



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA

TESIS

**PARA OBTENCIÓN DEL GRADO EN
MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

**“MONITOREO DE LA SUBSIDENCIA DIFERENCIAL MEDIANTE NUBE DE PUNTOS
EN FALLA CHAPULTEPEC Y LA COLINA EN MORELIA, MICHOACÁN”**

PRESENTA:

JUÁREZ LAGUNAS MARIBEL

ASESOR:

Dr. HERNÁNDEZ MADRIGAL VICTOR MANUEL

Morelia, Michoacán Febrero del 2017

Victor M. Hernández M.

Dedicatoria

A Dios Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis metas, por poner en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante mi estudio.

A mi madre, Lagunas Velázquez Margarita, por su eterno apoyo que me entrega a todo momento, amor, consejos que siempre nos ha brindado, por ser mi amiga leal.

A mi padre Juárez García Rufino, por su gran apoyo para que siempre logremos nuestras metas, este es uno de sus sueños gracias por sus sabios consejos y amor.

A mi amado esposo Ferrera Murillo José Guadalupe, por su apoyo y ánimo que me brinda para alcanzar nuevas metas, por su paciencia, amor incondicional, consejos. Hoy hemos alcanzado un triunfo más.

A mis hermanos Juárez Lagunas Jannet, Juárez Lagunas Jacqueline, Juárez Lagunas Sergio por su apoyo, amor, palabras de aliento que me regalaron cuando estuve lejos de casa los quiero mucho.

A mis sobrinos Angel Benigno Quintero Juárez, Johana Elizabeth Quintero Juárez, Angel Eduardo Olguín Juárez por su amor incondicional y lágrimas que me regalaron al estar lejos de casa, para que vean en mí un ejemplo a seguir.

Agradecimientos

A mi asesor al Dr. Hernández Madrigal Víctor Manuel por haberme aceptado como su alumna durante la realización de la tesis y por haberme facilitado el equipo necesarios para la obtención de los resultados de esta tesis.

Al Dr. Muñiz Jauregui Jesús Arturo, por haber sido mi co-asesor y por su gran apoyo en mis consultas.

A la Dra. Alonso Guzmán Elia Mercedes, por sus consejos, enorme apoyo y afecto en mi estancia en Morelia.

A mis sinodales el Dr. Ávila Olivera Jorge A, Dr. Garduño Monroy Víctor H., Vázquez Rosas Ricardo, Figueroa Soto Angel G. por haberme regalado tiempo para la revisión de esta tesis.

Agradezco a la universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, por haberme abierto la puerta para la realización de este postgrado.

A CONACYT por haberme aceptado como becario durante la realización de mis estudios en la maestría, sin duda sin este apoyo económico no lo hubiera podido lograr.

Agradezco a mis buenos amigos de generación de la maestría por sus buenos consejos, amistad y apoyo incondicional que me entregaron, fueron uno de los pilares para que yo lograra esta tesis, a la Geo. Paola C. Dijar, Arq. Adriana Hajar, Ec. Lucia Equihua, Biol. Rafael Organista, Biol. Edgar Mora, Fis. Mat. Erika Ruiz y su esposo Josué, gracias a todos.

Índice General

Contenido	
Resumen	12
Abstract.....	13
Introducción.....	14
Hipótesis	15
Metodología	15
Justificación.....	16
Objetivos	17
1. Fundamentos Teóricos	19
1.1 Bases teóricas.....	19
1.2 Antecedentes	25
1.2.1 Estudios de la subsidencia en México	30
1.2.2 Estudios de la subsidencia en Morelia.....	31
1.2.3 Monitoreo a través del ELT en trabajos de investigación	34
2. Área de estudio	37
2.1 Área de estudio	37
2.2 Fallas Geológicas en Morelia, Michoacán	37
3. Metodología	41
3.1 Elaboración de cartografía.....	41
3.2 Verificación de las fallas en campo.....	41
3.3 Identificar las áreas de monitoreo.....	41
3.4 Realizar campañas de monitoreo de los sitios de estudio aplicando la técnica del Escáner Laser Terrestre.....	42
3.5 Obtención y unión de la nube de puntos.....	44
3.6 Limpieza de nube de puntos.....	47
3.7 Exportación de nubes de puntos	47
3.8 Construcción de TIN.....	47
3.9 Perfiles topográficos	49
4. Resultados	51
4.1 Resultados preliminares calle Juan de Grijalva	51
4.1.1 Unión de nube de puntos.....	57

4.1.2 Limpieza de nube de puntos.....	57
4.1.3 Realización de TIN en global Mapper 16	59
4.1.4 Perfiles topográficos	61
4.1.5 Resultados finales calle Juan de Grijalva	62
4.2 Resultados preliminares en calle Halcón.	64
4.2.1 Unión de nube de puntos.....	69
4.2.2 Limpieza de nube de puntos.....	69
4.2.3 Realización de TIN en global Mapper 16	71
4.2.4 Perfiles topográficos	72
4.2.5 Resultados finales calle Halcón	72
5. Discusión	80
6. Conclusiones	82
7. Recomendaciones.....	84
8. Referencias bibliográficas.....	85

Índice de figuras

Figura 1. Calle afectada por la subsidencia diferencial (a) y en la figura (b) se aprecia la casa con mayor afectación ambas fotos son tomadas en la calle Juan de Grijalva.....	16
Figura 2. Se aprecia la calle Halcón afectada por la falla La colina (a), (b) corresponde a casa identificada como afectada por la subsidencia diferencial, (c) ambas ubicadas en el bloque de techo de la falla La Colina.	17
Figura 3. Operación de envío y recepción del láser. Imagen tomada de (Toth, 2009).	19
Figura 4. Medición de las gamas de inclinación (R) y los ángulos verticales por el Escáner. Imagen tomada de (Toth, 2009).	20
Figura 5. Perfil que se mide a lo largo de una línea en el terreno a partir de una plataforma en el aire o vehículos espaciales usando un altímetro láser. Imagen tomada de (Toth, 2009).	20
Figura 6. La reflectividad de un blanco difusor. Imagen tomada (Toth, 2009).	22
Figura 7. Ejemplo de nube de puntos en blanco y negro (imagen tomada (GimGEOMATICS, 2016)).	24
Figura 8. Mapa geológico de la zona de Morelia con ubicación de las fallas regionales NE-SW y EW, imagen tomada Garduño-Monroy <i>et al.</i> , (2001).....	32
Figura 9. Esquema que muestran el fenómeno de subsidencia producida por la extracción de agua subterránea y consolidación de los sedimentos en donde cruza una falla normal. En la figura de la izquierda se muestran los acuíferos y acuitardos (zona impermeable y semiconfinada, que transmite agua en proporción muy pequeña en comparación con un acuífero) con espacios (en los círculos) por que no se les ha extraído el agua. En la figura de la derecha se aprecia en las capas de los acuíferos, acuitardos y sedimentos sin espacio esto pasa en la realidad cuando se realiza la extracción del agua subterránea y las partículas del suelo se reacomoda.	33
Figura 10. Mapa de ubicación donde se colocó el Escáner Laser Terrestre (círculo rojo) sobre la calle Juan de Grijalva, para el monitoreo de la falla Chapultepec representada por una línea amarilla, fuente Inegi marco geoestadístico 2010 y Atlas de riesgos del estado de Morelia, Michoacán.	39
Figura 11. Mapa de ubicación donde se colocó el Escáner Laser Terrestre (círculo rojo) sobre la calle Halcón, para el monitoreo de la falla La Colina representado por una línea amarilla, fuente Inegi marco geoestadístico 2010 y Atlas de riesgos del estado de Morelia, Michoacán.	40
Figura 12. En las fotografías a y b se aprecia la colocación de taquetes y pijas, en donde fueron ubicados los tripies con reflectores. En la calle Halcón entre los puntos de control se tomó de referencia un poster imagen c y d en donde se colocó reflector de etiqueta.	42
Figura 13. En la imagen de la izquierda se muestra el Escáner Laser Terrestre VZ-1000 integrado con su cámara y antena WiFi, equipo utilizado en este trabajo de investigación, en la imagen de la derecha se aprecia el equipo montado sobre el tripie, listo para realizar un monitoreo.	43
Figura 14. En la imagen de la izquierda se aprecia el reflector cilíndrico de plástico montado sobre baliza y tripie. En la imagen de la derecha se aprecia el reflector de etiqueta plástica, colocado en un poster de luz.	43
Figura 15. Ruta para importar nube de puntos en el programa Riscan Pro 2.1.1.	45
Figura 16. Ruta para la colocación de los <i>tp</i> (puntos de control) en el programa Riscan Pro 2.1.1 utilizado para la unión de nubes.	46

Figura 17. Imagen tomada de la nube de puntos correspondiente a la calle Juan de Grijalva en donde se aprecian las fachadas de las casas, los números representan los tp (puntos de control) colocados con el programa Riscan pro, las zonas oscuras que se aprecian corresponden a las partes en donde obstáculos no permitieron el escaneo con el láser.....	46
Figura 18. Ruta para la delimitación del área de la nube de puntos.	48
Figura 19. Ruta para la construcción del TIN de las nubes de puntos en Global Mapper.49	
Figura 20. Ruta para la construcción de los perfiles de las nubes de puntos en Global Mapper.	50
Figura 21. Perspectiva en planta de la nube de puntos obtenida con Escáner Laser de la calle en Juan de Grijalva, los reflectores están representados por las letras R y se observan enumeradas según su orden escaneado. La línea roja representa en donde cruza la falla. Las elipses rojas representan las distintas posiciones en que se colocó el Escáner de igual manera enumeradas en el orden en que fue colocado. Las líneas blancas corresponden a los cables de luz obtenidos en el barrido con el equipo.....	52
Figura 22. Perspectiva en planta de la nube de puntos de la calle Juan de Grijalva, obtenida el 9/11/16. Los reflectores están representados por las letras R y se observan enumeradas según su orden escaneado. La línea roja representa la falla que cruza la calle. Las elipses rojas representan el orden de las distintas posiciones en que se colocó el Escáner. Las líneas que se observan son los cables de luz que se colaron en el barrido con el equipo.	54
Figura 23. En esta figura se aprecia la perspectiva en planta de la nube de puntos de la calle Juan de Grijalva. La línea roja representa la falla que cruza la calle. La elipse roja representa la posición en que se colocó el Escáner. Las líneas azules corresponden a cables de luz. Las zonas oscuras representan zonas “ciegas” o sombras provocadas por obstáculos.	56
Figura 24. Nube de Puntos Chapultepec, en donde se aprecian fachadas de casas sin afectación de subsidencia y sobre ellas puntos de control enumerados que se colocaron para georeferenciar con la nube obtenida el 9 de noviembre del 2015 de la misma calle.57	
Figura 25. Perspectiva tomada a partir de la nube de puntos en donde se muestra sin obstáculos (Ej. cables de luz, gente). Las zonas oscuras son sombras provocadas por obstáculos.	58
Figura 26. Perspectiva tomada a partir de la nube de puntos sin modificación. Las zonas oscuras son sombras provocadas por obstáculos.....	59
Figura 27. En la imagen se aprecia el TIN, en donde la línea azul representa el cruce de la falla en la calle, la elipse representa la ubicación del Escáner. Los triángulos que se observan alrededor son las zonas en donde se eliminaron árboles y carros; con la falta de puntos y mayor separación entre ellos se realizó un mallado con triángulos más grandes.	60
Figura 28. Localización del perfil realizado en la calle Juan de Grijalva (línea amarilla). ..	61
Figura 29. En la imagen se observa el perfil en donde se comparó las nubes hechas en la calle Juan de Grijalva, en donde se aprecia un desnivel de 45 cm entre el bloque de piso (distancia del perfil entre los 13m-14) y el bloque de techo (distancia 13.9m-17.5m). El bloque de piso en el segundo monitoreo el nivel de elevación sube y en el tercero monitoreo baja siendo que en este tramo debería de estar estable, estas variaciones fueron consecuencia de los errores de unión de cada nube. En la zona del perfil correspondiente al bloque de piso del tercer monitoreo baja en comparación a los otros	

dos, pero este descenso es mínimo y entra en el rango de 5 mm de error del equipo así que no se toma como dato para medir la subsidencia en esta zona de estudio, la cresta observada en la distancia a los 16m corresponde el sitio con sombra y no existen puntos en esa zona. 63

Figura 30. En esta figura se aprecia una imagen de la nube de puntos de la calle Halcón. La línea roja representa la falla que cruza la calle. Las elipses rojas y los números representan el orden de las distintas posiciones en que se colocó el Escáner. Los reflectores están representados por las letras R y se observan enumeradas según su orden escaneado. Las líneas que se observan son los cables de luz que se colaron en el barrido con el equipo. 65

Figura 31. En esta figura se aprecia una imagen de la nube de puntos de la calle Halcón. La línea amarilla representa la falla que cruza la calle. Las elipses naranja y los números representan el orden de las distintas posiciones en que se colocó el Escáner. Los reflectores están representados por las letras R y se observan enumerados según su orden escaneado. Las líneas blancas que se observan son los cables de luz que se colaron en el barrido con el equipo. 67

Figura 32. En esta figura se aprecia una imagen de la nube de puntos de la calle Halcón. La línea roja representa la falla que cruza la calle. La elipse roja representa la posición en que se colocó el Escáner. Las líneas blancas que se observan son los cables de luz que se colaron en el barrido con el equipo..... 68

Figura 33. Nube de puntos correspondientes a la calle Halcón, en donde se aprecia la fachada de una casa sin afectación de subsidencia y sobre ellas puntos de control enumerados que se colocaron para unir la nube de puntos de ese monitoreo con el resto. 69

Figura 34. Imagen nube de puntos en perfil monitoreada en la calle Halcón, dicha nube ya fue limpiada con el programa Riscan Pro en donde se eliminaron obstáculos como carros y cables de luz. 70

Figura 35. Imagen de nube de puntos en planta escaneada en la calle Halcón en donde se aprecia la imagen sin ninguna modificación. Es resultado crudo del monitoreo con el E.L.T, se logra apreciar árboles, trazas de línea que son los cables de luz. 70

Figura 36. En la figura se aprecia una línea roja que representa el cruce de la falla La Colina. La elipse representa la ubicación del Escáner. Los triángulos que se aprecian en la parte derecha es en donde se eliminaron puntos y zonas con sombra; con la falta de puntos y mayor separación entre ellos se obtuvo un mallado con triángulos con mayor tamaño..... 71

Figura 37. En esta figura se muestra el TIN a línea amarilla representa la trayectoria del perfil y las letras A-B la dirección del perfil. Las zonas de color negro que se aprecian son en donde no existe ningún punto, la elipse roja representa la zona en donde se colocó el ELT..... 72

Figura 38. En la imagen se aprecia los perfiles correspondientes al segundo monitoreo y cuarto monitoreo hecho en la calle Halcón, la zona de los perfiles correspondientes al bloque de piso (distancia 0-7.00m) se encontraron al mismo nivel sin hundimiento o elevación, dado que en esta zona no existe hundimiento. Pero a partir de la distancia 10m se observó que inicia un descenso del perfil correspondiente al cuarto monitoreo (perfil rojo) provocado por el cruce de la falla La Colina, en esta distancia se aprecia descenso de parte del perfil rojo identificado como subsidencia local. 74

Figura 39. En el perfil ubicado entre la distancia 7.428m -10.968m señalado por la elipse roja, se muestra que el perfil del cuarto monitoreo desciende de 1mm a 1.7cm, identificándose ésta zona como subsidencia diferencial, con una franja de afectación superficial de 3.54m. En el bloque de piso ubicado entre la distancia de 10.968-39.476m se aprecia que el hundimiento vuelve a ser casi constante..... 76

Figura 40. Imagen tomada de la nube de puntos de la calle Halcón en donde los puntos de verde son tomados sin desplazamiento por que se encuentra dentro del rango de error del equipo entre los 5 mm, mientras que se observa mayor concentración de los vectores de desplazamiento en el techo entre los - 4 mm hasta los -1.3 cm representados por los puntos de color amarillo. 77

Figura 41. Imagen tomada de la nube de puntos de la calle Halcón en donde se compararon nubes de puntos tomada el 9 de nov. Del 2015 con la nube del 27 de junio del 2016, los puntos de color verde son tomados sin desplazamiento por que se encuentra dentro del rango de error del equipo entre los 4 mm, mientras que se observa mayor concentración de los vectores de desplazamiento representado por los puntos de color amarillo en la parte del techo y ventanas entre los - 4 mm hasta los - 1.3 cm. 78

Figura 42. Comparación de nubes correspondientes a solo la calle Halcón, sin los inmuebles, en donde los puntos amarillos (casi color mostaza) representan la zona con niveles negativos entre los 9 mm - 1.5 cm correspondientes a los afectados por subsidencia y los puntos verdes y amarillos claro que se encuentran en el bloque de piso son identificados como zona sin subsidencia ya que se mantienen en valores de 0 cm hasta los 8 mm ya que el rango de error del equipo es de los 5mm. El bloque de piso se encuentra casi fijo y el bloque de techo es el que se mueve 79

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de métodos de monitoreo de la subsidencia con sus ventajas y desventajas.....	27
--	----

Resumen

La subsidencia diferencial es un fenómeno natural o inducido provocado por la combinación de dos o más actividades, se presenta en terrenos afectados por subsidencia local, pero las áreas afectadas se distinguen por que la velocidad de movimiento vertical cambia drásticamente.

