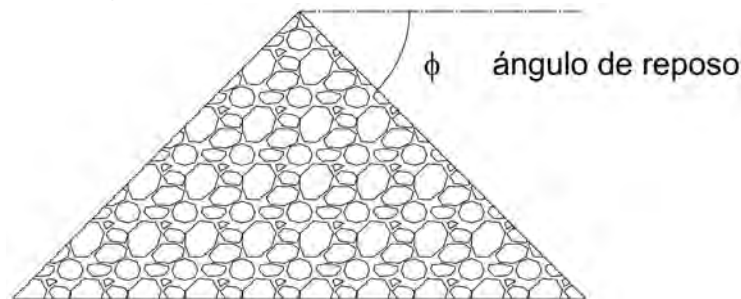


Figura 3.45. Esquema del ángulo de reposo.
Fuente: Elaboración propia.

Correlaciones de velocidades de onda y ángulo de reposo

Álvarez-Manilla et al. (2003) estableció una correlación entre la relación las velocidades V_p/V_s y el ángulo de fricción interna (ϕ) de los materiales geológicos, esta correlación indica que las propiedades mecánicas de los materiales, como su resistencia y estabilidad, pueden inferirse a partir de las velocidades de propagación de las ondas de compresión (V_p) y las ondas de corte (V_s). En la Figura 3.46 se muestra la correlación que se obtiene para suelos limosos de alta plasticidad (MH). Aristizábal & Mendoza (2017) llega a los mismos resultados que Álvarez-Manilla, estableciendo la Ecuación 3.1.

$$\phi = 50.866 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^{-1.35}$$

Ecuación 3.1. Correlación entre el ángulo de fricción y la relación de velocidades de onda.

Fuente: Aristizábal & Mendoza (2017)

Donde:

ϕ : Ángulo de reposo

V_p : Velocidad de compresión

V_s : Velocidad de cortante

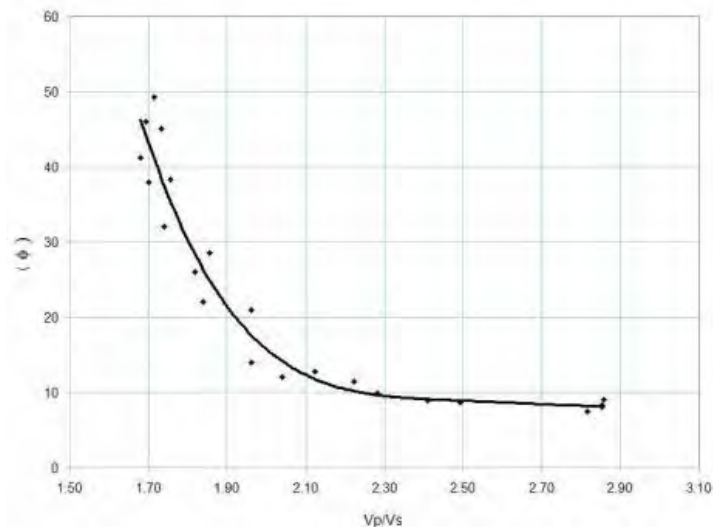


Figura 3.46. Correlación de la relación V_p/V_s y ángulo de fricción ϕ en suelos del tipo MH.

Fuente: Álvarez-Manilla et al. (2003)

Otros estudios, como el de Gómez y Tobón (2017), también realizan correlaciones estadísticas de las velocidades onda de compresión (V_p) y de corte (V_s) con el ángulo de fricción (ϕ).

Para tener un estimado de valores en el municipio de León, se utilizaron los datos de velocidades de onda de compresión (V_p), de corte (V_s) y de ángulo de fricción presentados en el Atlas de Riesgo para el Municipio de León, Guanajuato (2010), para cinco capas de material, como se observa en la Figura 3.47; en este trabajo

se estableció una correlación entre la relación V_p/V_s y el ángulo de fricción interna (ϕ), obteniendo la Figura 3.48 y Ecuación 3.2.

SASW capa	V_p m/s	V_s m/s	v	γ_m kN/m ³	E kN/m ²	G kN/m ²	h_i m	T_i seg	ϕ
1	1120	561	0.333	16.40	13755589	5161424	16.4	0.117	22.12
2	1285	691	0.297	16.70	20677989	7973933	6.2	0.036	22.00
3	2321	1272	0.285	17.21	71582972	27845505	9.4	0.030	29.16
4	2475	2010	0.249	18.50	186646854	74741850	12.8	0.025	32.70
5	2480	2132	0.200	19.25	209924120	87499412		0.024	39.72
								$\Sigma T_i =$	0.256

Figura 3.47. Datos de velocidades de onda de compresión (V_p), de corte (V_s) y ángulo de fricción (ϕ). Fuente: Atlas de Riegos para el Municipio de León, Guanajuato, tomo I, documento síntesis. IMPLAN.2010.

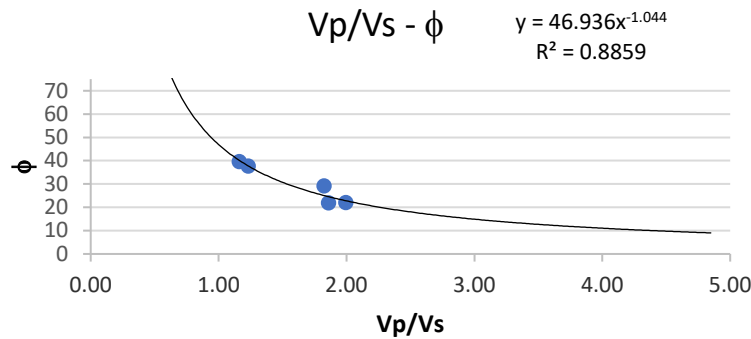


Figura 3.48. Correlación de la relación V_p/V_s y ángulo de fricción ϕ . Fuente: Elaboración propia.

$$\phi = 46.936 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^{-1.044}$$

Ecuación 3.2. Correlación entre el ángulo de fricción y la relación de velocidades de onda, datos IMPLAN 2010.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

ϕ : Ángulo de reposo

V_p : Velocidad de compresión

V_s : Velocidad de cortante

Ángulo de reposo

Con los resultados del estudio de refracción sísmica y el análisis multicanal de ondas de superficie (MASW), se determinaron los valores de la onda de compresión (V_p) y de la onda de cortante (V_s) de los materiales de relleno en las líneas sísmicas Gobernadores y Las Huertas (Figura 3.43).

Para la línea sísmica Gobernadores, se obtuvo una V_p de 1,052.5 m/s y una V_s de 241.5 m/s. En la línea sísmica Las Huertas, la V_p fue de 662.5 m/s y la V_s de 337 m/s, por lo tanto, el ángulo de reposo, calculado mediante la Ecuación 3.2, para el material de relleno en Gobernadores es de 10° , mientras que para el material de relleno en Las Huertas es de 23° .

Cabe señalar que los ángulos de reposo citados no toman en cuenta los valores de cohesión que tienen los materiales de la zona de estudio en diversas áreas. Las clasificaciones de suelos que se describen corresponden a suelos de comportamiento cohesivo-friccionante que pueden ser diferentes a los sitios en donde se efectuaron los tendidos de refracción sísmica; por lo tanto, los rangos de influencia que se indican en la Tabla 3.4 y en la Tabla 3.6 son valores que se deben considerar como aproximados.

3.4. Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico, consistió en tomar mediciones de elevación en diferentes puntos en la zona de estudio, para determinar las coordenadas UTM de los puntos seleccionados y la variación en la elevación del terreno; para esto se construyeron 12 mojонерas en sitios estratégicos que permitan monitorear los cambios en el terreno, en la siguiente tabla se muestra las coordenadas, elevación obtenida y objetivos de monitoreo.

La nivelación topográfica fue realizada con el equipo GNSS Promark 3, cuya tecnología habilita las señales de corrección para el sistema WASS (Sistema de Aumento de Área Amplia) y EGNOS (Sistema Europeo de Superposición de Navegación Geoestacionaria) WASS / EGNOS, con un rastreo promedio de 8 a 10 satélites; en los días en que se efectuaron los trabajos de campo se tuvo un porcentaje de nubosidad del 20% al 70%; en la siguiente tabla se presentan los resultados de la nivelación, en la Figura 3.49 se muestra la distribución de los sitios nivelados.

Para ligar toda la información espacial al elipsoide y datum geodésico WGS84, se llevó a cabo durante los días 7 y 8 de Julio de 2024 la nivelación topográfica de las mojонерas, así como el banco de nivel de INEGI con denominación BN-V11272R.

Tabla 3.5. Coordenadas y elevación de los sitios nivelados

Clave	Coordenadas UTM	Objetivo
-------	-----------------	----------

ESTUDIO GEOTÉCNICO POR LA INFLUENCIA DE LA FALLA GEOLÓGICA CON DIRECCIÓN NORESTE-SUROESTE A LA SALIDA SAN FRANCISCO DEL RINCÓN

Cons		WGS-84		Elevación (msnm)	
		Este	Norte		
1	V11272R	218,915.190	2,336,024.194	1,786.793	Referencia de la elevación
2	NT-01	216,825.473	2,335,868.330	1,820.394	Sobre materiales estables que no tendrán movimientos
3	NT-02	216,930.102	2,335,684.813	1,804.181	Dar seguimiento a la zona de la escuela primaria en Las Huertas
4	NT-03	216,848.757	2,335,583.091	1,804.179	Dar seguimiento a la zona de la iglesia en Las Huertas
5	NT-04	217,402.249	2,335,873.119	1,798.436	Dar seguimiento al bloque inferior de la fractura
6	NT-05	217,543.112	2,336,163.107	1,805.826	Dar seguimiento al bloque superior de la fractura
7	NT-06	217,334.404	2,335,931.994	1,802.386	Dar seguimiento al bloque superior de la fractura
8	NT-07	216,641.266	2,335,271.871	1,793.303	Dar seguimiento al bloque superior de la fractura
9	NT-08	217,804.500	2,336,068.358	1,800.623	Dar seguimiento al bloque inferior de la fractura
10	NT-09	217,680.607	2,336,406.043	1,833.234	Sobre materiales estables que no tendrán movimientos
11	NT-10	217,872.158	2,336,223.840	1,809.045	Dar seguimiento al bloque superior de la fractura
12	NT-11	218,096.073	2,336,049.438	1,793.824	Detectar la existencia del movimiento
13	NT-12	218,465.177	2,336,267.077	1,796.412	Dar seguimiento al bloque inferior de la fractura

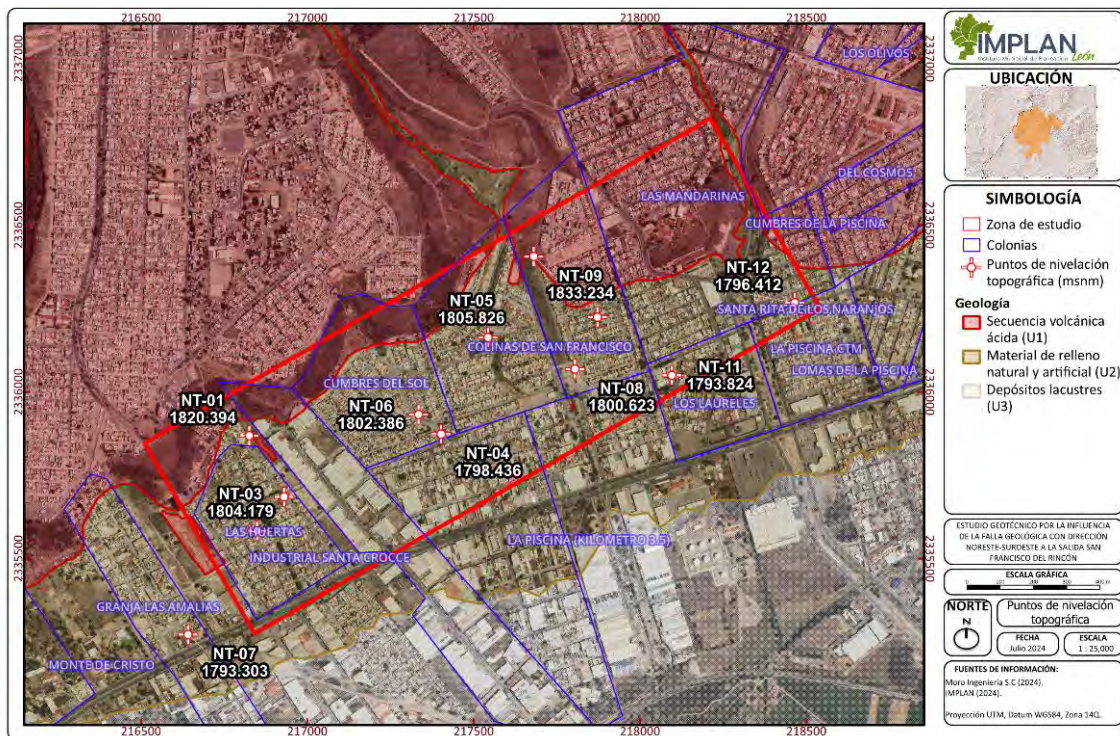


Figura 3.49. Distribución de los sitios nivelados
Fuente: Elaboración propia.

Las nivelaciones se establecieron en puntos que permitirán dar seguimiento a los cambios en el terreno en sitios donde los movimientos se están dando, con lo cual se establecerá la tasa cambio; de igual forma serán útiles para establecer las

variaciones que se tengan cuando se implementen las acciones que permitan aminorar el proceso.

El monitoreo no solo se debe realizar considerando cambios de elevación, ya que como se comentó en capítulos anteriores, hay evidencias de desplazamiento del terreno, por lo que es necesario determinar las variaciones en sentido horizontal para identificar el vector de movimiento de este fenómeno y realizar actividades en este sentido para su mitigación.

Para continuar con el seguimiento en las siguientes mediciones para conocer la evolución que tienen las grietas, se debe utilizar un método topográfico similar, con objeto de que puedan ser comparables.

3.5. Modelo geológico e hidrogeológico de la zona de estudio

Con base en los resultados del trabajo de campo, en los puntos de verificación geológica, los resultados de las perforaciones realizadas en 2020 y los estudios de geofísica desarrollados en este estudio (georradar, TEM y sísmica MASW), se delimitaron tres unidades en la zona de estudio.

La primera unidad, que es la más antigua, es una secuencia volcánica ácida constituida por tobas e ignimbritas (tobas soldadas); esta unidad fue afectada por fallamiento geológico regional, generando un conjunto de bloques altos y bajos; cabe mencionar que estas fallas están inactivas y no están relacionadas con los procesos que están afectando a las estructuras en la zona de estudio.

La mayor área de afloramiento de esta unidad está en la Mesa Cuatralba, ubicada al norte de la zona; esta secuencia volcánica fue cubierta por la segunda unidad, constituida por material de relleno natural (pie de monte) y artificial (depositado por el hombre).

Hacia el sureste, en el pasado geológico se formaron lagos donde se depositó la tercera unidad, conformada por materiales lacustres intercalados con productos volcánicos; el contacto lateral entre los sedimentos de pie de monte y los lacustres es irregular formando una intercalación.

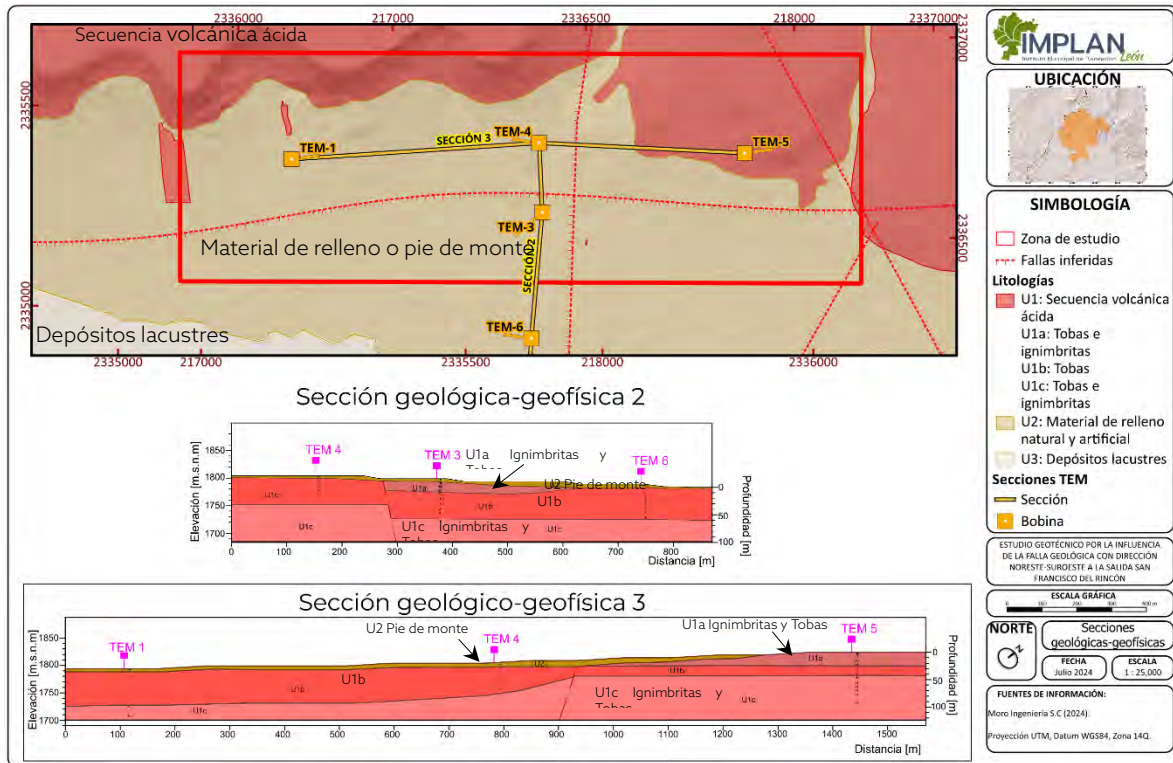


Figura 3.50. Distribución de las unidades; en la parte superior de la figura se muestran en planta y en la parte inferior su arreglo vertical.

Fuente: Elaboración propia.

La secuencia volcánica ácida contiene una toba formada por fragmentos que varían en tamaño de limos hasta arenas finas y gruesas, con algunos fragmentos de roca, todos contenidos en una matriz muy fina de vidrio volcánico; de acuerdo a los resultados de los TEM's tiene un espesor del orden de 60 metros; esta roca, debido a su moderado a alto grado de compactación, permite que se formen paredes verticales, estables; por sus características físicas esta unidad no es compresible y no permite el paso del agua. En las zonas más altas, las tobas están intercaladas con ignimbritas que son rocas muy duras, similares en consistencia a las lavas, por esta razón son totalmente estables y su espesor no puede variar por procesos de compresión.

El pie de monte, que cubre a la secuencia volcánica, está compuesto por materiales de tamaño variable, desde arenas medias hasta bloques mayores de 25 cm, cuyo origen es la erosión de las ignimbritas y las tobas que están en una posición topográfica más alta. Este material está depositado en las laderas de los cerros y las mesetas; de acuerdo con los perfiles de georradar y la sección sísmica MASW, su espesor varía de 2.5 a 6.3 metros, como se muestra en la Figura 3.51 y la Figura 3.52. Su grado de compactación es moderado y permite el paso del agua a través de sus poros y grietas. Sobre los sedimentos de pie de monte y como

resultado del desarrollo urbano, se han acumulado capas de material con objeto de rellenar y nivelar el terreno.

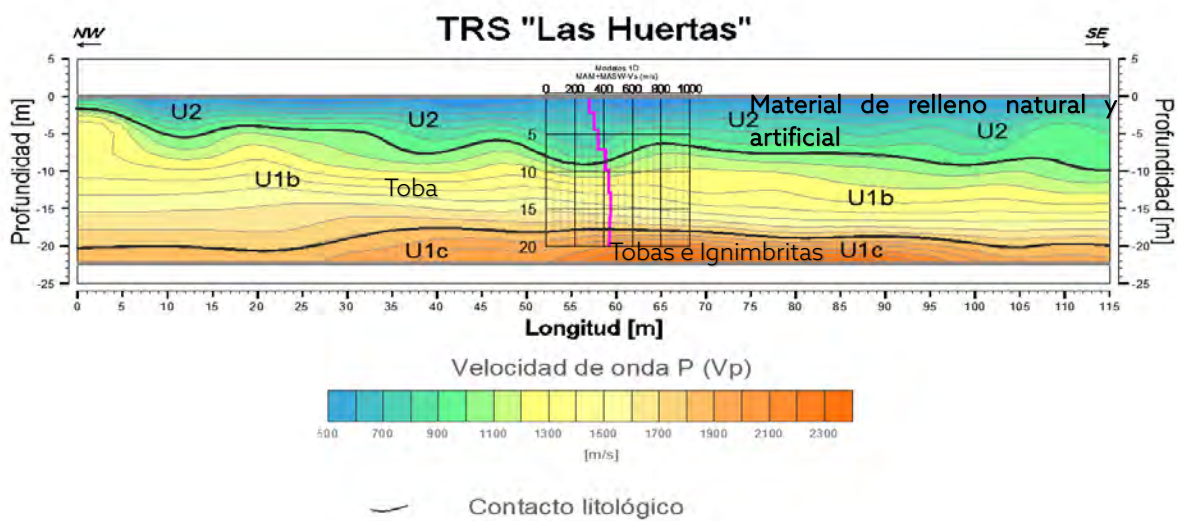


Figura 3.51. Sección sísmica que muestra el contacto entre las unidades de tobas, ignimbritas y el material de relleno natural (pie de monte) y artificial.

Fuente: Elaboración propia.

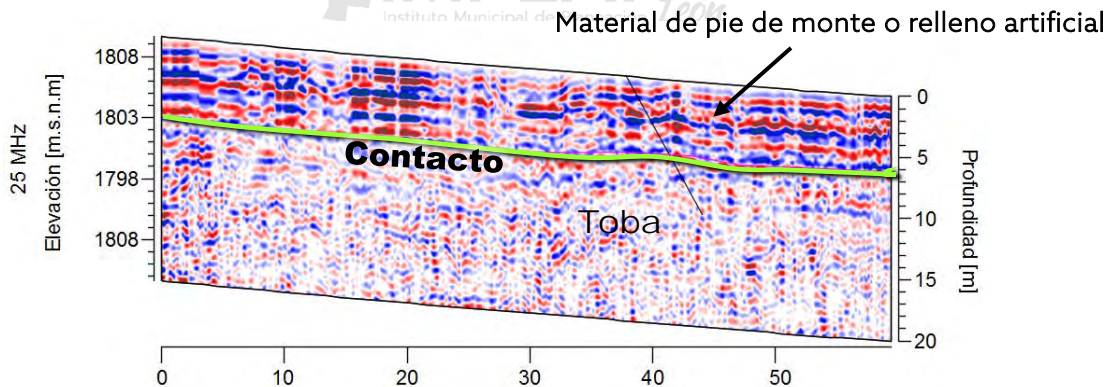


Figura 3.52. Sección de georradar, arreglo entre la secuencia volcánica y el pie de monte o de relleno artificial.

Fuente: Elaboración propia.

Dentro del área de estudio, hasta la profundidad de exploración de la geofísica y los sondeos geotécnicos realizados en 2020, los materiales estuvieron secos, no constituyen acuíferos, por lo que la subsidencia relacionada con la sobreexplotación del acuífero, formado por la intercalación de materiales lacustres y volcánicos, que está fuera del área de estudio, aunque no se presenta en la zona, si afectó al equilibrio que había en el contacto entre los sedimentos de pie de monte y los materiales lacustres, provocando la desestabilización y reacomodo de los sedimentos de pie de monte.

Esta zona, al estar en una ladera con una pendiente suave a media (entre 3° a 12°), y sufrir pérdida de soporte en la base por los efectos de consolidación del acuífero, provocó que los sedimentos de pie de monte sufrieran reacomodos, generando grietas de tensión por las que penetró el agua pluvial llegando hasta el contacto con la toba impermeable; esta agua actuó como lubricante, provocando deslizamientos de ladera, hundimiento y el nuevo reacomodo del material del pie de monte, incrementando la cantidad de grietas (ver Figura 3.53); este reacomodo es irregular y hace que la expresión en superficie de la fractura no sea continua, cambie de dirección y en ocasiones desaparezca (ver Figura 3.54).

En las fracturas se genera un proceso de migración de partículas finas, dejando solo las partículas gruesas que sufren un reacomodo para cubrir estos espacios vacíos, lo que también provoca hundimientos y fracturas localizadas por donde pasó el agua, este proceso es conocido como sofusión.