Tal es el caso de Morelia, Michoacán en donde la subsidencia diferencial es provocado por dos factores: el material en el que se construyó es lacustre, y por su deposición en antiguas fallas sinsedimentarias. En esta tesis se trabajó con una nueva metodología y tecnología que mejoró, los resultados obtenidos hasta la fecha mediante el uso del Escáner Laser Terrestre (ELT), aplicados en calles Juan de Grijalva y Halcón en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Se realizaron monitoreos multitemporales en las fallas geológicas La Colina, en la calle Halcón y falla Chapultepec, en la calle Juan de Grijalva de la ciudad de Morelia se eligió estudiar estas fallas y calles por que la afectación por subsidencia en la calle Halcón es muy evidente, en comparación a la calle Juan de Grijalva.

Sin embargo las afectaciones de las viviendas de esta última calle han sido representativos. Se obtuvieron y compararon nubes de puntos registradas mediante el uso del ELT, las cuales fueron procesadas mediante etapas para la obtención de los resultados de este trabajo de investigación.

Mediante el procesamiento y comparación de las nubes de puntos de cada monitoreo se logró la medición de la subsidencia local dando 2cm de noviembre del 2015 a junio del 2016 y una velocidad entre ese rango de 0.286 mm/mes, respecto a la franja de afectación por subsidencia diferencial se obtuvo 3.54m.

Palabras clave: Subsidencia diferencial, escáner, nube de puntos, Morelia, fallas

Abstract

Differential subsidence is a natural or induced phenomenon caused by the combination of two or more activities, is presented in land affected by local subsidence, but the affected areas are distinguished by the speed of vertical movement changes drastically.

Such is the case of Morelia, Michoacán where differential subsidence is caused by two factors: the material in the lake is to be built, and by his deposition in ancient synsedimentary faults. In this thesis, working with a new methodology and technology improved, the results obtained to date through the use of Terrestrial Laser Scanner (ELT), applied in streets Juan de Grijalva and Hawk in the city of Morelia, Michoacán.

Multi-temporal monitoring were carried out in the geological faults The Hill, in the street Hawk and fails Chapultepec, in the street Juan de Grijalva from the city of Morelia is chose to study these failures and streets that the affectation by subsidence in the street Hawk is very evident, in comparison to the street Juan de Grijalva.

However the effects of the housing of this last street have been representative. Were obtained and clouds of points recorded by the use of the ELT, point clouds were processed by stages to obtain the results of this research work.

Through the processing and comparison of the clouds of points of each monitoring was the measurement of local subsidence giving 2cm from November 2015 to June 2016 and a speed between that range from 0,286 mm/month, with respect to the strip of land affected by subsidence differential 3.54m was obtained.

Key words: differential subsidence, scanner, point cloud, Morelia, failures.

Introducción

La subsidencia o hundimiento del terreno es un fenómeno que se caracteriza por presentar descensos verticales de la superficie. En ocasiones el hundimiento puede variar desde milímetros a metros y en periodos de tiempo de horas hasta años. Sus principales factores detonantes son naturales y en ocasiones acompañada por actividades antropogénicas (Hernández-Madrigal *et al.*, 2011).

Entre los factores condicionantes que más influyen en este fenómeno se encuentran la actividad tectónica; existencia de flujos subterráneos de agua; terrenos con suelos granulares y no consolidados; existencia de rocas carbonatadas; construcción de minas, túneles; y secuencias sedimentarias granulares afectadas por fallas sin sedimentarias. (Tomas *et al.*, 2011)

Entre los detonantes de la subsidencia se encuentra la extracción de agua subterránea, licuefacción, la disolución de rocas carbonáticas, el derrumbe de minas y túneles o explotación de minerales, la construcción en terrenos lacustres adiciona carga llevando a la compactación del material fino del terreno. (Tomás *et al.*, 2009).

El desarrollo de subsidencia regional en litologías no consolidadas como materiales lacustres y fluviolacustres, depositadas sobre antiguas fallas geológicas o paleorelieves abruptos; dan origen a una subsidencia diferencial. Esta se distingue por que la velocidad de hundimiento de ciertos tramos de una misma zona es acelerado y diferente al hundimiento normal de la subsidencia que existe en la región, provocando pronunciados desniveles de terreno (Tomás *et al.*, 2009).

La subsidencia diferencial presente en Morelia es provocada por dos factores: el material en el que se construyó es lacustre, y por su deposición en antiguas fallas sinsedimentarias (Ávila-Olivera *et al.*, 2006). Los detonantes en este caso son la extracción de agua subterránea y la carga aplicada por las construcciones en el material lacustre (Ávila-Olivera *et al.*, 2006).

El tema de investigación aquí propuesto surge por la problemática de subsidencia diferencial que presenta Morelia, Michoacán, la cual ha provocado diversas

pérdidas económicas, por ubicarse en zonas lacustres y principalmente en fallas sinsedimentarias (Ávila-Olivera *et al.*, 2006). El fenómeno en estudio induce el deterioro progresivo de los inmuebles, calles y carreteras.

Otros problemas que genera la subsidencia diferencial en Morelia, son el estancamiento de agua de colonias en temporadas de lluvias, ya que el nivel del suelo no es igual en toda la mancha urbana; así como la falta de agua potable ya que este fenómeno provoca la ruptura de tuberías. (Hernández-Madrugal *et al.*, 2011).

Los trabajos de monitoreo que se tienen sobre este fenómeno en Morelia, están basados en medir el nivel del suelo y su descenso en periodos de tiempo. Los puntos de control que toman como base para los monitoreos se encuentran separados entre ellos, a distancias consideradas perdiéndose información entre cada punto.

Hipótesis

El monitoreo multitemporal aplicando la tecnología del Escáner Laser Terrestre, permitirá discernir los componentes vertical y lateral de la subsidencia diferencial, así como su franja real de afectación en las áreas de estudio.

Metodología

La metodología utilizada se realizó en 9 etapas principales iniciando con la recopilación de material cartográfico, la información recopilada fue procesada mediante un Sistema de Información Geográfico (SIG), dando como resultado mapas para la planeación de las campañas de monitoreo, mediante el uso del Escáner Laser Terrestre. Después de que se realizaron los monitoreos se trabajó con las nubes de puntos de cada salida a campo. En las últimas etapas las nubes se procesaron para obtener redes de triángulos irregulares (*Triangulated Irregular*

Networks -TIN-) y perfiles topográficos. Finalmente la comparación de éstos permitió medir la subsidencia regional de las calles en estudio, la velocidad de hundimiento y detectar la franja de afectación superficial por subsidencia diferencial.

Justificación

El interés de este proyecto de investigación consiste en lograr medir la franja de afectación, de la subsidencia diferencial mediante el uso de la tecnología del Escáner Laser Terrestre, y medir la posible existencia de una componente lateral. Todo ello a través de la comparación de las nubes de puntos obtenidas en cada monitoreo, y vectores de deformación en los inmuebles, calles y banquetas afectados por la subsidencia.

Los dos sitios en donde se realizaron los monitoreos fueron elegidos porque en la calle Juan de Grijalva (figura 1) actualmente se presenta con poca actividad de subsidencia diferencial, en comparación con la otra zona de estudio correspondiente a la calle Halcón (figura 2), que presenta mayor afectación por la subsidencia diferencial, pero sin embargo la afectación de las calles y viviendas en estudio han sido importantes, incluso una casa ubicada en la calle Juan de Grijalva (figura 1b) ha sido reconstruida.

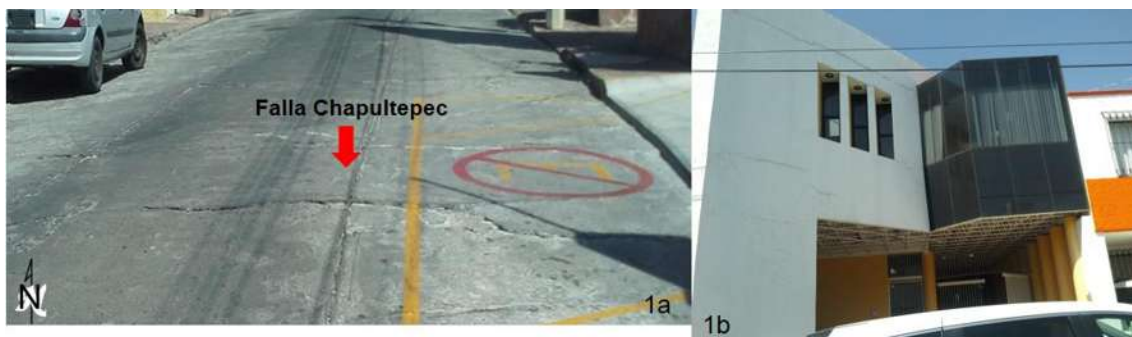


Figura 1. Calle afectada por la subsidencia diferencial (a) y en la figura (b) se aprecia la casa con mayor afectación ambas fotos son tomadas en la calle Juan de Grijalva.



Figura 2. Se aprecia la calle Halcón afectada por la falla La colina (a), (b) corresponde a casa identificada como afectada por la subsidencia diferencial, (c) ambas ubicadas en el bloque de techo de la falla La Colina.

Se pretende que esta tesis sea una herramienta valiosa de consulta para futuros trabajos relacionados, ya que la aplicación de dicho equipo es nuevo en nuestro país.

Objetivos

En consecuencia de lo anterior, el objetivo general consistió en aplicar la tecnología del Escáner Laser Terrestre para el monitoreo de la subsidencia diferencial en las calles Juan de Grijalva y Halcón de la ciudad de Morelia, Michoacán.

Se alcanzaron los siguientes objetivos específicos: Recopilar material cartográfico e implementar la información en un Sistema de Información Geográfico; diseñar un método de levantamiento, edición y corrección de nubes de puntos; realizar campañas de monitoreo de los sitios de estudio aplicando la técnica del Escáner Laser Terrestre, e identificar desplazamientos horizontales, verticales, y definir franja de afectación por subsidencia diferencial.

Este trabajo consta de seis capítulos en el primer capítulo se realizó el planteamiento del problema mediante la exposición de la problemática actual a la subsidencia diferencial en Morelia, Michoacán.

En el segundo capítulo se revisaron los fundamentos teóricos con especial énfasis en la identificación de los distintos factores condicionantes, las diversas técnicas e instrumentos utilizados para la investigación de este fenómeno. Posteriormente, en el capítulo tercero se desarrolló la metodología seguida para lograr los objetivos planteados en el trabajo de investigación, en este apartado se encuentra descrito el equipo y software utilizado.

En el cuarto capítulo se describe al área de estudio, estableciendo su ubicación, distribución de población, fallas existentes, y el respectivo mapa de ubicación de zonas monitoreadas a través del Escáner Laser Terrestre. A continuación, en el capítulo quinto se presentan los resultados. Posteriormente en el sexto capítulo se realizó la discusión de resultados y se enuncian las conclusiones y finalmente en el séptimo las recomendaciones.

1. Fundamentos Teóricos

1.1 Bases teóricas

Existen diversos equipos modernos utilizados para el monitoreo de la subsidencia diferencial tales como los que se mencionan a continuación:

InSAR es conocido como una herramienta para la captura de información cartográfica porque utiliza sensores activos, la interferométrica con imágenes SAR, es una aplicación de las imágenes radar que presenta perspectivas de futuro en cuanto a la extracción de topografía (R. Pala, *et al.* 2001).

En este trabajo de investigación se utilizó un nuevo equipo para el monitoreo de la subsidencia, la tecnología del Escáner Laser Terrestre sus operaciones son basadas en el uso de un láser constando en dos métodos principales, el primero de estos implica la medida con un pulso corto, que debe llegar al objeto que es medido y regresar al instrumento (figura 3). (Toth, 2009).

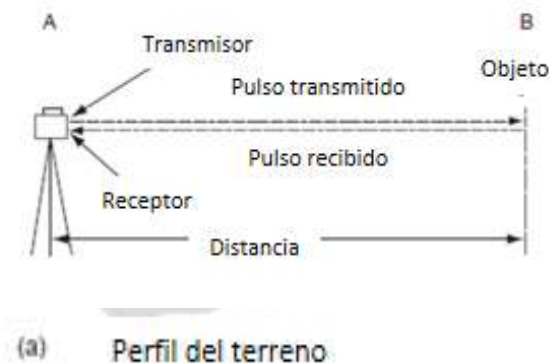


Figura 3. Operación de envío y recepción del láser. Imagen tomada de (Toth, 2009).

El segundo método consiste en la transmisión y recepción de versiones de un patrón ondulatorio del láser midiendo la diferencia de fase entre ellos, la amplitud (o intensidad) de la radiación del láser, será modulada por una señal sinusoidal.

Para la obtención de los perfiles a través del Escáner terrestre el equipo trabaja con una serie de pasos mediante la sucesiva medición de distancias y ángulos

verticales (V) a cada punto de la zona a escanear, que es grabado y almacenado en la memoria del aparato (figura 4). (Toth, 2009).