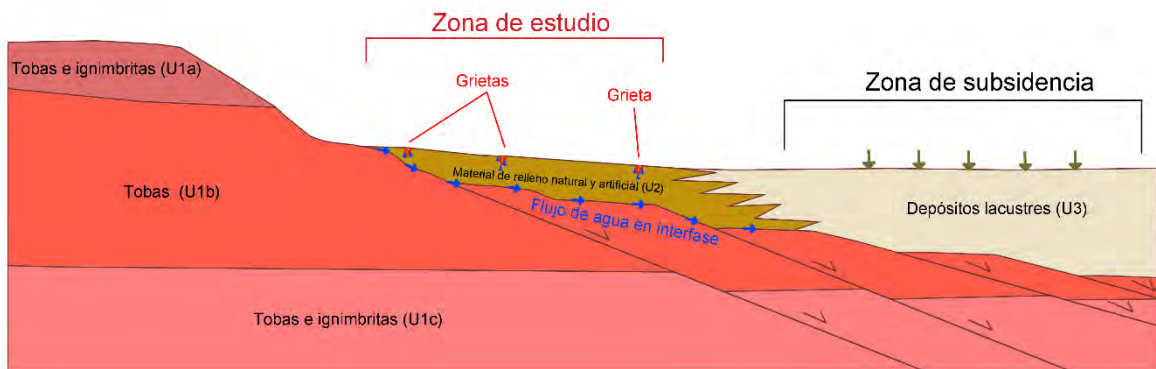


Figura 3.53. Sección esquemática del proceso de agrietamiento en la zona de estudio. Las flechas en color azul muestran la zona por donde se presenta el flujo de agua en interfase.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la traza de la fractura en zonas donde desaparece, se utilizaron las mediciones estructurales que se realizaron en campo para inferir los sitios por donde pueden continuar; esto fue confirmado a través de la interferometría para el mes de abril de 2024, en donde se observó que tanto las fracturas identificadas como las inferidas coinciden en zonas donde la interferometría mostró cambios en la tasa de velocidad de movimiento del terreno (Figura 3.54); en esta figura se observa que el mayor desplazamiento está hacia el sur en donde se localizan los sedimentos lacustres.

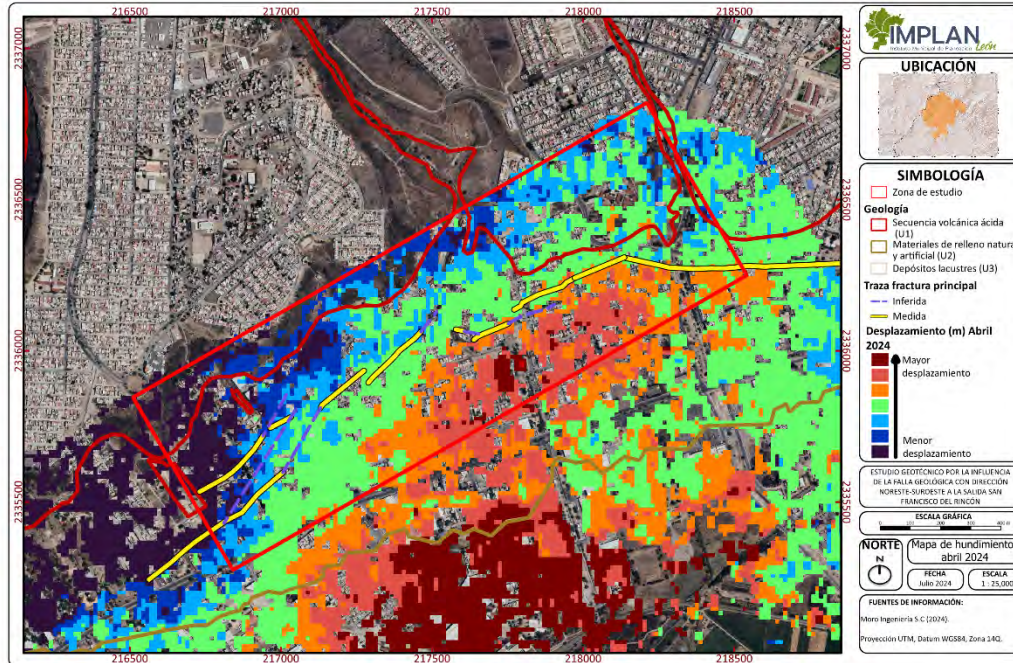


Figura 3.54. Trazas del fracturamiento en la zona de estudio y zonas colindantes.
Fuente: Elaboración propia.

Este agrietamiento provocó que entre las edificaciones colindantes hubiera un reacomodo (inclinación de una sobre otra); adicionalmente el asentamiento del terreno causó la rotura de la red de agua potable y de drenaje, con lo cual se aceleraron los deslizamientos de ladera al incrementarse el contenido de humedad en los materiales poco cohesivos. **Este fenómeno de agrietamiento provocado por pérdida de estabilidad de los materiales de la superficie no tiene relación con las estructuras geológicas profundas;** por las dimensiones y extensión de los materiales en que se está presentado este proceso, es difícil detenerlo, sin embargo, se puede atenuar su velocidad de desplazamiento.

Debido a que en las exploraciones directas e indirectas, no se han observado materiales saturados, los pozos existentes hacia el sur y fuera de la zona de estudio (solo un pozo estuvo en su límite sur), de acuerdo con la profundidad de la bomba, del nivel estático y su comparación con las secciones de geofísica y las observaciones de campo, permiten concluir que el agua proviene de un acuífero profundo de tipo semiconfinado a confinado y las variaciones de su nivel piezométrico van a seguir produciendo asentamiento por la consolidación de los sedimentos arcillosos, así como una desestabilización continua en su contacto con los sedimentos de pie de monte.

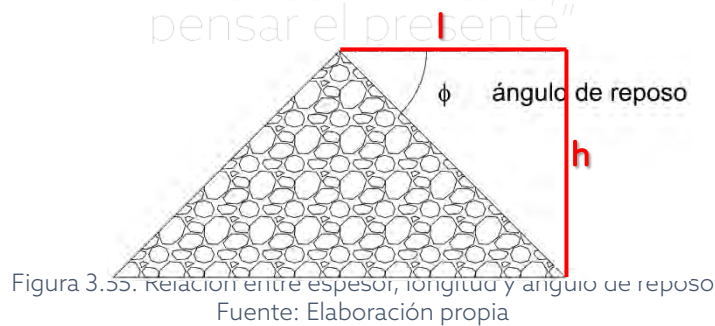
Delimitación de la zona de influencia del fracturamiento

Debido a que el proceso de fracturamiento de los materiales en el subsuelo es multifactorial, no se puede decir que su origen solo está relacionado con algo en particular, ya que existen muchas variables las que intervienen para que inicie el desequilibrio mecánico del medio geológico; por lo antes expuesto se consideró toda la información disponible, de esta una de las más importantes fue el censo de afectaciones a las edificaciones, en especial las observaciones del número de casas afectadas alrededor de la fractura, cuando fue posible identificarlo.

Para determinar la zona de edificaciones afectadas por la inestabilidad de los materiales al producirse la fractura, se consideraron las observaciones citadas, los resultados de georradar y la interpretación sobre la compactación que se obtuvo con la sísmica; de esta manera se determinó que los materiales fracturados, que están relacionados con el movimiento de masas, son los de relleno natural (pie de monte) y artificial; para definir la zona inestable se consideró el espesor de estos materiales y la propiedad mecánica del ángulo de reposo, que se obtuvo con las secciones sísmicas; este ángulo varió entre 10° en la sección de Gobernadores, mientras para la sección de Las Huertas fue de 23°.

Longitud de influencia de la fractura

Para calcular de la longitud de influencia de la grieta (Figura 3.55), se utilizó la Ecuación 3.3:



$$l = \frac{h}{\tan(\phi)}$$

Ecuación 3.3. Longitud de influencia de la grieta basada en el ángulo de reposo.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

ϕ : Ángulo de reposo

l: Longitud de influencia

h: Espesor de la capa

Para realizar el cálculo de la longitud de influencia de la fractura, se utilizó el espesor promedio en cada línea de georradar y los ángulos de reposo calculados

con la información de los tendidos sísmicos, para determinar la longitud de influencia de la fractura se utilizó la Ecuación 3.3, resultando una longitud de influencia para cada línea de georradar, como se muestra en la *Tabla 3.6*.

Tabla 3.6. Longitud de influencia de la grieta con base a su espesor

Ubicación	Línea georradar	Espesor promedio de material de relleno (m)	Longitud de influencia (m) con un ángulo de 10°	Longitud de influencia (m) con un ángulo de 23°
Miguel de Cervantes Saavedra	GPR1	5.5	31.19	12.96
Dr. J. Jesús Rodríguez Gaona	GPR2	5.73	32.50	13.50
Condesa de Rocafort	GPR3	4.3	24.39	10.13
Condesa de Rocafort	GPR4	4.65	26.37	10.95
León II	GPR5	5.13	29.09	12.09
San Carlos de Sezze	GPR6	5.58	31.65	13.15
De los Robles	GPR7	4.81	27.28	11.33
San Croce	GPR8	5.45	30.91	12.84
Los Limoneros	GPR9	4.50	25.52	10.60
Eucaliptos	GPR10	4.60	26.09	10.84
Las Cerezas	GPR11	6.28	35.62	14.79
Los Limoneros sur	GPR12	6.1	34.59	14.37

Fuente: Elaboración propia.

La longitud de afectación calculada, se asoció con las fracturas identificadas en el subsuelo con los resultados del georradar, que aún no tienen expresión en superficie, y se observó la concordancia con lo calculado a través de relaciones matemáticas, esto permitió extrapolar la zona de afectación en sitios donde solo se observó el daño en una casa o fracturas en el pavimento y con esto se determinó la susceptibilidad del peligro a las edificaciones por efectos del fracturamiento, con esta longitud de influencia, se estableció la zona de riesgo a lo largo de la fractura.

Para determinar la susceptibilidad al peligro para que las edificaciones e infraestructura se vean dañadas, se definieron cuatro zonas que a continuación se describen y se representan en la Figura 3.56.

Zona de peligro alto con evidencias en superficie

En esta zona el subsuelo está constituido por una capa de materiales de relleno natural y artificial (pie de monte y relleno antropogénico); hay fracturas visibles en superficie que permitieron identificar la traza del fracturamiento; para determinar la afectación con este peligro se utilizó un ángulo de reposo aproximado de 23° (afecta a una menor área); el subsuelo en esta zona se encuentra altamente fracturado.

Las afectaciones en edificaciones son variadas, además se presentan desniveles en calles; en esta zona por sus condiciones de fracturamiento expuesto en la superficie, se facilita el movimiento del agua a través de las fracturas lo que favorece el movimiento del terreno.

Zona de peligro alto inferido con base en los resultados de geofísica

En esta zona el subsuelo está constituido por una capa de materiales de relleno natural y artificial (pie de monte y relleno antropogénico), el subsuelo se encuentra altamente fracturado, esta zona coincide con la proyección de la continuidad de las fracturas observadas, sin embargo, no llegan a la superficie; para determinar la afectación con este peligro se utilizó un ángulo aproximado de reposo de los materiales de relleno de 23° (afecta a una menor área). En esta zona es muy conveniente confirmar con más secciones de georradar y con perforaciones exploratorias.

Zona de peligro medio

En esta zona el subsuelo está constituido por una capa de materiales de relleno natural y artificial (pie de monte y relleno antropogénico), los cuales tienen fracturamiento medio a bajo, que no llegan a la superficie, pero que fue identificado a través de los resultados de la exploración geofísica; para determinar la zona de afectación con este peligro se utilizó un ángulo de reposo de los materiales de relleno de entre 10° y 23° (afecta a una mayor área); esta zona es continua a lo largo de donde se observó fracturamiento; en este caso es también conveniente confirmar con más secciones de georradar y con perforaciones exploratorias.

En la colonia Colinas de San Francisco se extendió esta área debido a las evidencias en el fracturamiento de la calle, de forma paralela al arroyo y debido a que el mamposteado que lo encausa se está venciendo, lo que provoca inestabilidad pendiente arriba.

Zona de peligro medio inferido con base en los resultados de geofísica

En esta zona el subsuelo está constituido por una capa de materiales de relleno natural y artificial (pie de monte y relleno antropogénico), los cuales se encuentran con fracturamiento bajo a nulo; las pocas fracturas observadas no llegan a la superficie y solo se identificaron a través de la exploración geofísica; para determinar la zona de afectación con este peligro se utilizó un ángulo de reposo de los materiales de relleno entre 10° y 23° (afecta a una mayor área); esta se infirieron a través de la geofísica. Como en los casos anteriores sería

conveniente confirmar con más secciones de georradar y con perforaciones exploratorias, pero después de haber dado prioridad a las antes expuestas.