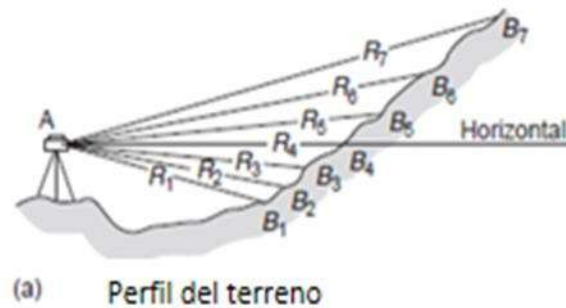


Figura 4. Medición de las gamas de inclinación (R) y los ángulos verticales por el Escáner. Imagen tomada de (Toth, 2009).

Cuando el equipo es aéreo, este es montado sobre un aeroplano, se coloca señalando verticalmente hacia la tierra para dejar una serie rápida de medidas de las distancias de la zona en estudio. Las medidas de las distancias verticales de la plataforma son puntos adyacentes a lo largo de la pista de tierra, la ubicación es dada con un GPS (figura 5) (Toth, 2009).

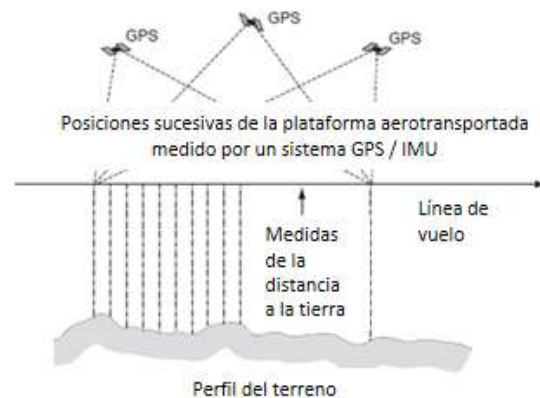


Figura 5. Perfil que se mide a lo largo de una línea en el terreno a partir de una plataforma en el aire o vehículos espaciales usando un altímetro láser. Imagen tomada de (Toth, 2009).

Los fundamentos de la obtención de datos en el equipo es el láser, el cual esencialmente es un dispositivo óptico, emite pulsaciones de radiación monocromática en donde todas son coherentes y en fase hacia una dirección específica. El láser es normalmente clasificado según el tipo de material; los tipos

más comunes son láser gasista, laser sólido, total y láser semiconductor, los menos utilizados son láser líquido y láser de tinte. (Toth, 2009).

El uso de equipos con láser tiene riesgos, entre ellos se clasificaron cuatro categorías, especialmente en relación con causar daño a los ojos de personas o piel, como:

Clase I: Estos comprenden el láser y sistemas basados en láser que no emiten radiación en los niveles de riesgo conocidos y están exentos de los controles de riesgo de radiación durante su funcionamiento en el campo (Toth, 2009).

Clase IA: Este es un grupo especial con una potencia superior de 4,0 mW, cuando la emisión no excede los límites de 1000 s. En la práctica, sólo se aplica al láser que no están destinados a verse (son peligrosos al ojo humano). (Toth, 2009).

Clase II: Estos son los láseres de baja potencia de luz visible que emiten su radiación por encima de los niveles de clase I, pero a una potencia radiante no por encima de 1 mW. (Toth, 2009).

Clase IIIA: Estos comprenden láseres con niveles de potencia intermedios láser en el rango de 1-5 mW que sólo son peligrosos para su visualización al rayo. (Toth, 2009).

Clase IIIB: Estos comprenden láseres con potencia moderada, por ejemplo las emisiones para láser de CW que operan en el rango de 5-500 mW; o láser pulsados con salidas hasta 10 J / cm². (Toth, 2009).

Clase IV: Esta categoría incluye el láser con niveles de potencia superiores a las de la Clase IIIA. Son peligrosos para ver en cualquier circunstancia; además de lo cual, son un peligro para la piel; y potencialmente un peligro de incendio. (Toth, 2009).

Otro punto importante para ser considerado en términos de rendimiento en equipos con láser es la reflectancia, que es formalmente definida como la relación de la radiación enviada a una superficie particular y la radiación reflejada enviada de regreso al equipo desde esa superficie. Si la señal es muy débil, al regreso se

reducirá y ninguna señal de retorno detectable alcanzará el receptor. Las propiedades de retro dispersión de la pieza particular de planta u objeto que se miden son cuestiones de considerable importancia (figura 6). (Toth, 2009).

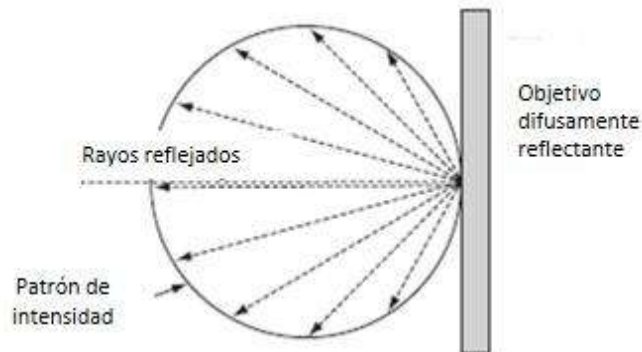


Figura 6. La reflectividad de un blanco difusor. Imagen tomada (Toth, 2009).

Existen equipos de escáner aéreo y terrestre, el utilizado en este estudio es de tipo terrestre que se clasifican según las características en donde es colocado el equipo como puede ser: en estático que miden los rasgos topográficos que están presentes en el suelo en el área alrededor de la posición fija que ha sido ocupado por el instrumento, lo hacen a través de la medición simultánea de la distancia oblicua por un visor láser. Produce una serie de mediciones sucesivas de rango. (Toth, 2009).

El Escáner Láser Terrestres se clasifica en función de sus respectivos mecanismos de exploración y cobertura utilizadas. En los escáneres de tipo panorámica es la distancia y mediciones angulares en un patrón sistemático que da un total de 360° de cobertura angular en el plano horizontal, que pasa a través del instrumento de centro y por lo general un mínimo de 180° de cobertura en el plano vertical. (Toth, 2009).

Sin embargo, el campo de visión del equipo será de 270° o más, lo cual significa que una cobertura sustancial de la tierra situada por debajo del instrumento del plano horizontal se puede lograr. De hecho, el único hueco o vacío será una esfera completa que es en donde se ubica la base del Escáner y su trípode de soporte.

Los instrumentos incluidos en la segunda categoría de escáneres son aquellos donde la acción de exploración no está restringida alrededor de un eje de rotación, generalmente el movimiento de exploración horizontal en la dirección de acimut producido por una rotación del instrumento alrededor de su eje vertical. Sin embargo, el movimiento de exploración angular vertical de elevación alrededor del eje horizontal del instrumento está restringido a 50°- 60° (Toth, 2009).

Los escáneres de tipo cámara que conforman la tercera categoría de llevar a cabo su distancia y medidas en un intervalo angular mucho más limitado, realizando exploraciones sistemáticas de los alrededores de más de un campo angular de 40° x 40°, de la misma manera que una cámara fotogramétrica (Toth, 2009).

Puede ser clasificado con base al rango o distancia en varios grupos, en la primera clasificación es limitado a cortas distancias de hasta 100 m; de hecho algunos se limitan a una distancia de 50-60 m.

En la segunda clasificación el escáner puede medir más de medio rango con valores máximos de 150 y 350 m con menor precisión. Mientras que en el tercer grupo son de largo alcance, de nuevo utilizando el impulso de referencia técnica, puede medir largas distancias de hasta 1 km o más en el caso del instrumento Optech ILRIS-3D. Sin embargo, la ganancia en el rango es normalmente acompañada de una reducción en la precisión de la medida de distancias, aunque esto sigue siendo apropiado para las aplicaciones y es muy aceptable para los usuarios de estos instrumentos. (Toth, 2009).

Otro método además del estático para la obtención de datos con el escáner es el modo dinámico, el escáner láser es montado rígidamente en un poste unido al lado de una camioneta que contiene dos computadoras; una que se utiliza para la navegación de rutas, la otra para el control del sistema y fines de registro. El equipo incluye una cámara de vídeo de alta resolución que se integra con el GPS. (Toth, 2009).

Para la realización del barrido con el equipo se coloca apuntando hacia delante e inclinado ligeramente hacia abajo, por lo que proporciona una exploración

horizontal o franja con una cobertura angular de 60°. Durante un segundo escaneo a lo largo del mismo tramo de carretera, el escáner se gira y se restablece a escanear verticalmente desde el lado del vehículo produciendo cobertura de barrido lateral que se extiende de 5 a 100 m de lado del vehículo. (Toth, 2009).

El sistema ha mejorado de manera constante, el uso de escáneres láser con frecuencias más altas y mayor rango angular. Por otra parte, las cámaras digitales de marcos han sido sustituidas por línea de barrido transversal que utiliza el movimiento hacia delante del vehículo para producir imágenes de barrido lineal continuo. El uso del escáner móvil se ha utilizado para la realización de mapas y cartografía, y edificaciones de grandes extensiones complejas hasta para el monitoreo de seguridad militar. (Toth, 2009).

Los registros de datos en 3D obtenidos mediante el uso del láser del equipo se le conoce como nube de puntos y consiste en un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional, que normalmente se definen mediante coordenadas X, Y y Z. Dicha información se considera como partida para extraer posteriormente alzados, secciones, modelos 3D, ortoimágenes, aplicaciones de visualización, animación, renderizado, etc. La nube puede ser realizada tanto en escala de grises, empleando el valor de reflectancia registrado por el láser como en color, integrando la información de color (figura 7) (GimGEOMATICS, 2016).

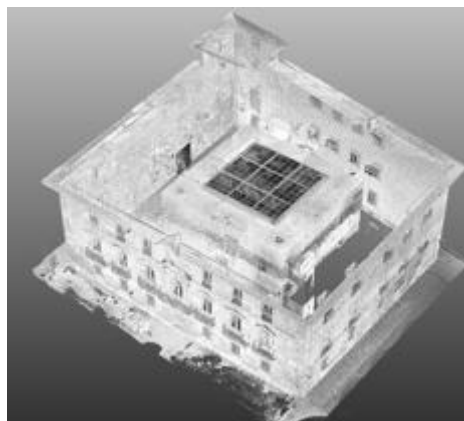


Figura 7. Ejemplo de nube de puntos en blanco y negro (imagen tomada (GimGEOMATICS, 2016)).

Con el procesamiento de las nubes de puntos se pueden realizar diversos trabajos como es la unión mediante un *TIN*, que es una red triangular irregular; es el método más habitual para interpolar datos de elevación. Los puntos constituyen los vértices de triángulos irregulares interconectados entre sí, que se utilizan para interpolar contornos y generar perfiles, las líneas que conforman la triangulación de superficie se denominan líneas *TIN* (Autodesk, 2016).

1.2 Antecedentes

La subsidencia del terreno es un fenómeno que afecta a países como China, Italia, Estados Unidos, España, México, entre otros, la cual se ha asociado con la sobreexplotación de aguas subterráneas, fallas geológicas, actividad minera y disolución natural del terreno, son diversas las actividades que lo originan.

El hundimiento vertical de la ciudad de Como, ubicada al norte de Italia, ha sido verificado y evaluado mediante el análisis de aproximadamente 100 pozos de agua. Valerio Comerci *et al.*, (2007) realizaron perfiles estratigráficos, análisis de laboratorio (mineralógico, orgánico y de polen contenido) de cada pozo, logrando medir la profundidad de los sedimentos lacustres, la velocidad de sobre explotación del acuífero y a su vez la velocidad de la subsidencia.

El hundimiento provocado por los campos geotérmicos de la Zona Volcánica de Taupo (Nueva Zelanda) se monitoreo mediante imágenes InSAR (satélites ERS, Envisat) con datos de radar que abarcan desde 1996 hasta 2005. Con los resultados obtenidos se mapeó la deformación provocada por la subsidencia en cinco de los campos geotérmicos muy utilizados en la zona volcánica de Taupo, obteniendo una densa cobertura espacial entre los resultados comparados del radar y zonas con subsidencia (Hole *et al.*, 2007).

Tung *et al.*, (2012) hicieron uso de InSAR (PSInSAR), para medir la velocidad del hundimiento del suelo en Taiwán entre los años 1996 a 1999, ubicando los municipios Baojhau, TUKU y Yuanchang Cantones con mayor tasa de subsidencia

de 7.8 cm/año, provocado por extracción de agua subterránea y actividad de las placas tectónicas.

Liu *et al.*, (2012) en China realizaron un trabajo aplicando la técnica GPS RTK en casos de subsidencia minera, mientras que Hung *et al.*, (2012) midieron la subsidencia en Changhua condado en el centro de Taiwán causada por la extracción de agua subterránea mediante el uso del GPS, concluyó que este equipo es una herramienta muy eficaz para el monitoreo de la subsidencia, mientras su error sistemático vertical y el error de transformación de la altura se pulan. Hung *et al.*, (2012) recomienda que los resultados obtenidos se trabajen en el software COMPAC.

El hundimiento del terreno en Jakarta y Bandung se midió mediante técnicas geodésicas como son GPS, imágenes satelitales InSAR y el equipo A-10 gravímetro absoluto (mide la aceleración vertical de la gravedad). Se realizó el monitoreo de las variaciones hidrológicas apoyándose con imágenes de satélite tipo InSAR y salidas al campo para la localización de los puntos críticos con GPS, que fueron los puntos de control. Como resultado se obtuvo el monitoreo de las zonas con mayor peligro y se concluyó que el descenso del nivel del agua freática causa de la subsidencia en el área de estudio (Agus *et al.*, 2014).

En California el DWR (California Department of Water Resources, 2016) monitoreó 11 zonas en el Valle de Sacramento mediante el uso de extensómetros de pozo obteniéndose buenos resultados, este equipo consistió en un tubo o cable anclado en la parte inferior de un revestimiento del pozo.

La tubería se extiende desde el fondo del pozo, a través de las capas geológicas susceptibles a la compactación, a la superficie del suelo. El tubo está conectado a un registrador que mide la distancia relativa entre la parte inferior del agujero de perforación a la superficie del suelo. Con este equipo se pueden determinar las propiedades hidráulicas y mecánicas del sistema acuífero.

En la siguiente tabla (tabla 1) se muestra los diferentes métodos de monitoreo de la subsidencia además de los ya mencionados anteriormente.

Tabla 1. Comparación de métodos de monitoreo de la subsidencia con sus ventajas y desventajas.

Método de monitoreo	Ventajas	Desventajas	Cita
GPS	<p>Las estrategias de análisis están optimizadas para tener en cuenta todas las variaciones temporales conocidas que afectan a la señal GPS. También pueden proporcionar estimaciones del contenido de agua de la troposfera, que luego pueden ser asimilados en el análisis</p> <p>Interferometría radar de apertura sintética (InSAR) para mejorar la exactitud de los resultados.</p>	<p>Las principales limitaciones son que requiere importante trabajo en campo, proporciona información en lugares discretos solamente si se instalan sitios de monitoreo continua y son relativamente caros de instalar y operar una red continua de sitios de GPS.</p>	McClusky <i>et al.</i> , 2013
Nivelación óptica	<p>Sencillo y directo, se enfoca en medir los cambios de altura, pueden ser muy precisa en distancias cortas (hasta unos pocos km)</p>	<p>Requiere de mucho tiempo y mucha mano de obra para su ejecución; no es apropiado para la deformación del suelo a gran escala.</p>	McClusky <i>et al.</i> , 2013
Inclinómetros	<p>Permitir medir las variaciones del gas subterráneo, obteniéndose información potencialmente útil en la búsqueda de gas natural.</p>	<p>Los inclinómetros no miden directamente el hundimiento de la superficie; más bien, las inclinaciones deben integrarse al movimiento en la superficie. Se</p>	McClusky <i>et al.</i> 2013

		<p>requiere algo de calibración de los instrumentos con el fin de mantener la precisión del nivel.</p> <p>Los inclinómetros son relativamente caros.</p> <p>Una red de ~ 40 inclinómetros para supervisar una superficie de 500 x 500 m costaría alrededor de \$36,000 / month¹⁰</p>	
InSAR	<p>Cubren un área de 100 km x 100 km y 30 km x 50 km. Las imágenes InSAR adquiridas desde 1992 permiten estudiar las áreas que en la actualidad no han sido estudiados con sistemas de sensores terrestres.</p>	<p>Las técnicas de DInSAR deben ser considerados como complementarias, en lugar de un reemplazo completo de las técnicas basadas en tierra para el monitoreo del hundimiento. Siempre se deben combinar con GPS</p>	McClusky <i>et al.</i> 2013
LIDAR terrestre o escáner laser terrestre (SLT)	<p>Con los resultados obtenidos se pueden realizar DEM 3D, este equipo proporciona un sistema flexible de obtención y tratamiento de datos.</p> <p>Los monitoreos son rápidos, el TLS es una tecnología disponible en el</p>	<p>Sólo es útil para el seguimiento de los procesos de deformación y de subsidencia muy localizados. Requiere topógrafo experimentado que entienda las limitaciones de los sistemas TLS.</p>	McClusky <i>et al.</i> 2013

	mercado.	Requiere una estrategia de recolección de datos bien diseñado para evitar las regiones sombreadas y optimizar la exactitud del MDE.	
InSAR aerotransportado	Las observaciones pueden ser programadas en cualquier momento. Las observaciones pueden ser recogidas de diferentes ángulos y direcciones de observación que permiten un completo MDE.	El costo de la construcción, mantenimiento y operación de una plataforma dedicada a aeronaves SAR es muy alto. Aunque es muy prometedor para el control estricto del hundimiento del suelo, los sistemas actualmente están todavía en la fase de desarrollo.	McClusky <i>et al.</i> 2013
InSAR terrestre	Capacidad para controlar de manera muy precisa los desplazamientos 2D desde una posición remota, sin la instalación de los objetivos o sensores; puede alcanzar altas velocidades de muestreo de la zona de estudio en pocos minutos y proporcionar densidad espacial relativamente	El tamaño de los equipos comerciales (hasta 3 metros de largo); sólo se puede medir el desplazamiento a lo largo de la línea de visión del instrumento; existe la posibilidad de ambigüedad de fase de la señal de gran deformación. Alcance limitado a menos de 5 km. En zonas sombreadas	McClusky <i>et al.</i> 2013

	alta de observaciones.	existe perdida de información.	
--	------------------------	--------------------------------	--

1.2.1 Estudios de la subsidencia en México

Zermeño *et al.*, (2005) realizaron el monitoreo de la subsidencia por extracción de agua subterránea en Aguascalientes, mediante el método de medición con GPS ubicando los puntos de control sobre monumentos, apoyándose con datos del subsuelo obtenidos de la Comisión Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes, (CCAPAMA) y monitoreo del volumen del agua extraído de los pozos ubicados en la zona urbana. Con los datos obtenidos lograron medir el desplazamiento vertical del terreno a través del tiempo y ubicar mediante un mapa de las zonas con tasas de subsidencia (Zermeño *et al.*, 2005).

Sarychikhina *et al.*, (2011) usaron imágenes InSAR para medir la subsidencia en Mexicali, en este caso es inducida por la extracción de fluidos geotermales en el campo geotérmico Cerro Prieto, localizado en el Valle de Mexicali. Se basaron en imágenes InSAR en donde se obtuvo la dinámica del proceso de subsidencia en el área de estudio y su relación con los cambios en extracción de fluido en el campo geotérmico en donde se registró mayor nivel de subsidencia.

Cabral *et al.*, (2011) hicieron mediante el uso de InSAR, mapas de peligro relativo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, con la idea de permitir una mejor planeación y mejoramiento del uso de suelo en áreas de alta vulnerabilidad a la subsidencia por abatimiento del nivel freático (Cabral *et al.*, 2011).

Para el análisis de subsidencia Chaussard *et al.*, (2014) emplearon un método similar al de Sarychikhina *et al.*, (2011), donde obtuvieron que 17 son las ciudades con mayor índice de subsidencia en México: Puebla, Ciudad de México (y área metropolitana, como Ciudad Netzahualcóyotl), Toluca, Querétaro, San Luis de la Paz, San Luis Potosí, Morelia, Celaya, Salamanca, Irapuato, Silao, León,

Aguascalientes, Zamora, Guadalajara, Ahuacatlán y Tepic. Con la metodología que utilizó logró clasificar las ubicaciones de subsidencia e hizo categorías con respecto a velocidad de hundimiento (Chaussard *et al.*, 2014).

1.2.2 Estudios de la subsidencia en Morelia

A escala local, desde 1983 se empezaron a apreciar problemas de hundimientos diferenciales en Morelia a lo largo de trazas lineales, ocasionando daños importantes en obras civiles motivo por el que Garduño-Monroy *et al.*, (2001) monitorearon las fallas geológicas (figura 8).

Las zonas dañadas son preferencialmente de dirección NE-SO, pero también se observan fallas con dirección E-O. Mediante el monitoreo de las fallas logró medir la velocidad de hundimiento de algunas. En la falla Central Camionera, actualmente falla Nocupétaro, se tenía una velocidad de hundimiento de 6cm/año; mientras que en la falla Chapultepec de 4-5cm/año; y en la falla la colina de 4-6cm/año.

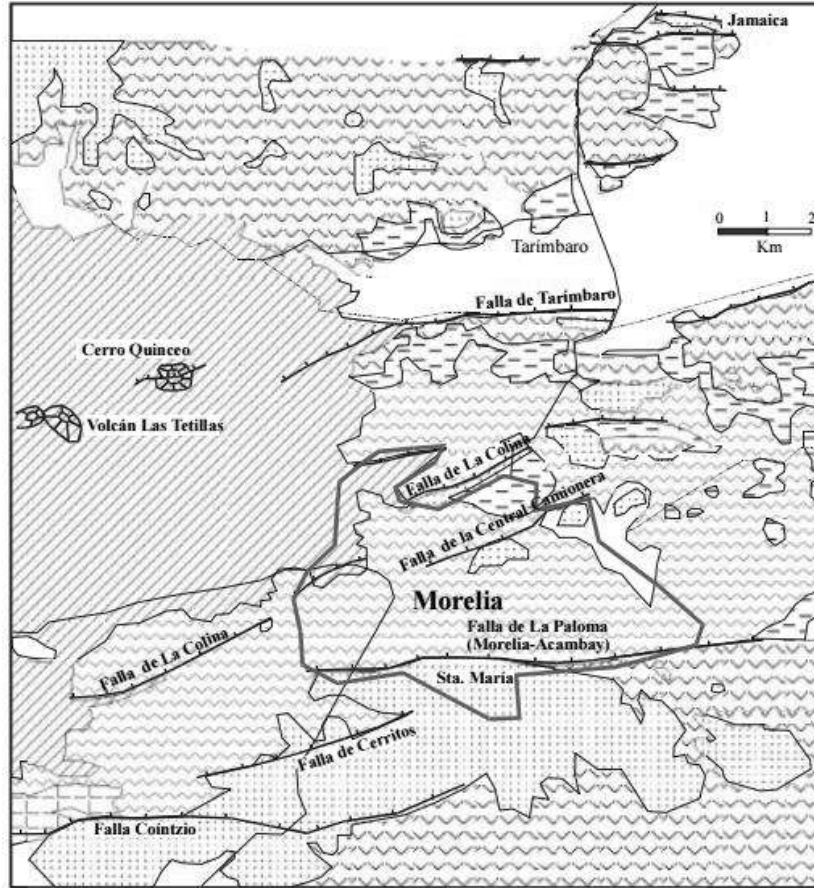


Figura 8. Mapa geológico de la zona de Morelia con ubicación de las fallas regionales NE-SW y EW, imagen tomada Garduño-Monroy *et al.*, (2001).

Para el análisis de este problema Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2006) midieron el abatimiento de los niveles freáticos, así como el espesor de los sedimentos lacustres y fluviolacustres en los bloques que se hundían de las fallas geológicas y de algunos pozos profundos. Con los resultados obtenidos lograron estimar los posibles futuros saltos restantes si se continúa con la extracción del agua subterránea entre los bloques de las fallas geológicas en estudio de Morelia, los cuales van de los 0.40m a los 6.59m.

En la imagen 9 se aprecian perfiles que presentan el fenómeno de Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF).

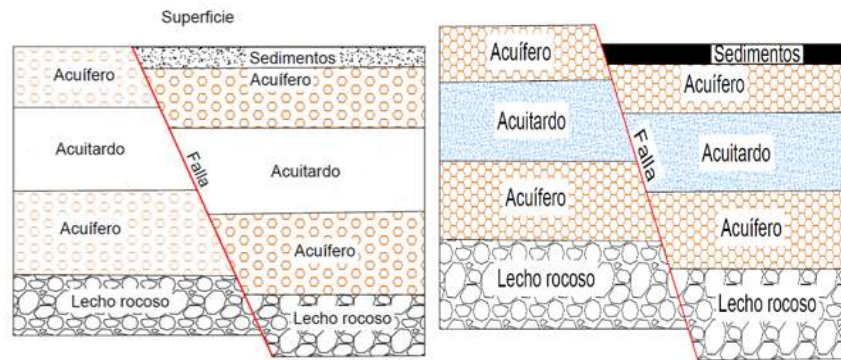


Figura 9. Esquema que muestran el fenómeno de subsidencia producida por la extracción de agua subterránea y consolidación de los sedimentos en donde cruza una falla normal. En la figura de la izquierda se muestran los acuíferos y acuitardos (zona impermeable y semiconfinada, que transmite agua en proporción muy pequeña en comparación con un acuífero) con espacios (en los círculos) por que no se les ha extraído el agua. En la figura de la derecha se aprecia en las capas de los acuíferos, acuitardos y sedimentos sin espacio esto pasa en la realidad cuando se realiza la extracción del agua subterránea y las partículas del suelo se reacomoda.

Para medir el hundimiento del suelo Cigna *et al.*, (2011) utilizaron la tecnología InSAR mediante diferentes momentos, obtuvieron que las altas tasas de subsidencia se presentan cerca de las trazas de las fallas de la ciudad de Morelia. Con base en sus observaciones de campo Identificó 80 cm de diferencia entre 1983 y 2001 (equivalente a aproximadamente 4.5 cm / año de hundimiento si la tasa de deformación es constante) (Cigna *et al.*, 2011).

Según los trabajos de investigación previos, relacionados a la subsidencia en Morelia, el hundimiento esta ligado a la extracción de agua subterránea y presencia de fallas geológicas en donde la segunda ha ido evolucionando en cuestion a espacio-temporal desde 1985 posiblemente hasta la fecha. De acuerdo con Garduño-Monroy *et al.*, (2001), la falla La Colina tiene una trayectoria de 1300m de longitud y la falla Chapultepec de 55 m de longitud.

El monitoreo que se realizó para medir el desplazamiento de las fallas mencionadas fue desde el punto de vista de la geología estructural por Garduño-Monroy, *et al* (2001), mientras que Ávila-Olivera, *et al.* (2006) hicieron uso de la medición del abatimiento del nivel freático, así como el espesor de los sedimentos lacustres y fluviolacustres en bloques bajos de las fallas geológicas; y Cigna *et al.*, (2011) utilizaron la tecnología InSAR. Con el paso de los años los métodos de monitoreo de la subsidencia han ido evolucionando en la búsqueda de precisión y

obtención de resultados que complementen o afirmen lo que se ha alcanzado en la actualidad.

1.2.3 Monitoreo a través del ELT en trabajos de investigación

Diversos trabajos de investigación en el mundo utilizan el Escáner Laser Terrestre (ELT) para el monitoreo de edificaciones que forman parte del patrimonio cultural del país, monitoreo de deslizamientos, vegetación, minería y estudios de geología; entre los que destacan:

El trabajo de Abellán *et al.*, (2006) para la realización del inventario, monitoreo, modelamiento y cuantificación de volumen de caída de rocas en el valle de Núria, Pirineos Orientales. El monitoreo de la inclinación de las torres Asinelli y Garisenda en la ciudad de Bolonia (Italia) por Casula *et al.*, (2011), con los que se pudieron obtener modelos para la reconstrucción y la identificación de patrones de deformación de las torres, así como vectores de desplazamiento, permitiendo todo ello diseñar un tratamiento para que las torres no se derrumbaran (Casula *et al.*, 2011). El Monitoreo de costras biológicas en estructuras de concreto para el estudio de la degradación de la infraestructura civil de España, a partir de datos de intensidad de escáneres láser terrestres (González *et al.*, 2012).

En Reino Unido se aplicó la técnica del ELT para la estimación de pérdidas de suelo por erosión de las turberas, en donde se obtuvieron resultados mejores a los métodos tradicionales, aun cuando se requieren varias mejoras a la técnica de escaneo láser antes de que se aplique plenamente en ambientes de turberas y filtro para eliminar la vegetación. Ya lograda las mejoras necesarias a las nubes de puntos se obtuvo una mejor comprensión de los procesos que afectan a la superficie de las turberas (Grayson *et al.*, 2012).

Blasone *et al.*, (2014) hicieron uso de la tecnología del Escáner Láser Aéreo (ELA) para el estudio de los cambios geomorfológicos provocados por tres eventos de

flujo de escombros en una pequeña cuenca de montaña ubicada en el Oriente de los Alpes italianos, en donde realizó modelos digitales de elevación de la zona de estudio a partir de nubes de puntos obtenidas con el equipo. Encontró deficiencias en el uso del ELA en zonas con topografía compleja; sin embargo, logró identificar los cambios geomorfológicos en la zona e estudio (Blasone *et al.*, 2014).

Qian *et al.*, (2016) realizaron un modelo de evaluación de calidad de elementos prefabricados de concreto, dado que algunas piezas tienen muchos detalles y se necesita observar la calidad del producto en grandes cantidades, llevando mucho tiempo, para dar solución se empleó el ELT. Realizaron monitoreos, obteniendo nubes de puntos que se procesó mediante un modelo BIM (*Building Information Modeling*). Demostraron que la técnica propuesta puede estimar las dimensiones de los elementos de manera efectiva y precisa (Qian *et al.*, 2016).

Oskouie *et al.*, (2016) utilizaron la tecnología del ELT para la medición del desplazamiento de muros de contención en carreteras, en donde propuso un nuevo método para obtener las características geométricas y la detección de desplazamientos en taludes de carreteras. Los resultados obtenidos demostraron que el método propuesto es capaz de medir desplazamientos de talud con un error de 9mm (Oskouie *et al.*, 2016).