"Planear el futuro,
pensar el presente"

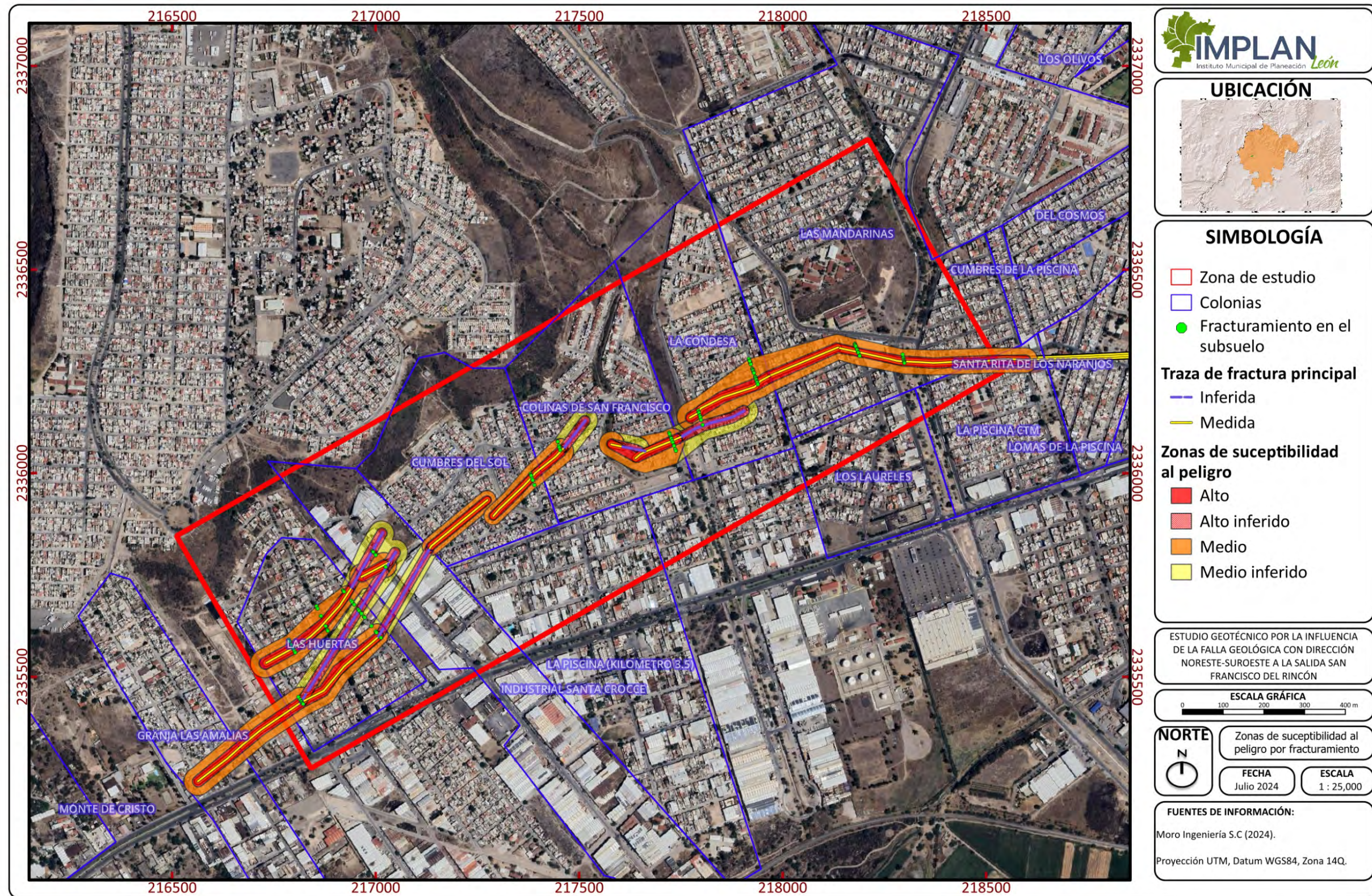


Figura 3.56. Mapa susceptibilidad al peligro por fracturamiento. Fuente. Elaboración propia.

4. Propuestas de mitigación y adaptación para la zona afectada

De acuerdo con el análisis realizado y el modelo geológico asociado con el proceso de agrietamiento, hundimiento y deslizamiento, se concluyó que no puede detenerse debido a la pendiente que tienen los materiales estables (tobas), así como a la sobre carga que fue impuesta sobre los materiales de relleno, ya sean naturales o dispuestos por el ser humano; como se puede ver en la Figura 3.56 , las dimensiones de las zonas donde se presenta la inestabilidad, son de magnitudes amplias, casi continuas, lo cual involucra a una gran masa de terreno, cuya inercia provoca que su desplazamiento continúe, sin embargo se ha visto incrementado por la infiltración del agua, a través de las grietas llegando este fluido hasta el contacto entre la toba y el material de relleno.

Con esta base de partida, se emiten una serie de recomendaciones para retardar o disminuir la afectación a las edificaciones, y atenuar el avance del proceso; estas recomendaciones de mitigación fueron divididas en función de sus dimensiones, las primeras son de amplia extensión, es decir a escala de colonia y las segundas están enfocadas a las edificaciones.

Cabe mencionar que los daños en las edificaciones, está estrechamente relacionados con la orientación de las grietas y la posición relativa de los inmuebles respecto a estas; otro factor que fue determinante fue el grado de afectación a las construcciones con respecto a la calidad de los materiales con que fueron construidas y la distribución de las estructuras que dan soporte al inmueble, en este último caso las obras de mitigación deberán ser establecidas por un especialista en geotecnia, cimentaciones y diseño de estructuras.

Propuestas de mitigación a escala de colonias

Estas propuestas están encaminadas a disminuir la velocidad del proceso de fracturamiento, por lo que son de vital importancia para aminorar las afectaciones en las edificaciones, y son las acciones que en primera instancia se deben realizar, para las cuales es necesario la intervención de quienes están relacionados con la distribución y manejo del agua, así como los vinculados con las obras públicas en el municipio de León; a continuación, se describen los objetivos y las acciones a realizar:

Disminución del agua que produce humedad en el subsuelo

Las propuestas están encaminadas a reducir al máximo el ingreso del agua desde la superficie del terreno, así como desde el subsuelo (fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado), con objeto de que este fluido no ingrese al subsuelo e incremente el grado de humedad en los materiales,

aumente su peso e inclusive pueda llegar hasta el contacto entre la toba y los materiales de relleno; esto último sería un hecho que incrementaría el deslizamiento de la parte superior del terreno.

- Es necesario revisar las redes de distribución de agua potable y drenaje, considerando que el movimiento del terreno continuará, produciendo daños en las propias redes y en las edificaciones; en estos casos una alternativa de solución en las zonas afectadas y mostradas en la Figura 3.56, consiste en cambiar el material de las redes por otra tubería mucho más flexible, no solo en la zona donde se presentan las grietas, sino también en las marcadas con un grado de peligro medio; cabe mencionar que antes sería conveniente incrementar el detalle de la figura citada con trabajos complementarios de geofísica; al respecto, se consultó con diferentes fabricantes y existen tuberías que pueden deformarse hasta un 25% de su dimensión original; este cambio tendría por objetivo reducir las fugas y tener una mayor vida útil; adicionalmente es necesario llevar un control detallado de la variación de las presiones a ambos lados de las zonas afectadas. Un ejemplo de este tipo de tuberías es el polietileno de alta densidad; este material ya ha sido utilizado en otras ciudades con problemas similares, como: Aguascalientes y la Ciudad de México, entre otras.
- Para las calles, en vialidades, se recomienda instalar "cajas disipadoras de deformaciones unitarias" (ver Figura 4.1). Esta solución consiste en realizar una excavación de sección trapezoidal con taludes de 45° de inclinación, ubicando la línea de la grieta al centro de la zanja, posteriormente la zanja se rellena con un material granular con menos del 5% de finos y con coeficiente de uniformidad $C_u = 2.5$; al final se puede colocar carpeta asfáltica sobre el relleno de grava o tezontle. Cuando la grieta se desplaza se genera un escalón, el relleno se reacomoda y en la superficie se genera una transición con una pendiente suave, lo cual es más adecuado para la circulación vehicular en las vialidades.

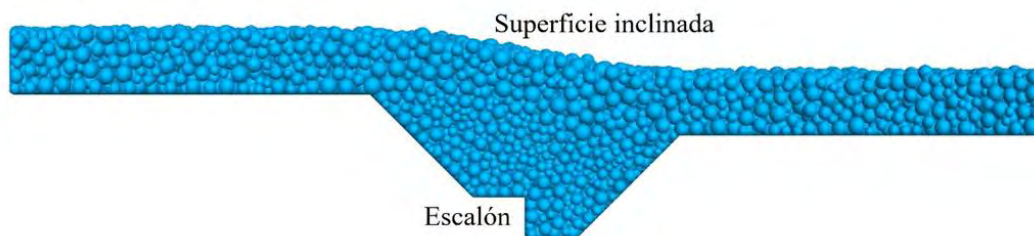


Figura 4.1. Caja disipadora de deformaciones unitarias
Tomado de: Sánchez Guzmán & Auvinet Guichard (2021a)

- En el caso de la colonia Las Huertas, es necesario revestir el vaso de la estructura para control de avenidas, ya que, si bien en el fondo del vaso hay materiales de muy baja permeabilidad, el contacto entre estos con el suelo o el pie de monte es muy permeable y es una zona por donde el agua puede fluir fácilmente. Adicionalmente, en época de lluvias extraordinarias, se debe evitar que el agua que sale por el vertedor de demasías llegue a la calle, ya que al estar en contacto en la zona adoquinada fácilmente se produce la infiltración del agua y se alteran las condiciones originales del material en el subsuelo. El revestimiento puede ser muy sencillo; se podría colocar una cama de suelo arcilloso de alta plasticidad (arcilla negra) de un espesor mínimo de 50 cm y propiciar el desarrollo de pasto, manteniendo húmeda la cama de arcilla que al final hará la retención del agua proveniente de aguas arriba.
- Cambiar el adoquín por pavimento hidráulico o material impermeable, además de realizar una evaluación detallada de la base del pavimento y el suelo subyacente, para reemplazar o reparar la sección afectada donde se pondrá el pavimento. La estructura de pavimento de adocreto deberá tener propiedades drenantes (cama de gravilla y base granular), la cual descansará sobre una geomembrana tipo Geovin o similar, la cual es impermeable e impedirá que se infiltre el agua de lluvia a la terracería inferior o a las terracerías aledañas. La capa subrasante que subyace a la geomembrana deberá contar con una pendiente de 2% (subdrenaje), para que escurra el agua que se infiltre y reconozca hacia tuberías captadoras que se comuniquen con la red de agua pluvial para su disposición final. En la Figura 4.2, se muestra la estructura de pavimento permeable (Adocreto).

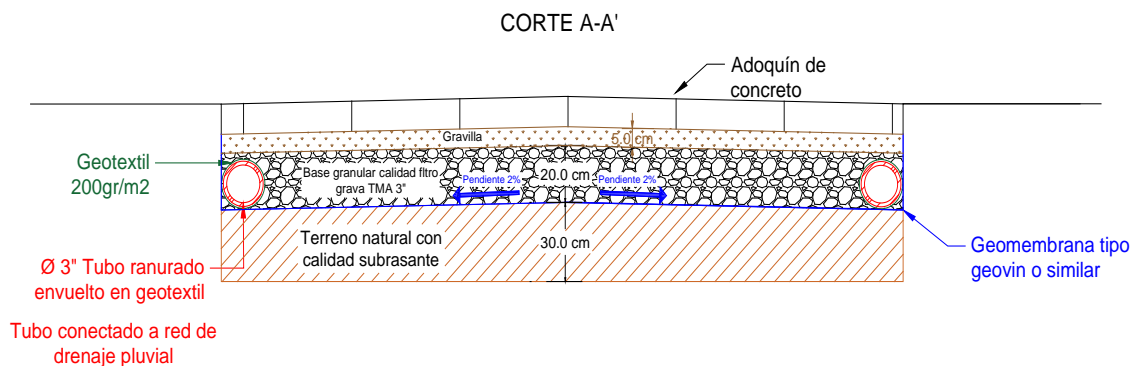


Figura 4.2. Solución de pavimentos de adocreto.
Fuente: Elaboración propia.

- En las zonas con agrietamiento, en donde como resultado de las reparaciones se tenga que cambiar el pavimento, se recomienda antes de ponerlo usar geosintéticos flexibles que impidan la infiltración y estabilicen el terreno.
- Es recomendable reducir el riego a la cantidad de agua que estrictamente requiere la vegetación, para impedir la infiltración del agua; debido a que esto es muy difícil de controlar, sería mejor poner geosintéticos debajo de la zona ocupada por las áreas verdes.

Mejoras y refuerzos al suelo

- En las áreas afectadas, realizar la caracterización directa del subsuelo, a través de perforaciones (sondeos de penetración estándar y sondeos mixtos), para determinar el tipo de materiales y sus propiedades mecánicas. Las perforaciones serían de tipo geotécnico, algunas de las cuales deberían de ser conservadas como pozos de monitoreo. En cada perforación se tomarían muestras del material para realizar ensayos de laboratorio, para determinar las propiedades índice, mecánicas y de compresibilidad de los suelos; de esta forma se podrían establecer las variaciones en el comportamiento de los sedimentos y su respuesta a diferentes cargas estructurales; los resultados serían la base para determinar las medidas de mitigación y mejoramiento del suelo y con ello reducir las afectaciones a las edificaciones.
- En las zonas de peligro medio y alto, de acuerdo con la caracterización citada del subsuelo, se debe establecer el sistema de mejoramiento necesario.
- Realizar estudios geológico-geofísicos de detalle, en las zonas identificadas en la Figura 3.56, para definir los sitios en donde es conveniente construir muros de contención subterráneos, que limiten el movimiento de la masa de suelo. Estos deberán estar diseñados para resistir la presión lateral del suelo y de las estructuras que tiene encima, así como las que se localicen detrás de estos; de acuerdo con los resultados de los estudios de detalle y las dimensiones que deban tener, podrán ser de concreto, mampostería o muro de gaviones. Estas obras

servirían para evitar el deslizamiento del suelo y los daños a las estructuras; deberán incluir un drenaje en su parte trasera para evitar la acumulación del agua.

- Estos muros deberán ubicarse de manera paralela a la traza del fracturamiento principal y deberán estar anclados en las tobas, para de esta forma reducir la carga asociada a los materiales de relleno, la variación en su humedad y las estructuras que están en su superficie.
- En casos muy especiales y necesarios, instalar pilotes para transferir las cargas de la estructura a los materiales más estables de la zona (tobas e ignimbritas); en este caso el número y distribución, de los pilotes estaría en función de un estudio geomecánico de las rocas estables y del tipo de estructura a construir.
- Es muy importante que la cimentación de las nuevas edificaciones, lleguen a la capa dura constituida por materiales volcánicos; en función de las dimensiones de la nueva construcción se decidirá si se requiere de exploración geofísica y/o de perforaciones geotécnicas.

Propuestas para las edificaciones

Las viviendas que se encuentran directamente sobre grietas en el suelo pueden verse afectadas en diferentes formas, dependiendo de las condiciones que tenga la grieta, así como de las características constructivas y materiales con que se construyó la vivienda.

Se observó que en muchas ocasiones las viviendas están constituidas por muros de mampostería reforzados con algunos elementos de concreto. Cuando la vivienda es de dimensiones pequeñas y se encuentra bien estructurada se mueve como cuerpo rígido, sin daños, pero con inclinaciones considerables.

Frecuentemente, los muros de mampostería son los primeros en fracturarse, después las fracturas se propagan por las juntas entre los ladrillos, con una trayectoria que cambia de dirección cuando alcanza un elemento estructural más resistente, como concreto reforzado o un muro perpendicular; por estas razones es necesario que las edificaciones sean evaluadas una a una para determinar las acciones a seguir, dentro de las que se encuentran las siguientes:

Refuerzo de estructuras existentes:

- Un ingeniero especialista en estructuras deberá realizar una evaluación completa de los daños en las edificaciones para determinar si las fracturas representan un riesgo para la seguridad de las personas que la habitan.
- Para disminuir la velocidad de progresión de los agrietamientos en las estructuras ya dañadas, es conveniente instalar marcos de acero de perfiles tubulares, alrededor de muros y losas, para que sean más rígidos; de esta forma se disminuirá la velocidad de aparición de nuevos agrietamientos.
- En caso de no ser posible la implementación del refuerzo con marcos de acero, sería conveniente utilizar un sistema de apuntalamiento con polines de madera, alrededor de muros y losas, para distribuir la carga y minimizar el riesgo de colapso; esto se recomienda en casas habitación con claros pequeños no mayores a 4 m.

La implementación de esta medida tiene como objetivo reducir la velocidad de deterioro de las estructuras afectadas; sin embargo, no representa una solución definitiva al problema.

- Se recomienda reforzar los muros afectados con una malla electrosoldada en ambas caras del muro, anclados con varillas que atraviesen el muro, de forma que lo abracen. Sobre la malla se deberá colocar un repellado hasta cubrir la malla electrosoldada (Ver Figura 4.3). La implementación de esta medida tiene como objetivo reducir la velocidad de deterioro de las estructuras afectadas; sin embargo, no representa una solución definitiva al problema.

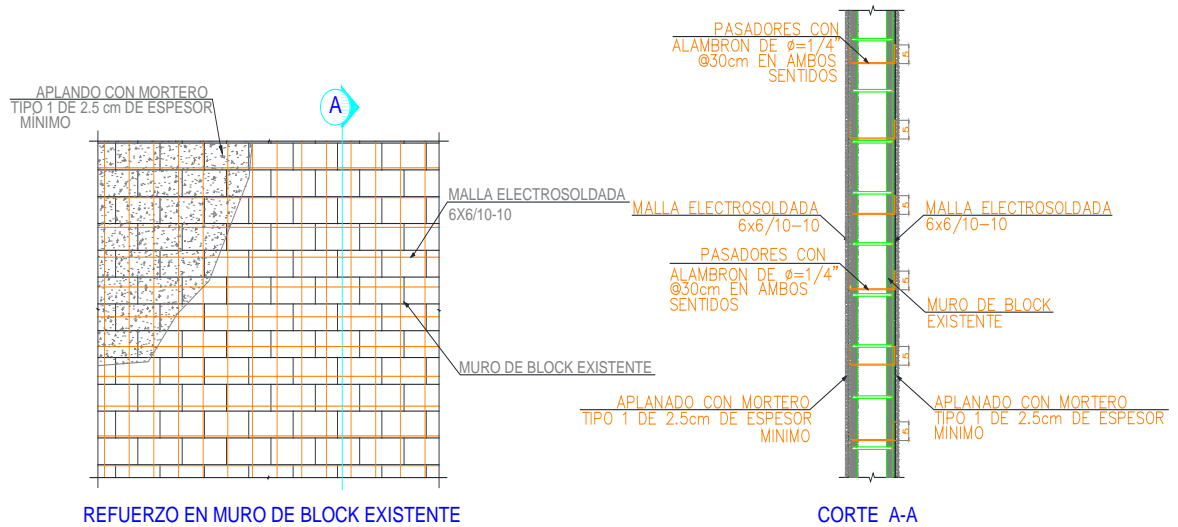


Figura 4.3. Refuerzo de muros con malla electrosoldada
Fuente: Elaboración propia.

- Las edificaciones se pueden proteger en cierta medida colocando material granular limpio en la cimentación (menos de 5 % de finos y con coeficiente de uniformidad $C_u = 2.5$), sin que esto detenga el proceso. El material granular colocado sobre las grietas distribuirá horizontalmente los desplazamientos verticales que se presentan en la superficie del terreno. La protección se puede hacer con una caja disipadora; la cual por una parte se hace con material granular con una capa de 0.4 m de espesor constante y por otra parte con una caja disipadora adicional con dentellón granular de 0.5 m de profundidad, como se indica en la Figura 4.4.

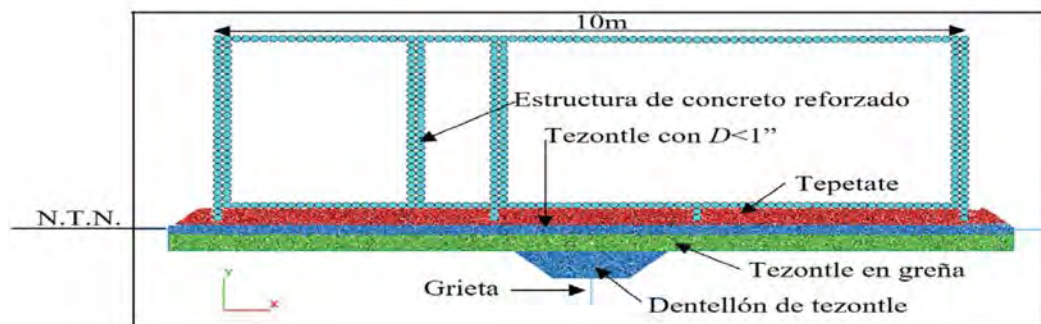


Figura 4.4. Modelo 2D de una vivienda tipo con caja disipadora en la cimentación
Tomado de: Sánchez Guzmán & Auvinet Guichard (2021b)

- Otra forma más simple de colocar material granular en los sitios donde hay losas de cimentación, como en el caso de las colonias Cumbres del Sol y

Colinas de San Francisco, es realizar perforaciones en las losas encima de la fractura para facilitar su relleno (ver Figura 4.5); esta acción no detendrá el proceso, pero dará soporte debajo de las estructuras para evitar su desestabilización e inclinación.

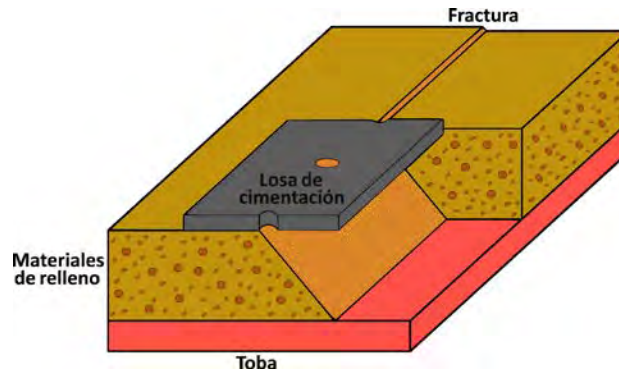


Figura 4.5. Modificaciones en las losas de cimentación para relleno de fractura
Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes acciones de mitigación y corrección de daños a las viviendas, se presentan considerando que un porcentaje bajo de los habitantes podría realizar inversiones mayores; se considera que no son de bajo costo, pero representan una alternativa para quienes pudieran llevarlas a cabo.

- Inyección de resina. El tratamiento del terreno para corregir problemas de asentamiento diferencial en cimentaciones, mediante el uso de resinas expansivas, se lleva a cabo inyectando debajo de la estructura afectada en la grieta una resina de poliuretano bicomponente, como se muestra en la Figura 4.6.

Esta resina se caracteriza por su rápida reacción y alta presión de expansión, rellena las grietas y vacíos en el terreno, consolidando y compactando el suelo, lo que permite levantar y nivelar la estructura de manera precisa. Este proceso corrige el asentamiento, y previene daños en la estructura, pero no detiene el deslizamiento de la masa de material asociado a los agrietamientos.

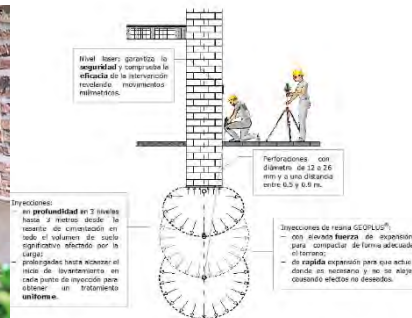


Figura 4.6. Inyección de resinas de poliuretano. Fuente: Urettek

El procedimiento comienza con un estudio detallado para diseñar la intervención, basado en las condiciones estructurales y geotécnicas del terreno.

- Nivelación de la cimentación con micropilotes de acero. En este caso la nivelación de la cimentación afectada por hundimiento diferencial se realiza mediante micropilotes de acero. Inicialmente, se realiza un estudio estructural de la edificación y un análisis geotécnico del terreno para evaluar las condiciones del suelo y la estructura afectada.

A continuación, se diseña el sistema de micropilotes, definiendo su longitud y distribución alrededor de la cimentación comprometida, en este caso hasta alcanzar el material volcánico estable mecánicamente. Tras la preparación del sitio, se instalan gatos hidráulicos en la cimentación utilizando grapas o placas. Luego se hincan a presión los módulos de acero, que transfieren las cargas a estratos más profundos y competentes, permitiendo así la elevación de la estructura hasta su nivel original (ver Figura 4.7).

Finalmente, se lleva a cabo un monitoreo detallado del comportamiento de la cimentación para garantizar su estabilidad a largo plazo. Se realizan las reparaciones necesarias en las áreas afectadas de la estructura, como grietas en paredes o suelos, y se aplican los acabados necesarios para restaurar la apariencia original.

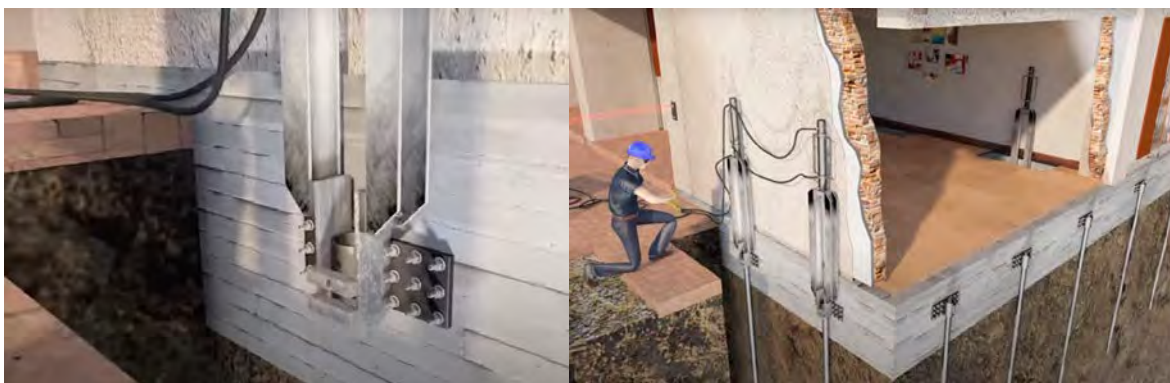


Figura 4.7 Esquema de nivelación de cimentación con un sistema de micropilotes.