Pesci *et al.*, (2010) aplicaron la tecnología del ELT para el estudio de la caldera del Monte Vesubio. Realizaron monitoreos para comparar los posibles cambios del cráter en las fechas: mayo de 2005, octubre de 2006 y junio de 2009. A partir de las nubes de puntos obtenidas de cada monitoreo realizaron los modelos digitales de superficie, y mediante la comparación de cada escenario obtuvieron modelos multitemporales de los cambios ocurridos en la caldera. Con los resultados obtenidos realizó mapas de deformación del área de estudio en donde se mostró la pérdida de masa progresiva debido a las caídas de roca con áreas cercanas a los 5,000 m² (Pesci *et al.*, 2010).

Con la revisión de los antecedentes se concluye que en las metodologías y equipos utilizados no han hecho uso del ELT para el monitoreo de la subsidencia

diferencial y en los resultados obtenidos hasta la fecha no se ha obtenido la franja de afectación por subsidencia diferencial. En la revisión de la aplicación de la tecnología del ELT hasta la fecha no se han publicado trabajos para el monitoreo del hundimiento del terreno.

2. Área de estudio

2.1 Área de estudio

El área de estudio está localizada en Morelia, Michoacán, México. Su localización geográfica es la siguiente: Coordenadas entre los paralelos 19°52' y 19°26' de latitud norte; los meridianos 101°02' y 101°31' de longitud oeste; altitud entre 1920 msnm (INEGI, 2009). Los monitoreos a través del Escáner se realizaron en las calles Halcón de la colonia Las Águilas y en la calle Juan de Grijalva de la colonia Chapultepec (figuras 10 y 11).

Los informes del censo de INEGI 2010 muestran que la colonia Las Águilas cuenta con un total de 3,152 personas, mientras que la colonia Chapultepec cuenta con un total de 2725 personas.

2.2 Fallas Geológicas en Morelia, Michoacán

Según informes de Atlas de Riesgos de Morelia, Michoacán existen daños en la ciudad por efecto de proceso de subsidencia creep-falla (PSCF) en las siguientes 13 fallas geológicas:

1. Puerta del sol
2. Realito
3. La soledad
4. Nocupétaro
5. Manantiales
6. Girasoles
7. Cuautla
8. Chapultepec
9. Viveros
10. Torremolinos
11. La Paloma

12. La colina

13. Cerritos

(Hernández Madrigal *et al.*, 2011).

Se realizó el mapa de la zona de estudio con la información de la ubicación de la mancha urbana correspondiente a la ciudad de Morelia, Michoacán (fuente INEGI 2014, con escala: 1:50 000). Este mapa se utilizó para identificar las zonas afectadas por subsidencia diferencial, en donde se observa las trazas de las fallas Chapultepec (figura 10) y La Colina (figura 11), estos archivos fueron procesados mediante el software ArcMap 10.2.



Figura 10. Mapa de ubicación donde se colocó el Escáner Laser Terrestre (círculo rojo) sobre la calle Juan de Grijalva, para el monitoreo de la falla Chapultepec representada por una línea amarilla, fuente Inegi marco geoestadístico 2010 y Atlas de riesgos del estado de Morelia, Michoacán.



Figura 1144. Mapa de ubicación donde se colocó el Escáner Laser Terrestre (círculo rojo) sobre la calle Halcón, para el monitoreo de la falla La Colina representado por una línea amarilla, fuente Inegi marco geoestadístico 2010 y Atlas de riesgos del estado de Morelia, Michoacán.

3. Metodología

Este trabajo se desarrolló mediante la implementación de una metodología compuesta de 9 etapas, las cuales se describen a continuación.

3.1 Elaboración de cartografía.

En esta etapa se procedió a descargar las cartas de la mancha urbana de Morelia, Michoacán a escala 1:50,000, fuente Google Earth imagen 2015. Y se obtuvieron los archivos vectoriales de las fallas geológicas Chapultepec y La Colina del trabajo del Atlas de riesgos de Morelia (Hernández-Madrigal et al., 2011).

Una vez recolectado el material cartográfico anterior se procedió a realizar el mapa de ubicación de las fallas en estudio y las construcciones de Morelia, utilizando el software ArcMap 10.0. La finalidad de este mapa es la ubicación de las zonas afectadas por las fallas mencionadas.

3.2 Verificación de las fallas en campo

El siguiente punto consistió en salidas de campo para la cartografía de las fallas en estudio, ubicando las construcciones afectadas por este fenómeno. Una manera de identificarlas es por que presentan grietas a 45° en su fachada, deformación en las ventanas y agrietamientos en el suelo en el que se encuentran construidas.

3.3 Identificar las áreas de monitoreo

En esta etapa se eligieron las zonas de monitoreo con el ELT, tomando en cuenta la cartografía de la trayectoria de las fallas y ubicación de las construcciones afectadas. Se cuidó que las zonas elegidas tuvieran poca actividad de circulación de automóviles ya que el cruce de estos al momento del barrido atrasaría el trabajo, y bajaría la calidad de la nube de puntos de los inmuebles monitoreados.

Otra característica que se buscó fue que la calle presente problemas de subsidencia diferencial.

3.4 Realizar campañas de monitoreo de los sitios de estudio aplicando la técnica del Escáner Laser Terrestre.

En esta etapa se realizaron recorridos en campo sobre las calles Juan de Grijalva y Halcón previamente identificadas para realizar los monitoreos con el ELT, en donde se colocaron puntos de control con un total de 8 pijas en la calle Juan de Grijalva y 9 en la calle Halcón (figura.12), puestas con un taladro en el pavimento, en dichas pijas se ubicaron los reflectores distribuidos sobre toda la calle.

En las siguientes imágenes se puede apreciar la colocación de los puntos de control.



Figura 12. En las fotografías a y b se aprecia la colocación de taquetes y pijas, en donde fueron ubicados los tripies con reflectores. En la calle Halcón entre los puntos de control se tomó de referencia un poster imagen c y d en donde se colocó reflector de etiqueta.

Equipo utilizado:

- Escáner Laser Terrestre modelo VZ-1000 (figura 13), marca Riegl, cuenta con las características sensor laser, pila de larga duración, adquisición de datos de alta velocidad, alcance de medición hasta 1,400 m, precisión de 6 mm, amplio campo de edición, controlable durante el escaneo, capacidad de múltiples blancos, incluye cámara digital, plomada laser, brújula, GPS, antena WiFi, integrada con la antena de diversas interfaces (LAN, WLAN, USB 2.0) (RIEGL, 3D Terrestrial Laser Scanner Riegl VZ-400 / RIEGL VZ-1000, 2012).



Figura 13. En la imagen de la izquierda se muestra el Escáner Laser Terrestre VZ-1000 integrado con su cámara y antena WiFi, equipo utilizado en este trabajo de investigación, en la imagen de la derecha se aprecia el equipo montado sobre el tripie, listo para realizar un monitoreo.

- Reflectores blancos en forma de cilindros de 10 cm de diámetro de plástico y etiquetas platicas adhesivas blancas de 5 cm de diámetro (figura 14).
- Se trabajó con un tripie con correa de transporte para montar el Escáner con plomada láser, tornillos de apriete laterales y siete tripies.



Figura 14. En la imagen de la izquierda se aprecia el reflector cilíndrico de plástico montado sobre baliza y tripie. En la imagen de la derecha se aprecia el reflector de etiqueta plástica, colocado en un poster de luz.

Equipo menor:

- ❖ Taladro
- ❖ Pijas

❖ Taquetes

- Programa RISCAN PRO versión 2.1.1, ArcMap 10.2, Global Mapper 16.

RISCAN PRO es el software propietario de los sistemas de escáner láser terrestre Riegl. Todos los datos adquiridos (escaneos, detalles de los barridos, imágenes digitales métricas, datos GPS, coordenadas de puntos de control, etc.) se organizan y almacenan en las estructuras, es un proyecto que permite una fácil exportación a muchas plataformas o software de modelado y procesamiento de datos 3D.

RISCAN PRO está diseñado para optimizar el proceso de adquisición y proporciona las herramientas para la visualización y el control de todo el levantamiento 3D directamente en sitio. Características: adquisición, visualización, procesado, georeferenciación, interfaz con software de modelado (RIEGL, MicroGeo, 2015).

3.5 Obtención y unión de la nube de puntos.

Se procedió a hacer el monitoreo con el ELT haciendo un barrido a 360° (lo ideal es colocar el Escáner Laser Terrestre en un punto fijo) se cuidó lograr apreciar sin obstáculos casas y pavimentos afectados por la subsidencia diferencial. En nuestro caso se colocó el aparato cerca a la falla Chapultepec y la Colina, que es en donde es evidente la afectación por la subsidencia.

Se trabajó en cada monitoreo de las distintas fallas en estudio con una resolución angular de 0.05°. A lo largo de la calle sobre los puntos de control colocados se instalaron reflectores montados sobre tripies que sirvieron para que al momento de la comparación de cada nube de puntos estas coincidieran con el concentrado de puntos en las casas y calles, al igual de la coincidencia de la desviación estándar de cada nube.

Después de la obtención de la nube de puntos con el escáner se continuó con la unión de éstas, se importaron las nubes, siguiendo la ruta de la figura 15.

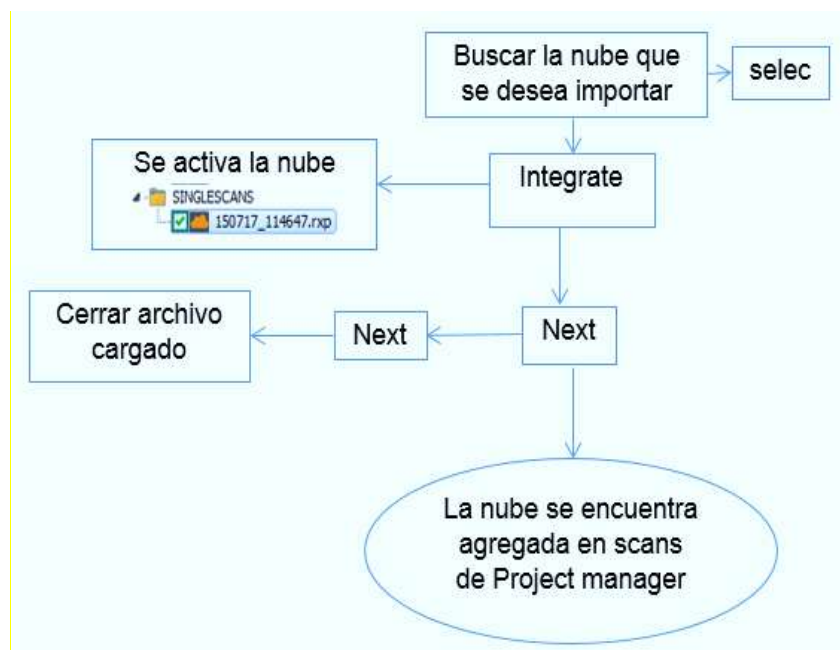


Figura 15. Ruta para importar nube de puntos en el programa Riscan Pro 2.1.1.

En el caso de las nubes escaneadas en la calle Juan de Grijalva, después que se importaron, se unieron colocando *tp* (puntos de control) en las fachadas de las casas monitoreadas, la creación de los *tp* fue mediante la siguiente ruta:

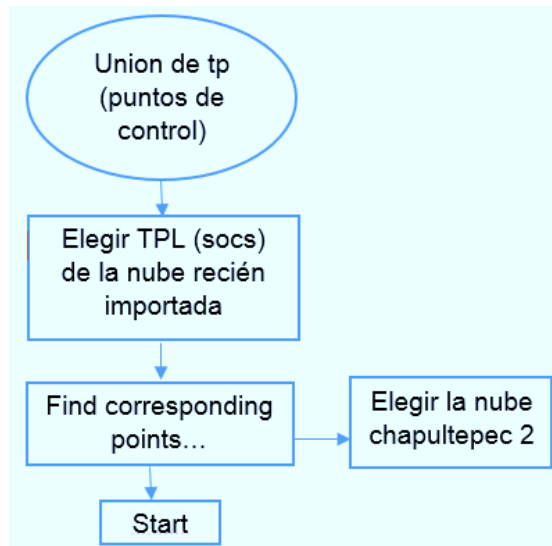


Figura 16. Ruta para la colocación de los *tp* (puntos de control) en el programa Riscan Pro 2.1.1 utilizado para la unión de nubes.

En la figura 17 se aprecian fachadas de las casas monitoreadas con el escáner correspondiente a la calle Juan de Grijalva, con los *tp* colocados en la zona sin afectación por subsidencia diferencial. En la colocación de los *tp* de esta nube se cuidó que tenga las mismas zonas con la nube que se unió.



Figura 17. Imagen tomada de la nube de puntos correspondiente a la calle Juan de Grijalva en donde se aprecian las fachadas de las casas, los números representan los *tp* (puntos de control) colocados con el programa Riscan pro, las zonas oscuras que se aprecian corresponden a las partes en donde obstáculos no permitieron el escaneo con el láser.

3.6 Limpieza de nube de puntos

Posteriormente se procedió a realizar la limpieza de la nube de puntos con el software Riscan Pro. La limpieza consistió en eliminar los grupos de puntos que no son de interés para este trabajo, tales como automóviles, motocicletas, personas, postes de luz, cables, árboles, etc. El objetivo de esta etapa de limpieza es dejar el pavimento, calle y las fachadas de las casas del área de estudio libres de cualquier interferencia.

3.7 Exportación de nubes de puntos

Después de haber georeferenciado y limpiado las nubes de puntos de los monitoreos, se exportaron los archivos del software Riscan Pro en los formatos **.las* y **.txt*.

3.8 Construcción de TIN

Las nubes exportadas en formato “**.las*” correspondientes a los monitoreos hechos en las calles en estudio, importaron en el software Global Mapper 16 conforme a la fecha en que fueron monitoreadas. Se procedió a delimitar un área en donde se incluyó la máxima concentración de puntos.

La siguiente ruta es la que se sigue para delimitar el área de la nube de puntos:

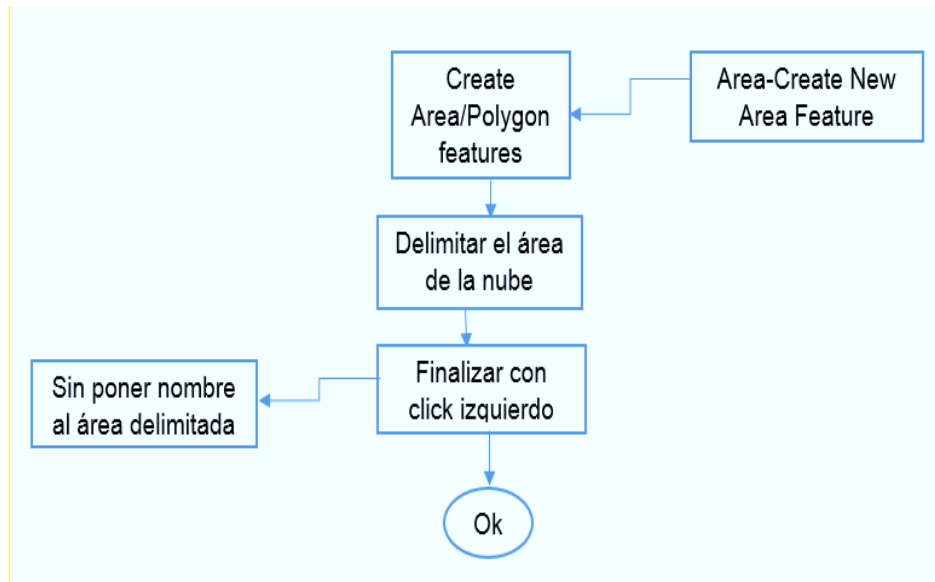


Figura 18. Ruta para la delimitación del área de la nube de puntos.