Fuente: Geosec

- Nivelación de cimentación con columnas de grava. El uso de columnas de grava para nivelar una cimentación dañada por hundimiento diferencial es un método geotécnico eficaz que involucra varios pasos esenciales. En primer lugar, se realiza una investigación geotécnica para evaluar las condiciones del suelo y

determinar la magnitud del hundimiento, lo que incluye la recolección de muestras de suelo y la realización de pruebas *in situ*. Con base en estos resultados, se diseña el patrón y tamaño de las columnas de grava, que suelen disponerse en una cuadrícula o en un patrón triangular para una distribución uniforme de la carga.

La instalación de las columnas se lleva a cabo mediante excavación o perforación, preferentemente hasta la profundidad a la que se encuentra el material estable mecánicamente (ver Figura 4.8), seguida del relleno con grava compactada en capas mediante vibración. Según la técnica empleada, como el método de desplazamiento o el de perforación y relleno, se garantiza una compactación adecuada del material, lo que permite el paso del agua a través de las columnas de grava. Este enfoque no solo mejora la estabilidad de la cimentación, sino que también puede reducir el riesgo de deslizamiento del terreno, mitigar el potencial de licuación sísmica y disminuir los asentamientos globales y locales.

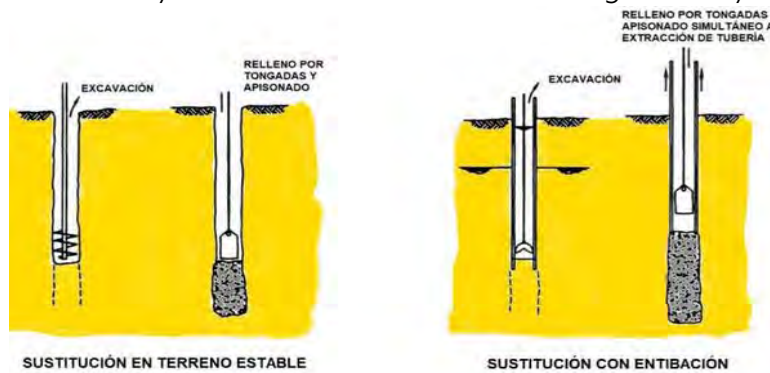


Figura 4.8. Esquema columnas de grava.

Fuente: Víctor Yepes, Universidad Politécnica de Valencia.

- Demolición de estructuras afectadas. Para eliminar el riesgo y dar seguridad a los habitantes, en las viviendas que están afectadas por el colapso de estructuras con daños severos, se deberá elaborar un plan detallado para la demolición segura y controlada de las estructuras con daños irreparables.

Futuros desarrollos

Para futuros desarrollos se pueden retomar algunas propuestas antes mencionadas, sin embargo una de las actividades cruciales es la exploración e identificación de las fracturas existentes en las cuales será necesario realizar una caracterización directa del subsuelo a través de perforaciones, para determinar el tipo de materiales y sus propiedades mecánicas; se deberán incluir perforaciones (algunas de estas funcionarán como pozos de monitoreo), toma de muestras de material y ensayos de laboratorio (variación en el contenido de humedad de las

muestras), que permitan establecer su comportamiento bajo cargas estructurales y determinar el tipo de edificaciones y niveles de construcción que se pueden desarrollar (pruebas de penetración estándar (SPT) y pozos a cielo abierto (PCA)).

Para limitar la entrada del agua superficial al subsuelo se deberá realizar un estudio hidrológico-hidráulico para conducir el agua de lluvia desde las partes más altas de las colonias, que desvíen este fluido y que impida el ingreso a través de las grietas existentes.

Es muy importante que la cimentación de las nuevas edificaciones, evalúen la profundidad a la que están los materiales volcánicos estables mecánicamente, para que la cimentación, si es posible, quede asentada sobre estos materiales; como resultado del censo se observó que las construcciones con menos afectaciones son aquellas que se realizaron con losa de cimentación; estas se recomienda sean reforzadas con un armado como si se tratara de losa de entrepiso, para soportar la posible pérdida de soporte.

En las zonas con potencial de agrietamiento, se recomienda incluir en la construcción de pavimentos el uso de geomallas biaxiales que doten de mayor resistencia a la tracción al terreno. Así mismo, en las zonas con nuevas cimentaciones de zapatas superficiales, se deberá considerar un arreglo utilizando geomallas biaxiales. (ver Figura 4.9).

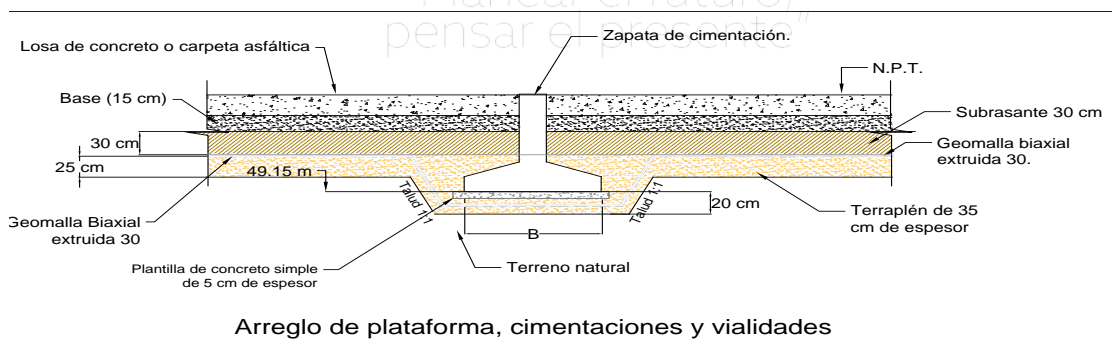


Figura 4.9. Solución de pavimentos y cimentación usando geomalla biaxial.
Fuente: Elaboración propia.

5. Plan de seguimiento en la zona afectada

Para evaluar los movimientos verticales y horizontales en las estructuras y vialidades afectadas, es necesario establecer un plan de control y seguimiento, para lo cual se recomienda realizar mediciones frecuentes (cada mes) en la red de monitoreo del sistema de nivelación topográfica establecido en este estudio; esto permitirá conocer los movimientos verticales y horizontales de las estructuras y vialidades, antes, durante y después, de llevar a cabo las acciones de mitigación propuestas.

Se reitera que las nuevas mediciones topográficas que se lleven a cabo se deben realizar con el mismo método utilizado en este proyecto (GNSS), solo de esta forma los resultados podrán ser comparables. Esta información permitirá identificar áreas de mayor riesgo con base en la velocidad de deformación del suelo y tomar medidas preventivas oportunas.

Caracterización del subsuelo

Realizar perforaciones para determinar la composición y propiedades del subsuelo en las áreas afectadas. Esto incluye sondeos geofísicos, perforaciones, muestreo y pruebas de laboratorio, que permitan establecer su comportamiento bajo las cargas estructurales relacionadas con el tipo de edificaciones y niveles de construcción que se quieran desarrollar (pruebas de penetración estándar (SPT) y pozos a cielo abierto (PCA)). Estas perforaciones se pueden aprovechar para que algunas queden terminadas como inclinómetros, así como para establecer una red de monitoreo piezométrico, que permita determinar si en época de lluvias, puede haber agua en el contacto entre los materiales volcánicos y los de relleno, que afecte la estabilidad del suelo y las estructuras.

En la Figura 5.1, se presenta la ubicación propuesta para las perforaciones y los inclinómetros, los cuales se proponen construir en grupos de tres, uno en el área afectada por la grieta y uno a cada lado fuera de la zona de influencia de la grieta; la distancia entre estos podría variar de acuerdo a las condiciones de cada fractura, pero deberán estar a una distancia máxima de 30.0 m.



Figura 5.1. ubicación de las exploraciones geotécnicas
Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se tenga información de las perforaciones y del monitoreo, se recomienda revisar el modelo geológico-geotécnico del subsuelo, para complementar el conocimiento de las interacciones entre la toba y el material de relleno, y cómo estas interacciones contribuyen al agrietamiento y hundimiento; estos resultados permitirán adecuar las medidas de mitigación recomendadas.

6. Conclusiones

- En el área de estudio se identificaron dos unidades litológicas, la primera constituida por materiales volcánicos, que por su moderado a alto grado de compactación y bajo fracturamiento constituyen la capa dura y mecánicamente estable de la zona; estos materiales se encuentran cubiertos por sedimentos de relleno natural (pie de monte) y artificial, con espesor variable entre 1.30 y 12 m con un grado de compactación bajo, los cuales son muy variables en sus características mecánicas por los cambios de humedad y sobrecarga a que están sometidos, estas características favorecen la formación de fracturas.
- El grado de daños detectados en las edificaciones durante la etapa de censo, están relacionados con la trayectoria de las grietas y la posición relativa de los inmuebles respecto a dichas grietas; otro factor determinante en el grado de afectación en las obras está vinculado con las diferencias en la calidad de los materiales que se utilizaron en sus distintas etapas de construcción, incluyendo las ampliaciones y el método constructivo utilizado.
- La mayoría de las fracturas en las edificaciones que se encuentran alejadas a las trazas de las fracturas, se asocian con asentamientos diferenciales bajo sus cimentaciones, lo que afecta a los muros en toda su longitud, generando fracturas en las juntas de pegado y en ocasiones en la mampostería.
- Durante los recorridos generales, efectuados en todas las calles de la zona de estudio, se identificó que los daños en las estructuras se encuentran entre 20 y 30 m de distancia de la fractura visible, con esta base se realizaron visitas complementarias de detalle, en las que se revisó el exterior de las viviendas en estas franjas para evaluar el nivel de daño.
- Como resultado se identificaron 34 sitios alrededor de las trazas de las fracturas, en donde se efectuó el llenado del formato de captura de datos para evaluación estructural, tomado del formato Centro Nacional de Prevención de Desastres (2021).
- Los resultados de la evaluación del nivel de daño en las edificaciones fue el siguiente: Ligero en 6 sitios, medio en 21 sitios y severo en 7 sitios, las

colonias con los daños severos fueron en Las Huertas, La Condesa, Colinas de San Francisco, La Piscina CTM y Granja Las Amalias.

- La forma de cimentación de las viviendas es un factor determinante para disminuir el nivel de daño; durante los trabajos de censo en las colonias Cumbres del Sol y Colinas de San Francisco, aunque se ha desarrollado el fracturamiento en el terreno, se identificó que las viviendas se inclinan en lugar de agrietarse, ya que fueron diseñadas con una losa de cimentación, lo que favorece a que se comporten como un bloque.
- Se observó que el mayor número de casas afectadas se encuentra en el lado de la fractura que cae, esto se asocia a que hay una mayor pérdida de soporte, y el proceso de lavado de materiales finos es mayor por haber un mayor fracturamiento.
- Los habitantes mencionaron que durante la época de lluvias se generan más fracturas o daños, esto está relacionado con la infiltración del agua de lluvia, que disminuye la resistencia al deslizamiento y genera desplazamientos y hundimientos que varían desde milímetros hasta decímetros; otro factor importante es la cantidad de fugas que hay en la zona que aportan agua al subsuelo.
- De acuerdo con los comentarios durante el censo y del análisis de la evolución de las grietas, se determinó que en las colonias Las Huertas, Granja Las Amalias, Santa Croce, La Condesa, Cumbres del Sol y Colinas de San Francisco, ya existía el fracturamiento desde hace trece años, sin embargo, a partir del año 2018 la velocidad de apertura en el fracturamiento aumento y también el número de fracturas, esto coincide con el hecho de que 2018 fue un año donde la precipitación fue más intensa en comparación con años previos, lo que permite confirmar que el agua es un agente que incrementa la inestabilidad del terreno.
- En las zonas donde se realizó exploración geofísica, se identificó que el espesor de los materiales de relleno natural y artificial susceptibles de fracturamiento, varía entre 4.5 y 6.28 m, sin embargo, en los recorridos de geología se observó que su espesor puede ser mayor; es por esto que conviene realizar más exploración geofísica. Adicionalmente la geofísica permitió concluir que las fracturas no llegan hasta la secuencia volcánica porque esta es mecánicamente estable.

- Con las secciones de georradar, se identificaron zonas donde hay fracturas que aún no han llegado hasta la superficie del terreno; las colonias donde existe un mayor fracturamiento en el subsuelo son Las Huertas y La Condesa; estas fracturas son paralelas a las que afloran, lo cual permitió definir el ancho de la zona de afectación.
- Se realizaron 6 sondeos transitorios electromagnéticos (TEM), uno más de los contratados; estos llegaron a una profundidad de exploración de 120 m; con sus resultados se determinó que debajo de los materiales de pie de monte se encuentran materiales compactados, que no están saturados con agua, por lo que no hay un acuífero en el subsuelo de la zona de estudio, que pudiera estar relacionado con el proceso de fracturamiento y daño a las viviendas.
- De forma complementaria, se realizaron dos tendidos de refracción sísmica, que no estaban contratados, pero que fue necesario realizarlos para lograr un mayor conocimiento del subsuelo y de sus características mecánicas; de esta forma se identificaron tres capas con comportamiento sísmico diferente, la unidad más superficial U2 está constituida por materiales de relleno natural y artificial, mal seleccionados con moderado grado de compactación, estos materiales se encuentran sobre la U1b constituida por tobas con grado de compactación medio a alto; entre la U2 y la U1b hay un fuerte contraste en las velocidades sísmicas, lo que provoca que en el contacto se genere un proceso lento de deslizamiento sobre la antigua topografía que tenía la unidad U1b; en la parte más profunda se encontró a la U1a, constituida por tobas con grado de compactación alto, intercaladas con tobas soldadas (ignimbritas) con grado de compactación muy alto.
- Con apoyo en las velocidades de ondas sísmicas se obtuvo un estimado del ángulo de reposo de los materiales de relleno de entre 10° y 23° , con lo cual se determinó una zona de influencia de las fracturas.
- Se realizaron 12 mojoneas para nivelación topográfica, las cuales se ubicaron en sitios estratégicos para evaluar la tasa de cambio en la posición horizontal y vertical del terreno; estas constituyen una red de monitoreo topográfico que se debe tener continuidad en las mediciones, siempre utilizando el mismo método topográfico utilizado.

- Con la integración de toda la información, se determinó lo siguiente: la zona de estudio se encuentra en una ladera con una pendiente suave a media (entre 3° a 12°), la cual sufrió una pérdida de soporte en la base, por los efectos de consolidación de los materiales que han sido drenados verticalmente como consecuencia de la sobreexplotación del acuífero; esto motivó que los materiales del pie de monte que hacia la parte más plana están intercalados con los sedimentos lacustres sufrieran reacomodo, generando grietas de tensión que incrementaron la infiltración del agua pluvial, hasta que esta llegó al contacto con la toba impermeable, favoreciendo que el agua actuara como lubricante, provocando deslizamientos de ladera, hundimientos y un reacomodo del material del pie de monte, abriendo las grietas existentes y generando nuevas; este reacomodo ha sido irregular por lo que la localización en superficie de las fracturas no es continua y existen sitios en donde no se observan superficialmente o bien cambien de dirección.
- En las fracturas se genera un proceso de migración de partículas finas, dejando que predominen las gruesas, que sufren un reacomodo para cubrir los espacios dejados por los finos; este proceso ha afectado a las edificaciones y a las redes de distribución de agua potable y alcantarillado, debido a que se generaron hundimientos y grietas.
- De acuerdo con el análisis realizado y el modelo geológico asociado con el proceso de agrietamiento, hundimiento y deslizamiento, se concluye que no puede detenerse debido a la pendiente natural que tienen los materiales mecánicamente estables (tobas), así como por la sobre carga que ha sido impuesta sobre los materiales de relleno; las dimensiones de las zonas donde la inestabilidad se presenta son variables e involucra a una gran masa de terreno, cuya inercia provoca que su desplazamiento sea continuo, con variaciones en función de la presencia de agua, ya sea por infiltración de la lluvia, de agua de escorrentía, de fugas de las redes hidráulicas y/o por el riego de jardines.
- Con la interpretación de las secciones de georradar, la zona de influencia de las fracturas y la posición de su traza, permitieron establecer cuatro zonas con susceptibilidad al peligro de que las edificaciones e infraestructura se vean dañadas, las cuales se describen a continuación:

Zona de peligro alto con evidencias en superficie

En esta zona el subsuelo está constituido por una capa de materiales de relleno natural y artificial (pie de monte y relleno antropogénico); hay fracturas visibles en superficie que permitieron identificar la traza del fracturamiento; para determinar la afectación con este peligro se utilizó un ángulo de reposo aproximado de 23° (afecta a una menor área); el subsuelo de esta zona se encuentra altamente fracturado.

Las afectaciones en las edificaciones son variadas, algunas se manifiestan como desniveles en las calles. Cuando el fracturamiento está expuesto en la superficie del terreno, facilita el ingreso del agua a través de las fracturas y se favorece el movimiento del terreno aguas abajo.

Zona de peligro alto inferido con base en los resultados de geofísica

En esta zona el subsuelo está constituido por una capa de materiales de relleno natural y artificial (pie de monte y relleno antropogénico); el subsuelo de esta zona se encuentra altamente fracturado, y estas estructuras coinciden con la proyección de la continuidad de las fracturas observables, sin embargo, no llegan a la superficie; para determinar la afectación con este peligro se utilizó un ángulo de reposo de los materiales de relleno aproximado de 23° (afecta a una menor área). En esta zona es necesario confirmar con más secciones de georradar y con perforaciones exploratorias.

Zona de peligro medio

En esta zona el subsuelo está constituido por una capa de materiales de relleno natural y artificial (pie de monte y relleno antropogénico), los cuales se encuentran con fracturamiento medio a bajo y fueron evidenciadas a través de las exploraciones geofísicas debido a que no llegan a superficie; para determinar la amplitud de su zona de afectación con este peligro, se utilizó un ángulo de reposo de los materiales de relleno entre 10° y 23° (afecta a una mayor área); esta zona es continua a lo largo de donde se observó fracturamiento y es necesario confirmar su peligro con más secciones de georradar y con perforaciones exploratorias.

En la colonia Colinas de San Francisco esta zona se extendió debido a las evidencias en el fracturamiento de la calle paralela al arroyo, en donde el

mamposteado que lo encausa se está venciendo, provocando inestabilidad pendiente arriba.

Zona de peligro medio inferido con base en los resultados de geofísica

En esta zona el subsuelo está constituido por una capa de materiales de relleno natural y artificial (pie de monte y relleno antropogénico), con fracturamiento bajo a nulo, el cual no llegan a superficie y solo fue evidenciado a través de la exploración geofísica; para determinar la zona de afectación se utilizó un ángulo de reposo de los materiales de relleno de entre 10° y 23° (afecta a una mayor área); esta zona es paralela a las zonas en donde se observaron fracturas y la geofísica ayudo a inferir pocas afectaciones en los materiales en el subsuelo. Como en las otras zonas es conveniente confirmar con más secciones de georradar y con perforaciones exploratorias, pero dando prioridad a las de mayor peligro.

- Con base en las condiciones del terreno, así como en el proceso que está generando las fracturas y el daño en las edificaciones y calles, se generaron propuestas de mitigación y adaptación para las zonas afectadas, con objeto de retardar o disminuir los daños a las edificaciones, a continuación, se enlistan las acciones propuestas:

Disminuir el ingreso de agua y el incremento de la humedad en el subsuelo:

- ✓ Reducir las fugas en las redes de distribución de agua potable y drenaje.
- ✓ Cambiar el material de las redes por otra tubería más flexible.
- ✓ Instalar "cajas disipadoras de deformaciones unitarias" en las zonas fracturadas, particularmente en las zonas por donde se tienen redes de distribución de agua potable y drenaje, para evitar rompimientos.
- ✓ En el caso de la colonia Las Huertas, es necesario revestir el vaso regulador y cambiar el adoquín por pavimento hidráulico o material impermeable.
- ✓ Utilizar pavimentos que descansen sobre una geomembrana tipo Geovin o similar, la cual es impermeable e impedirá que se infiltre el agua de lluvia.
- ✓ Recomendar reducir el riego a la cantidad de agua que estrictamente requiere la vegetación.

Mejoras y refuerzos al suelo:

- ✓ Determinar el tipo de materiales para conocer sus propiedades índice, mecánicas y de compresibilidad, que permitan establecer el o los sistemas de mejoramiento necesario.
- ✓ Determinar dónde es conveniente construir muros de contención subterráneos, que limiten el movimiento de la masa de suelo.
- ✓ Determinar dónde es necesario instalar pilotes para transferir las cargas de la estructura a los materiales más estables de la zona (tobas e ignimbritas).
- ✓ Propiciar que la cimentación de las nuevas edificaciones llegue a la capa dura constituida por materiales volcánicos.

Refuerzo de estructuras existentes:

- ✓ Evaluación por parte de un ingeniero civil especialista en estructuras, de las edificaciones dentro de la zona de peligro alto y medio, para determinar el riesgo en las viviendas y los refuerzos necesarios.
- ✓ En donde determine el especialista citado:
 - Instalar marcos de acero de perfiles tubulares, alrededor de muros y losas.
 - Instalar un sistema de apuntalamiento con polines de madera, alrededor de muros y losas.
 - Reforzar los muros afectados con una malla electrosoldada en ambas caras del muro, anclados con varillas que atraviesen el muro, de forma que lo abracen.
- ✓ En donde sea posible proteger la cimentación, colocando material granular limpio (menos de 5 % de finos y con coeficiente de uniformidad $C_u = 2.5$), para evitar la pérdida de soporte de las edificaciones; esto se tiene que hacer continuamente.
- ✓ Otras opciones avanzadas que requieren de mayor estudio estructural e inversión son: inyección de resina para nivelar las edificaciones, nivelación de la cimentación con micropilotes de acero o con columnas de grava.
- ✓ En los casos más graves e inestables, elaborar un plan detallado para la demolición segura y controlada de las estructuras con daños irreparables.

Para futuros desarrollos urbanos:

- ✓ Determinar el tipo de materiales en el subsuelo para conocer sus propiedades índice, mecánicas y de compresibilidad, que permitan

evaluar su comportamiento bajo cargas estructurales y establecer el tipo de edificaciones y niveles máximos que deban alcanzar.

- ✓ Utilizar tuberías flexibles para las redes de agua potable, drenaje y pluviales.
 - ✓ Implementar un sistema de drenaje perimetral en la parte más alta que permita desviar el agua de lluvia y de escurrimiento.
 - ✓ Elaborar un sistema de monitoreo topográfico para determinar la velocidad y cambios en el movimiento del terreno, antes, durante y ya urbanizado.
 - ✓ Construcción de pavimentos con uso de geomallas biaxiales que doten de mayor resistencia a la tracción al terreno.
 - ✓ En las nuevas construcciones con cimentaciones de zapatas superficiales, se deberá considerar un arreglo utilizando geomallas biaxiales.
- Para las zonas afectadas, es necesario establecer un plan de control, evaluación del suelo y seguimiento con mediciones frecuentes de los siguientes rubros:
 - ✓ Monitoreo del sistema de nivelación topográfica establecido en este estudio con la misma técnica empleada (GNSS).
 - ✓ Caracterización del subsuelo. Realizar perforaciones para determinar la composición y propiedades del subsuelo en las áreas afectadas.
 - ✓ Instalar inclinómetros para hacer mediciones mensuales de los cambios del terreno a profundidad, en zonas cercanas a las fracturas identificadas.
 - ✓ Instalar una red de monitoreo piezométrico, que permita determinar si en época de lluvias hay agua en el contacto entre los materiales volcánicos y los materiales de relleno.
 - ✓ Con información del monitoreo revisar el modelo geológico-geotécnico del subsuelo y establecer con mayor detalle los sitios donde hay mayor movimiento.
 - ✓ Adecuar las medidas de mitigación recomendadas de acuerdo con los resultados del monitoreo.