Se procedió a realizar el *TIN* siguiendo el diagrama de la figura 19.

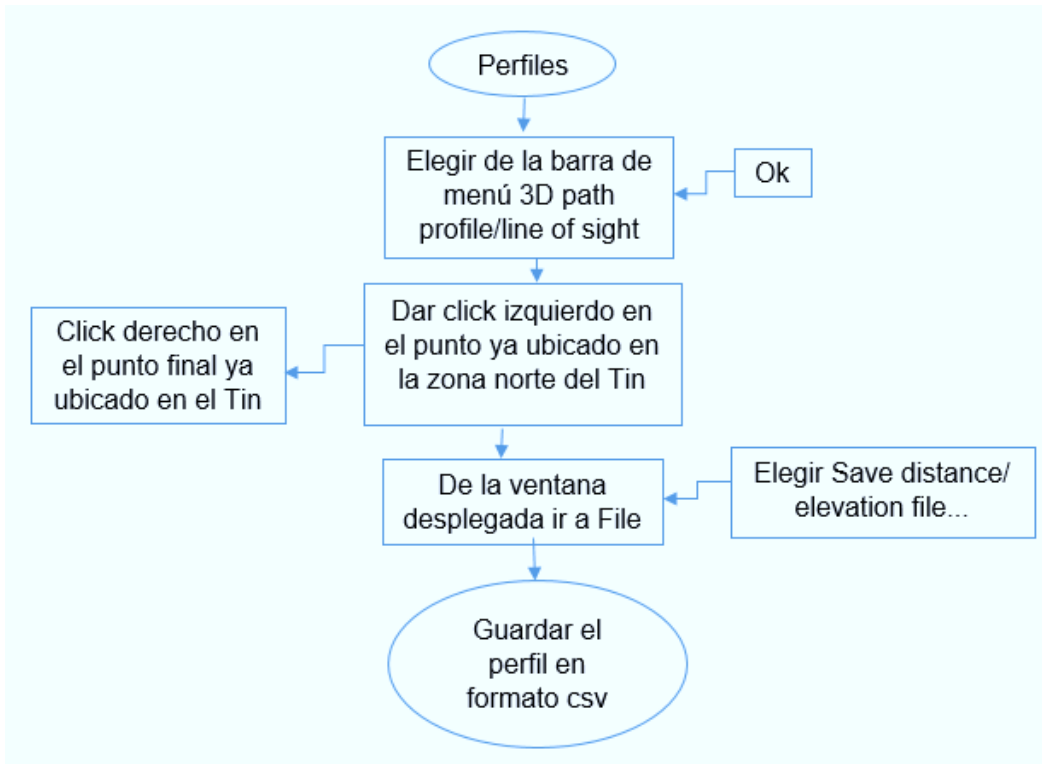


Figura 19. Ruta para la construcción del *TIN* de las nubes de puntos en Global Mapper.

3.9 Perfiles topográficos

Después de haber obtenido los *TIN* a partir de las nubes de puntos se construyeron los perfiles topográficos con el uso del software Global Mapper. Según el diagrama de flujo de la figura 20.

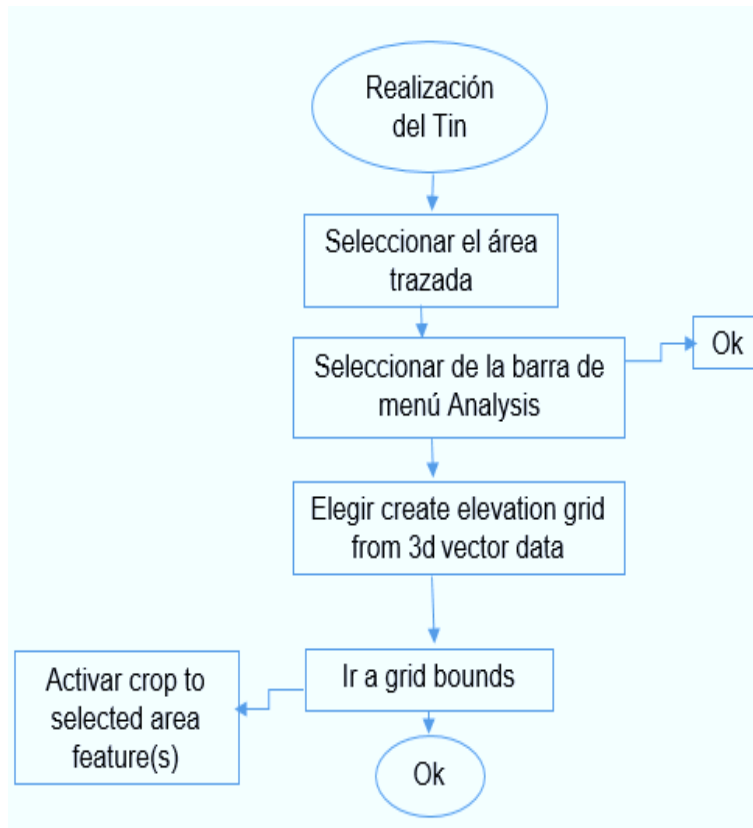


Figura 20. Ruta para la construcción de los perfiles de las nubes de puntos en Global Mapper.

Los perfiles realizados se guardaron en archivo con extensión *.csv para su posterior importación al programa Excel 2013.

4. Resultados

4.1 Resultados preliminares calle Juan de Grijalva

Se realizaron tres campañas de monitoreo aplicando la técnica del Escáner Laser Terrestre (ELT) en la colonia Chapultepec seleccionada previamente mediante la cartografía de las fallas.

La primera salida fue realizada el día 7 de julio del 2015, donde se monitoreó parte de la calle Juan de Grijalva ubicada en la colonia Chapultepec Sur (figura.21), lugar en donde se encuentra la antigua Falla Chapultepec. En este primer monitoreo se colocaron 8 pijas que fueron nuestros puntos de control, distribuidas en toda la calle 4 en el boque fijo y 4 en el bloque que se hunde.

Sobre los puntos de control se colocaron los reflectores, se monitoreó la calle con el ELT en cuatro distintos lugares (escaneos), al inicio de la calle, cerca de la falla en el bloque que se hunde, otro en el bloque en alto y el cuarto casi al terminar la calle (figura 21).

Los escaneos se realizaron en modo panorámico, es decir a 360° en el plano horizontal, y de 30° a 130° en el eje vertical; ambos con una resolución angular de 0.05° . Se unieron con una desviación estándar de 0.0112m, estos barridos dieron nubes de puntos que al instante fueron uniéndose mediante el reconocimiento de los reflectores en común, dando como resultado una nube de 14'409,201 puntos.

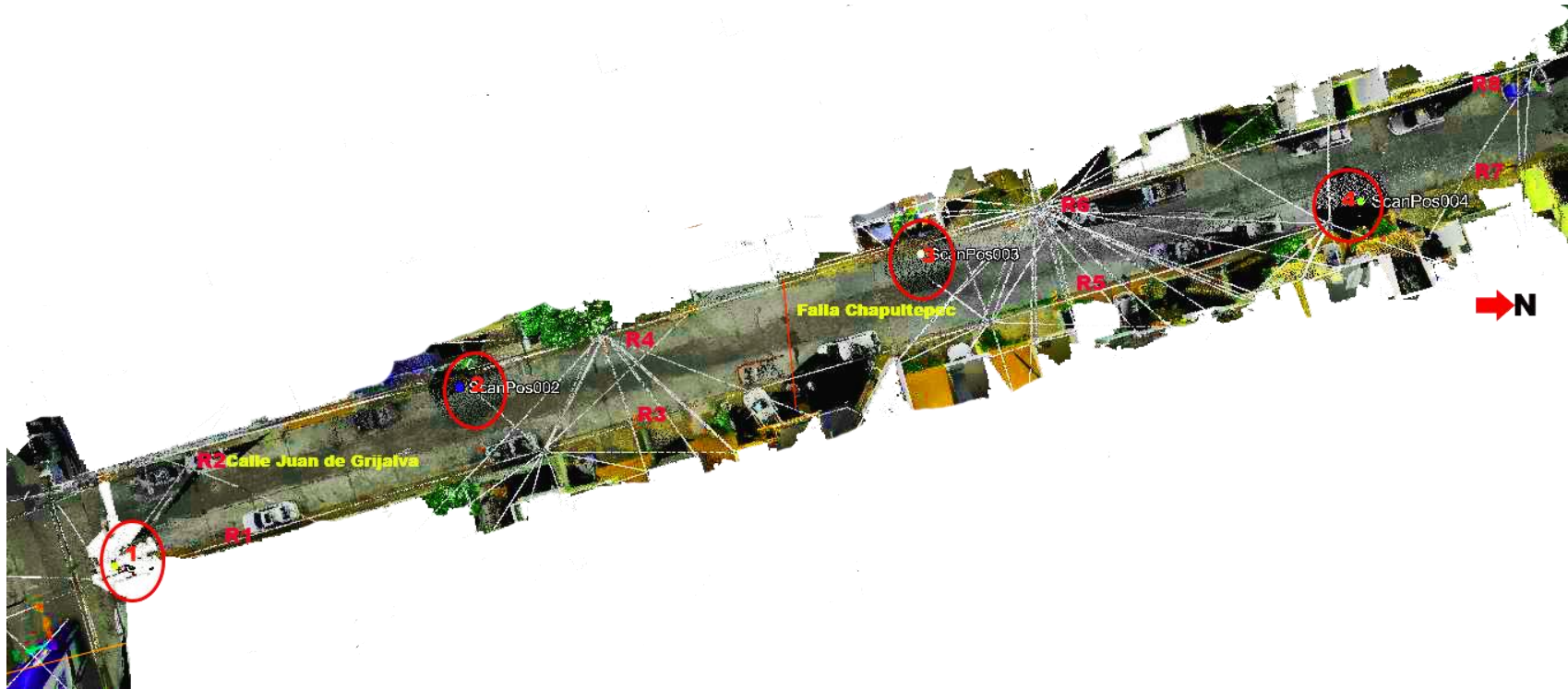


Figura 21. Perspectiva en planta de la nube de puntos obtenida con Escáner Laser de la calle en Juan de Grijalva, los reflectores están representados por las letras R y se observan enumeradas según su orden escaneado. La línea roja representa en donde cruza la falla. Las elipses rojas representan las distintas posiciones en que se colocó el Escáner de igual manera enumeradas en el orden en que fue colocado. Las líneas blancas corresponden a los cables de luz obtenidos en el barrido con el equipo.

El día 9 de noviembre del 2015 se realizó la segunda salida a campo. Se colocaron 8 reflectores en lo largo de la trayectoria de la calle; Juan de Grijalva y se posicionó el ELT en tres distintos lugares uno en donde fue el primer escaneo al inicio de la calle; otra posición en el centro y el ultimo al finalizar la calle (figura 22) en este caso no se realizaron 4 escaneos ósea cuatro distintas posiciones en donde se colocó el ELT dado que se creyó que no era necesario para un tramo corto.

En esta segunda salida a campo se trabajó con el ELT con una resolución de 0.05° y desviación estándar de 0.0078m. Estos barridos dieron nubes de puntos las que al instante fueron uniéndose mediante el reconocimiento de los reflectores en común, dando como resultado una nube de 14,409,100 puntos con separación entre cada punto de un mm y en ocasiones menor a un mm.

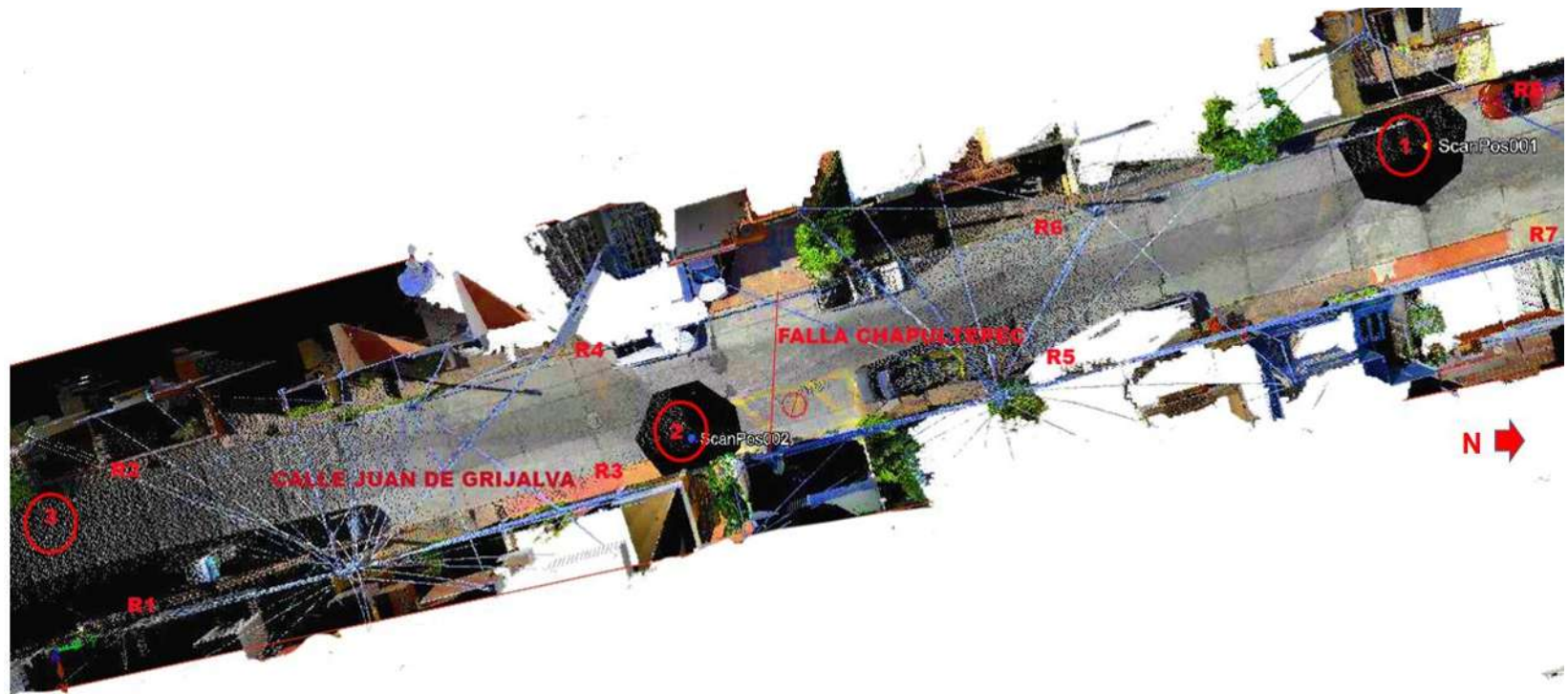


Figura 22. Perspectiva en planta de la nube de puntos de la calle Juan de Grijalva, obtenida el 9/11/16. Los reflectores están representados por las letras R y se observan enumeradas según su orden escaneado. La línea roja representa la falla que cruza la calle. Las elipses rojas representan el orden de las distintas posiciones en que se colocó el Escáner. Las líneas que se observan son los cables de luz que se colaron en el barrido con el equipo.