7. Bibliografía

- Alpala Aguilar, Jorge & Erazo Montenegro, Yuli. (2021). Interferometría con software libre e imágenes Sentinel 1A/1B, aplicada al monitoreo de la deformación volcánica en Colombia, caso de estudio volcanes Chiles - Cerro Negro. 10.13140/RG.2.2.12265.42086.
- Alvarez Manilla A. A., P. R. (1996). Subsistencia y fallamiento en el Valle de Querétaro.
- Botero-Santa, P. (2011). *Origen y evolución de la falla El Bajío en su sector noreste*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Canet, C. (2019). Consideraciones sobre el sistema geotérmico de San Bartolomé de los Baños, Guanajuato (México), desde un análisis de la alteración hidrotermal y las inclusiones fluidas. *Geofísica Internacional*, 229-246.
- CEAG. (2023). *Condiciones de la profundidad y elevación del nivel estático del Acuífero del Valle de León*. Guanajuato.
- CENAPRED. (2001). DIAGNÓSTICO DE PELIGROS E IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES EN MÉXICO.
- CENAPRED. (2006). *ELABORACIÓN DE MAPAS DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS SÚBITAS EN ZONAS RURALES, CON ARRASTRE DE SEDIMENTOS*. México.
- CENAPRED. (2014). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Geológicos*. D.F.: CENAPRED.
- CENAPRED. (2017). Evaluación de la Seguridad Estructural de Edificios - Hundimientos. En C. N. Civil.
- CENAPRED. (2020). *Identificación de peligro sísmico a nivel municipal que permita contar con información básica para el desarrollo posterior de atlas municipales en todo el país*. Recuperado el Agosto de 2023, de https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2021/1er_Trimestre/FRACCION_XLI/RS/210420_Informe_RS_CaracteristicasCFE2015.pdf
- CENAPRED. (2021). *Análisis de umbrales de lluvia en municipios de alta marginación, expuestos a inestabilidad de laderas. Casos de Chiapas y Oaxaca*. Ciudad de México: CENAPRED.

- CENAPRED. (2024). *Atlas Nacional de Riesgos*. Obtenido de Peligros geológicos: Sismos: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/portal/fenomenos/>
- CENAPRED-SEGOB. (2013). *GUÍA DE CONTENIDO MÍNIMO PARA LA ELABORACIÓN DE ATLAS ESTATALES Y MUNICIPALES DE PELIGROS Y RIESGOS*. (CENAPRED, Ed.) México, D.F.: Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos, Dirección de Investigación.
- Chen F. H. (1975). *Foundation on expansive soil*. Elsevier Scientific Company.
- CONAGUA. (2020). *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE (1119), ESTADO DE GUANAJUATO*. México: Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, CONAGUA.
- CONAGUA. (Diciembre de 2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Valle de León (1113), Estado de Guanajuato. *Diario Oficial de la Federación*, pág. 38.
- DOF. (21 de Diciembre de 2016). Guía de Contenido Mínimo para la Eaboración del Atlas Nacional de Riesgos. *Diario Oficial de la Federación*, pág. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Guia_contenido_minimo2016.pdf.
- Echegoyén, S. (1978). Yacimientos minerales de la Sierra de Arperos. *Consejo de Recursos Naturales*, 21.
- Edwards, J. (1956). Estudios sobre algunos de los conglomerados rojos del Terciario Inferior del centro de México. *Congreso Geológico Internacional*, (pág. 75). México.
- ESA, Braun, A., & Veci, L. (2020). TOPS Interferometry Tutorial. In Sentinel-1 Toolbox Skywatch ESA. [http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX TOPSAR Interferometry with Sentinel-1 Tutorial_v2.pdf](http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX_TOPSAR_Interferometry_with_Sentinel-1_Tutorial_v2.pdf)
- ESA, Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. & Massonnet, D. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. European Space Agency Publications.
- García Blanco, D. (2021). Aplicación de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) sobre la superficie del Volcán Galeras entre los años 2017 y 2019, y del Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro De Mayasquer Entre Los Años 2019 Y 2020, en el Departamento De Nariño (Suroccidente de Colombia), A partir de imágenes satelitales sentinel-1.

- Geofísica, I. d. (2023). Esencial, seguir con los estudios vulcanológicos y tectónicos. *Gaceta UNAM*.
- Gobierno de México. (Octubre de 2023). *Agencia Espacial Mexicana (AEM)*. Obtenido de <https://www.gob.mx/aem/acciones-y-programas/antecedentes-de-la-aem>
- Gómez-Vasconcelos, M. G. (2018). El Volcán Parícutín en el campo volcánico Michoacán-Guanajuato: una revisión. *Ciencia Nicolaita*, 15-30.
- Guilbaud, M. N., Siebe, C., Layer, P., & Salinas, S. (2012). Reconstruction of the volcanic history of the Tacámbaro-Puruarán area (Michoacán, México) reveals high frequency of Holocene monogenetic eruptions. *Bulletin of vulcanology*, 1187-1211.
- Hasenaka, T. and Carmichael, I.S.E.,. (1985). The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105--124.
- Hooper, A., H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes (2004), A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737.
- Hunt, R. E. (2005). *GEOTECHNICAL ENGINEERING INVESTIGATION HANDBOOK*. CRC Press.
- IMPLAN. (2006). *Atlas de Riesgos para el Municipio de León, Guanajuato*.
- IMPLAN. (2006). *Atlas de Riesgos para el Municipio de León, Guanajuato*. Obtenido de http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/HABITAT/vr_Atlas_leon.pdf
- IMPLAN. (2010). *Atlas de Riesgos para el Municipio de León, Gto.* León, Gto.: Instituto Municipal de Planeación.
- IMPLAN. (2016). *Perfil de Resiliencia Urbana para la Ciudad de León, Guanajuato*. León.
- IMPLAN. (2017). *Atlas de Riesgos para el Municipio de León, Gto. Etapa 1. Fenómeno Químico y Socio Organizativo*. León.

- IMPLAN. (2018). *Atlas de Riesgos del Municipio de León. Etapa II. Fenómeno Geológico, Hidrometeorológico y Sanitario Ecológico*. León.
- IMPLAN. (2021). *Programa de Gobierno Municipal de León, Guanajuato, 2021-2024*.
- IMPLAN. (2021). *Actualización del Atlas de Riesgos del municipio de León 2021 Fenómenos Sanitario-Ecológico y Socio-Organizativo*. Obtenido de <https://www.implan.gob.mx/pdf/estudios/resiliencia/actualizacion-atlas-riesgos-san-eco-soc-org.pdf>
- INEGI. (2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*.
- INEGI. (2021). *Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales* (Vol. Volumen 2). Aguascalientes.
- INEGI. (2022). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463904441.pdf
- INEGI. (2023). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE)* .
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). *Estudio de los hundimientos por subsidencia en Aguascalientes con métodos satelitales : reporte técnico*.
- IPLANEG. (2019). *Programa Estatal de Desarrollo Urbano y de Ordenamiento Ecológico Territorial 2040*. Obtenido de Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato: <https://iplaneg.guanajuato.gob.mx/peduoet/>
- ISES. (Octubre de 2023). *Servicio Internacional del Medio Ambiente Espacial (ISES)*. Obtenido de <http://www.spaceweather.org/>
- Macías Vázquez, J. L. (2013). *El Volcán Parícutín dentro del Cinturón Volcánico Mexicano. El Rincón del Litófago*, 8.
- Macías, J. L. (2005). *Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 379-424.
- Martínez-Reyes, J. (1987). *Resumen de la Geología de la Sierra de Guanajuato. Simposio sobre la Geología de la Región de la Sierra de Guanajuato*, 50-91.

- Martínez-Reyes, J. (1992). *Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato con resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato*.
- Milenio, G. (2022). Las pocitas de aguas termales, en Silao. *Milenio*, <https://www.milenio.com/politica/comunidad/aguas-termales-silao-espacio-visitado-descansar-lavar-ropa>.
- Municipio de León. (2024). *Municipio de León*. Obtenido de Precipitación León: <https://www.leon.gob.mx/clima.html#:~:text=La%20precipitaci%C3%B3n%20pluvial%20media%20anual,m%C3%ADnima%20de%200%C2%B0C>
- Ortiz-Hernández, L., Chiodi, M., Lapierre, H., Monod, O., & Calvet, P. (1992). *El Arco intraoceánico alóctono (Cretácico Inferior) de Guanajuato- Características petrográficas, geoquímicas, estructurales e isotópicas del complejo filoniano y de las lavas basálticas asociadas; implicaciones geodinámicas*. Universidad Nacional Autónoma de México. México: Instituto de Geología.
- Osmanoğlu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1), 1-12.
- Pacheco-Martínez, J. &.-F. (2007). Pacheco-Martínez, Jesús, & Arzate-Flores, Jorge. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 24 (3)(ISSN 2007-2902.), 389-402. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742007000300008&lng=es&tlng=es.
- Perissin, D. (2016). Interferometric SAR Multitemporal Processing: Techniques and Applications. In: Ban, Y. (eds) *Multitemporal Remote Sensing. Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol 20. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_8
- Poland, J. F. (1984). *Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal*. New York: UNESCO.
- Protección Civil Estatal de Gto. (Septiembre de 2023). *Marco Conceptual del Fenómeno Geológico*. Obtenido de Atlas Estatal de Riesgos: https://dga-ssp.guanajuato.gob.mx/atlas/ge/marco_conceptual.pdf
- Quintero Lemus L. J. y Gallardo Amaya R. (2015). Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. *Ingenio UFPSO*(ISSN 2011-642X e-ISSN 2389-864X.), Vol. 08 – Ene-Dic 2015.

- Quintero-Legorreta, O. (1992). Geología de la región de Comanja, estados de Guanajuato y Jalisco. *Revista del Instituto de Geología*, 10, 6-25.
- Ramírez Cortés, A. . (2015). *Evaluación de patologías y desempeño estructural en viviendas afectadas por el fenómeno de subsidencia en la localidad de Jocotepec, Jalisco*. México: Tesis Doctoral, UAA, Aguascalientes, México.
- Ruíz González, F. J. (2015). *ESTUDIO DE LAS VETAS DE TURMALINA QUE REGISTRAN LA HISTORIA DE EXHUMACIÓN DEL GRANITO COMANJA, SIERRA DE GUANAJUATO, MÉXICO*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- SGM. (1998). Servicio Geológico Mexicano. *Carta Magnética de Campo Total Escala 1:250 000 Guanajuato F14-7*. Pachuca, Hidalgo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- SGM. (2017). *Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de Escalas de los Sismos: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html
- SGM. (Septiembre de 2023). *Museo Virtual*. Obtenido de Riesgos Geológicos: Vulcanismo: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Vulcanismo.html#:~:text=Este%20fen%C3%B3meno%20geol%C3%B3gico%20es%20una,inestables%20de%20la%20corteza%20terrestre.&text=Los%20volcanes%20son%20las%20aberturas,y%20magma%20o%20roca%20derretida>.
- SICES. (2017). *Reporte Técnico: Balance de Energía del Estado de Guanajuato*. Guanajuato, Mex.: Secretaría de Innovación, Ciencia y Educación Superior.
- SSN. (2022). *Sismo del 19 de septiembre de 2022, Michoacán (M 7.7)*.
- Torres-García J.J., C.-O. N. (2023). *Suelos expansivos, estimación del potencial de daños y pérdidas a la población e infraestructura. Informe Técnico de Proyecto*. Mentefactura Tecnológica Ciencia Productiva 2021, I+D Sociales.
- UANL. (2023). *Astronomía y Ciencias Espaciales*. Obtenido de Facultad de Ciencias Físico Matemáticas: <https://www.fcfm.uanl.mx/>
- Ulloa, R. (Marzo de 2018). Aplicación del método de Nakamura H/V, para estudiar el riesgo sísmico en la zona de estudio comprendida por el despliegue de estaciones IMAD. *Universidad de Concepción*.
- UNAM. (18 de Enero de 2021). Amenaza global, la subsidencia de suelos. *Gaceta UNAM*, págs. <https://www.gaceta.unam.mx/amenaza-global-la->

subsistencia-de-suelos/#:~:text=El%20origen%20de%20la%20subsistencia,nivel%20de%20la%20superficie%2C%20abund%C3%B3.

UNAM. (Octubre de 2023). *Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE)*. Obtenido de <https://www.lance.unam.mx/>

UNAM. (Octubre de 2023). *Observatorio de Centelleo Interplanetario (MEXART)*. Obtenido de <http://www.mexart.unam.mx/index.php>

UNAM. (2023). *Reporte Semanal de Clima Espacial*. Obtenido de <https://www.sciesmex.unam.mx/blog/category/reporte-semanal-de-clima-espacial/?page=1>

UNAM. (Octubre de 2023). *Repositorio Institucional de Clima Espacial (RICE)*. Obtenido de <https://www.rice.unam.mx/>

UNAM. (Octubre de 2023). *Servicio de Clima Espacial México (SCIESMEX)*. Obtenido de <https://www.sciesmex.unam.mx/>

Yazdandoust, F. &. (2010). Effect of cyclic wetting and drying on swelling behavior of polymer-stabilized expansive clays. *Applied Clay Science*(doi.org/10.1016/j.clay.2010.09.006), 50(6), 461-468.

Youd, T. . (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSFworkshops on evaluation of liquefaction resistenacec of soikls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* .

Zepeda G., J. A. (1989). *Distribución de suelos expansivos en la República Mexicana*. . Curso internacional de mecánica de suelos arcillosos, México.