El tercer monitoreo fue realizado el día 24 de febrero del 2016 en donde no se colocó ningún reflector, solo se hizo el barrido con el Escáner (figura 23). Se trabajó con una resolución de 0.05° y desviación estándar de 0 m porque no hubo unión de reflectores; dio como resultado una nube de 14'409,201 puntos con separación entre cada punto de un mm y en ocasiones menos de un mm. En esta ocasión no se colocaron reflectores, porque no se creyó necesario para la unión y comparación de nubes, ya que se inició la colocación manual y unión de puntos de control entre las nubes en trabajo de gabinete.

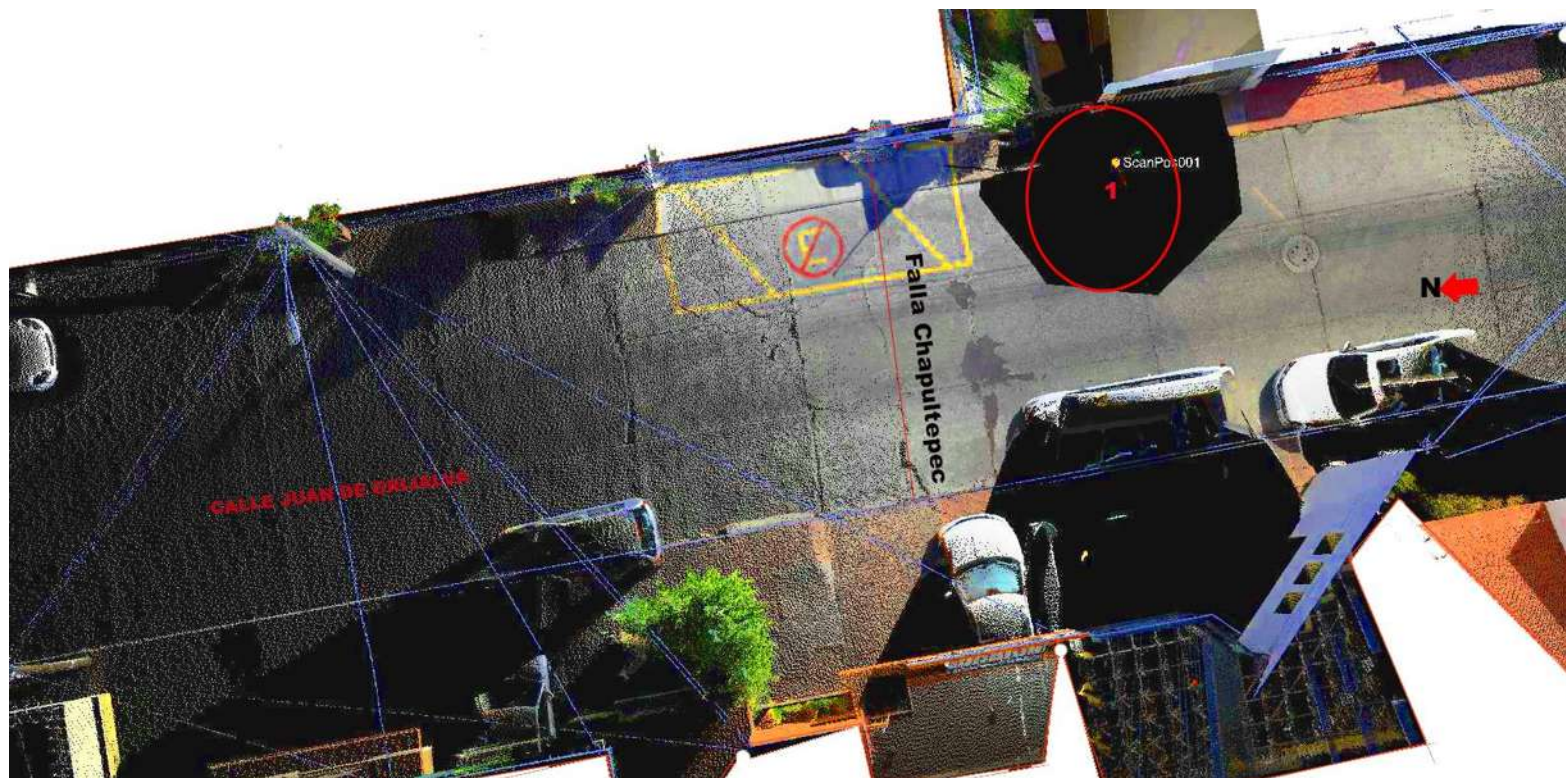


Figura 23. En esta figura se aprecia la perspectiva en planta de la nube de puntos de la calle Juan de Grijalva. La línea roja representa la falla que cruza la calle. La elipse roja representa la posición en que se colocó el Escáner. Las líneas azules corresponden a cables de luz. Las zonas oscuras representan zonas “ciegas” o sombras provocadas por obstáculos.

Mediante el procesamiento de las nubes de puntos se encontraron errores provocados en la unión de las nubes hechas en campo. Para corregir los errores de cada nube se llevaron a cabo las siguientes etapas:

4.1.1 Unión de nube de puntos

Mediante el uso del programa Riscan Pro se importaron las tres nubes de puntos en un solo archivo, con el objetivo de importar las nubes para georeferenciación y posterior comparación. Después de que se importaron se colocaron puntos de control (*tp*) en las esquinas de las construcciones que contenían en común (figura 24). Georeferenciadas las nubes se obtuvo una desviación estándar de 0.0115.



Figura 24. Nube de Puntos Chapultepec, en donde se aprecian fachadas de casas sin afectación de subsidencia y sobre ellas puntos de control enumerados que se colocaron para georeferenciar con la nube obtenida el 9 de noviembre del 2015 de la misma calle.

4.1.2 Limpieza de nube de puntos

La limpieza de nubes consistió en limpiar por separado las tres nubes obtenidas en la calle Juan de Grijalva. El proceso consistió en eliminar los cables conductores de luz, personas, autos, bicicletas; animales, se redujeron las hojas de los árboles cercanos a las fachadas afectadas por la subsidencia diferencial (figura 25 y 26).

El motivo de la limpieza es para eliminar objetos colados que no nos interesan al momento de la realización del barrido con el escáner laser; otro fue evitar graficas con valores continuos de altas y bajas en los perfiles topográficos de cada nube y poder identificar la zona de subsidencia diferencial.

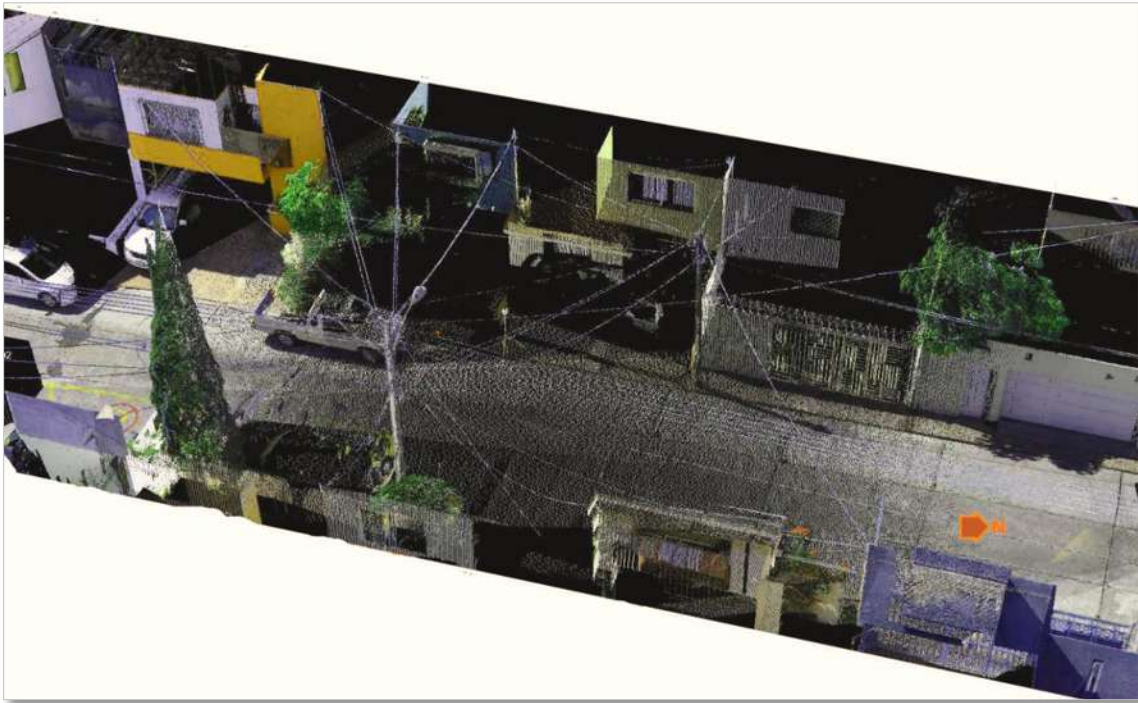


Figura 25. Perspectiva tomada a partir de la nube de puntos en donde se muestra sin obstáculos (Ej. cables de luz, gente). Las zonas oscuras son sombras provocadas por obstáculos.

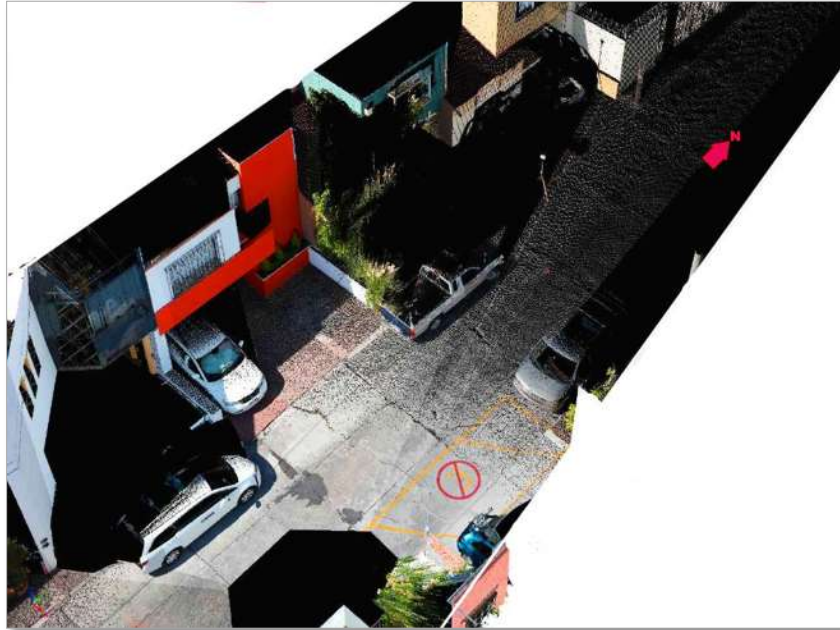


Figura 26. Perspectiva tomada a partir de la nube de puntos sin modificación. Las zonas oscuras son sombras provocadas por obstáculos.

4.1.3 Realización de TIN en global Mapper 16

Después de la etapa de limpieza de nubes se procedió a exportarlas en formato “.las”, se abrieron en el software Global Mapper 16 conforme a su orden de fecha en el que fueron monitoreadas, iniciando con Cha1.las, se procedió a dibujar un área en donde se incluyó la máxima concentración de puntos. Después que se delimitó el área, se procedió a realizar el TIN (red triangular irregular, usado para la interpolación de puntos) de cada nube de puntos (figura 27).

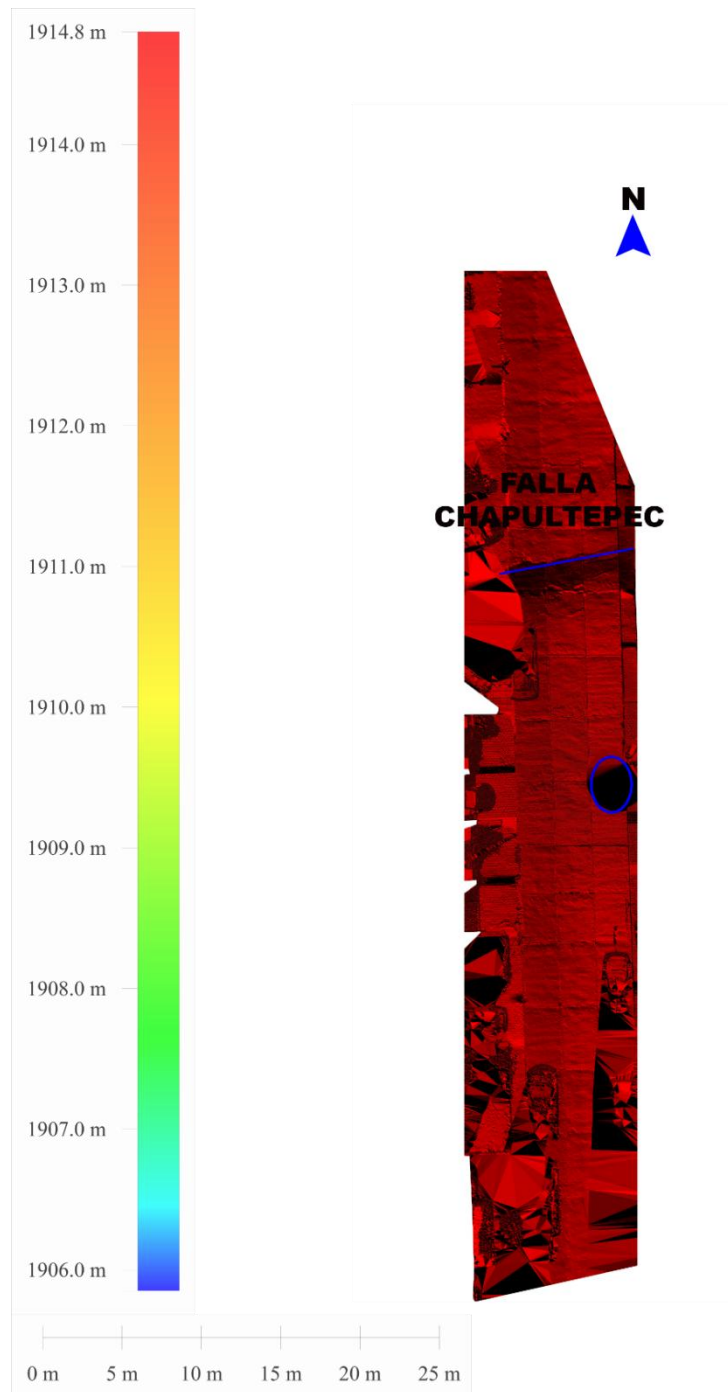


Figura 27. En la imagen se aprecia el TIN, en donde la línea azul representa el cruce de la falla en la calle, la elipse representa la ubicación del Escáner. Los triángulos que se observan alrededor son las zonas en donde se eliminaron árboles y carros; con la falta de puntos y mayor separación entre ellos se realizó un mallado con triángulos más grandes.

4.1.4 Perfiles topográficos

Este paso consistió en realizar perfiles topográficos a partir de los *Tin* (figura 28) de la calle Juan de Grijalva.

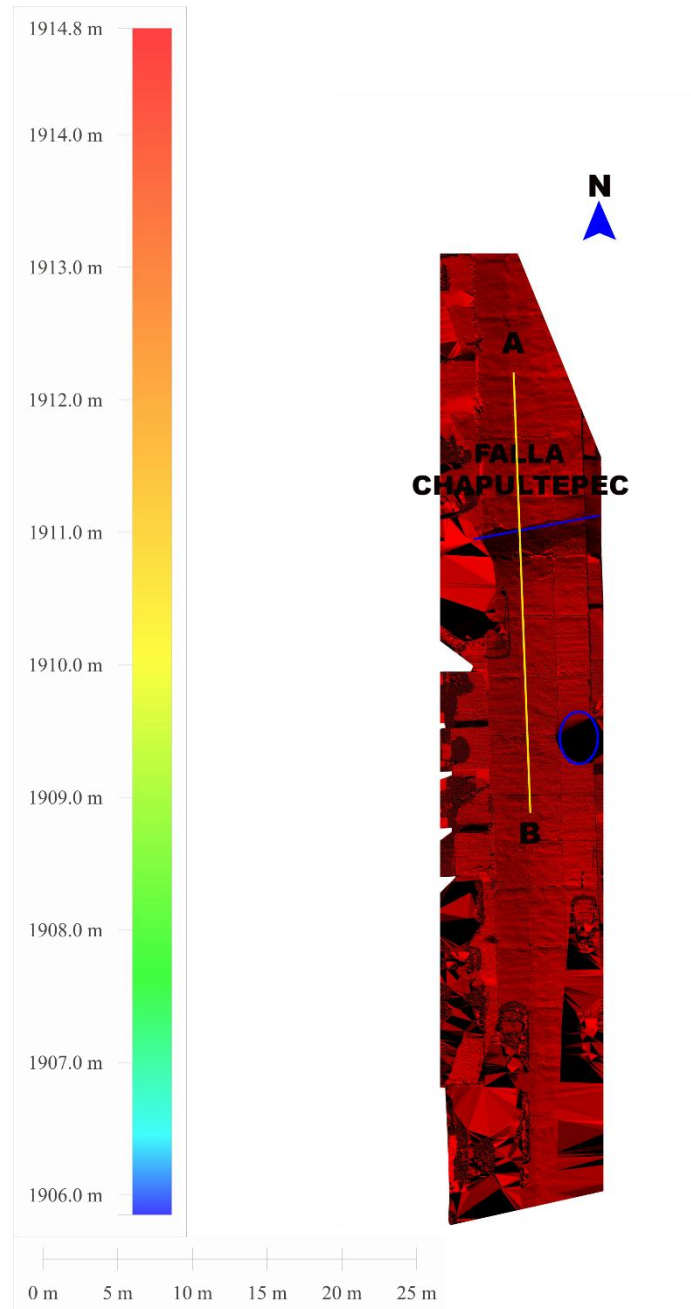


Figura 28. Localización del perfil realizado en la calle Juan de Grijalva (línea amarilla).

4.1.5 Resultados finales calle Juan de Grijalva

En la siguiente figura (figura 29) se aprecia la comparación de los perfiles topográficos correspondientes al primer monitoreo hecho el 17 de julio del 2015, al segundo hecho el 24 de noviembre del 2015 y tercero hecho el 24 de febrero del 2016 en la calle Juan de Grijalva.

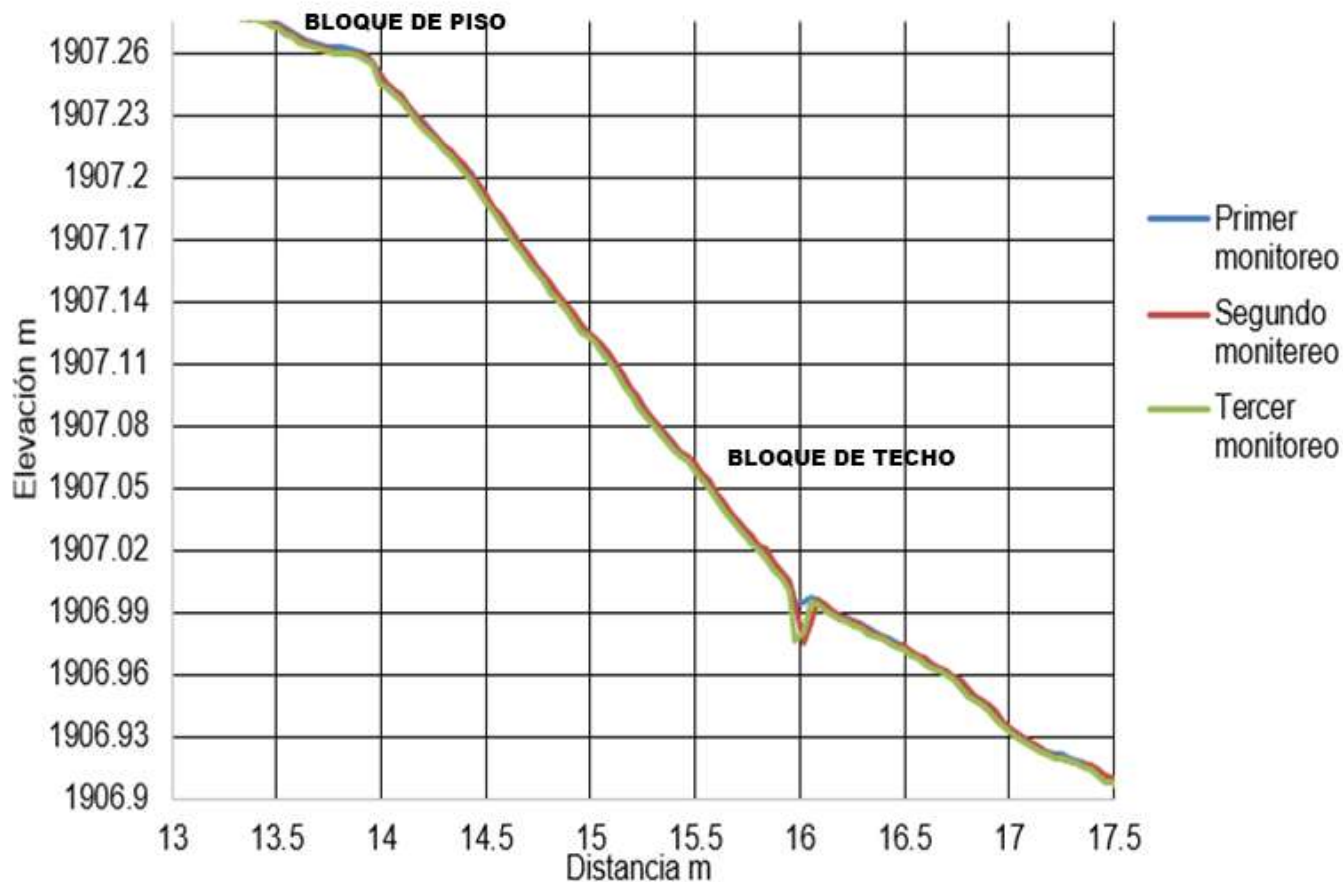


Figura 29. En la imagen se observa el perfil en donde se comparó las nubes hechas en la calle Juan de Grijalva, en donde se aprecia un desnivel de 45 cm entre el bloque de piso (distancia del perfil entre los 13m-14) y el bloque de techo (distancia 13.9m-17.5m). El bloque de piso en el segundo monitoreo el nivel de elevación sube y en el tercer monitoreo bajo siendo que en este tramo debería de estar estable, estas variaciones fueron consecuencia de los errores de unión de cada nube. En la zona del perfil correspondiente al bloque de piso del tercer monitoreo baja en comparación a los otros dos, pero este descenso es mínimo y entra en el rango de 5 mm de error del equipo así que no se toma como dato para medir la subsidencia en esta zona de estudio, la cresta observada a los 16m corresponde el sitio con sombra y no existen puntos en esa zona.

4.2 Resultados preliminares en calle Halcón.

Se realizaron campañas de monitoreo aplicando la Técnica del ELT en las colonias Las Águilas seleccionadas previamente mediante la cartografía de las fallas La Colina.

La primera salida fue realizada el día 17 de julio del 2015, donde se monitoreó parte de la calle Halcón ubicada en la colonia Las Águilas. En este primer monitoreo se colocaron 10 pijas que fueron nuestros puntos de control, distribuidas en toda la calle: 4 en el boque fijo y 4 en el bloque que se hunde, y 2 más en la calle Cernícalo cercana a la calle de estudio.

Sobre los puntos de control se colocaron los reflectores y se monitoreo con el ELT en 5 distintos lugares (figuras 30), para realizar así cinco barridos radiales a 360°, con una resolución de 0.05°; estos barridos dieron nubes de puntos las que al instante fueron uniéndose mediante el reconocimiento de los reflectores en común, dando como resultado una nube de 14,409,201 puntos con desviación estándar de 0.0027m y separación entre cada punto de un mm y en ocasiones menos de un milímetro.



Figura 30. En esta figura se aprecia una imagen de la nube de puntos de la calle Halcón. La línea roja representa la falla que cruza la calle. Las elipses rojas y los números representan el orden de las distintas posiciones en que se colocó el Escáner. Los reflectores están representados por las letras R y se observan enumeradas según su orden escaneado. Las líneas que se observan son los cables de luz que se colaron en el barrido con el equipo.

El día 24 de noviembre del 2015 se realizó la segunda salida a campo; se colocaron 10 reflectores sobre los puntos de control distribuidos en toda la calle, 4 en el boque fijo y 4 en el bloque que se hunde, y 2 más en la calle Cernícalo cercana a la calle en estudio. Se monitoreo con el Escáner Laser Terrestre (ELT) en 5 distintos lugares (figura 31).

Se trabajó con una resolución de 0.05° y desviación estándar de 0.0061 m. Estos barridos dieron nubes de puntos “*.las” que al instante fueron uniéndose mediante el reconocimiento de los reflectores en común, dando como resultado una nube de 14, 409,201 puntos con separación de un mm y en ocasiones menos de uno.



Figura 31. En esta figura se aprecia una imagen de la nube de puntos de la calle Halcón. La línea amarilla representa la falla que cruza la calle. Las elipses naranja y los números representan el orden de las distintas posiciones en que se colocó el Escáner. Los reflectores están representados por las letras R y se observan enumerados según su orden escaneado. Las líneas blancas que se observan son los cables de luz que se colaron en el barrido con el equipo.

El tercer monitoreo fue hecho el día 24 de febrero del 2016 en donde no se colocó ningún reflector, solo se hizo el barrido con el Escáner (figura 32), Se trabajó con una resolución de 0.05° y desviación estándar de 0m porque no hubo unión de reflectores; dio como resultado una nube de 14'409,201 puntos. En esta ocasión no se colocaron reflectores por que no se creyó necesario para la unión y comparación de nubes, ya que se inició la colocación manual y unión de puntos de control entre las nubes en trabajo de gabinete.

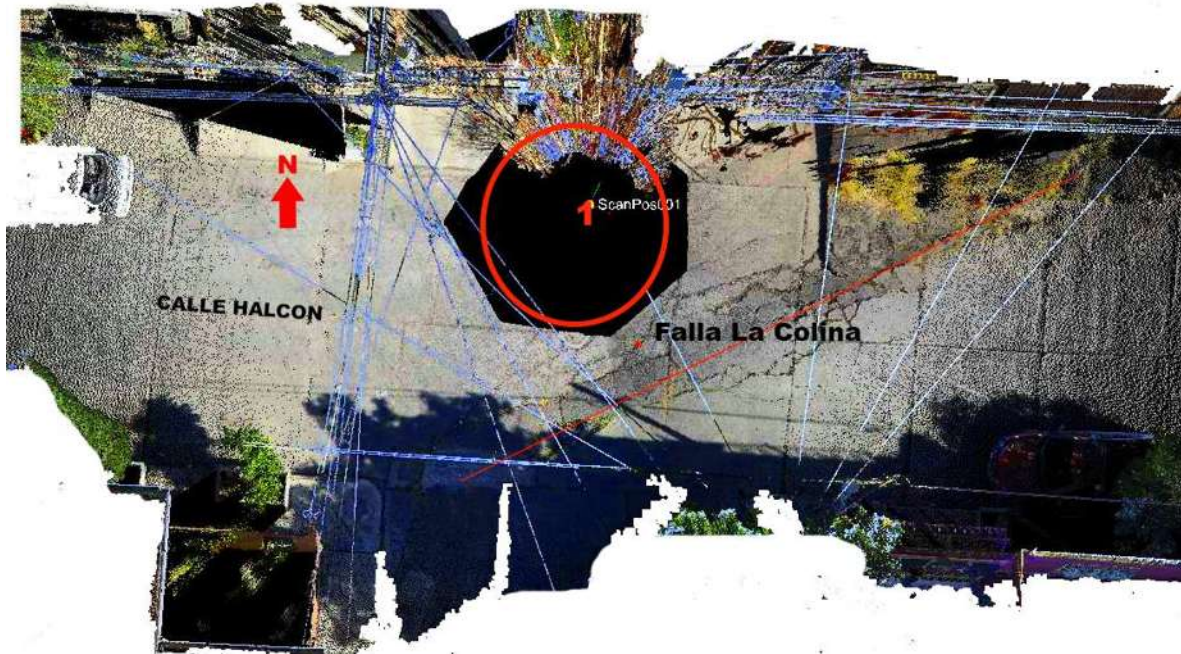


Figura 32. En esta figura se aprecia una imagen de la nube de puntos de la calle Halcón. La línea roja representa la falla que cruza la calle. La elipse roja representa la posición en que se colocó el Escáner. Las líneas blancas que se observan son los cables de luz que se colaron en el barrido con el equipo.

Mediante el procesamiento de las nubes de puntos se encontraron errores en la unión de escaneos, Para corregir los errores de cada nube se llevó a cabo las siguientes etapas:

4.2.1 Unión de nube de puntos

Mediante el uso del programa Riscan Pro se importaron las nubes de puntos en un solo archivo de Riscan Pro, se le colocaron puntos de control (*tp*) (figura 33) y al final se unieron las nubes de puntos; se obtuvo una desviación estándar de 0.0120.



Figura 33. Nube de puntos correspondientes a la calle Halcón, en donde se aprecia la fachada de una casa sin afectación de subsidencia y sobre ellas puntos de control enumerados que se colocaron para unir la nube de puntos de ese monitoreo con el resto.

4.2.2 Limpieza de nube de puntos

La limpieza de nubes consistió en limpiar por separado las tres nubes escaneadas en la calle en estudio (figura 34 y 35). El proceso consistió en eliminar los cables conductores de luz, personas, autos, bicicletas, animales; se redujeron las hojas de los árboles cercanos a las fachadas afectadas por la subsidencia diferencial.



Figura 34. Imagen nube de puntos en perfil monitoreada en la calle Halcón, dicha nube ya fue limpiada con el programa Riscan Pro en donde se eliminaron obstáculos como carros y cables de luz.



Figura 35. Imagen de nube de puntos en planta escaneada en la calle Halcón en donde se aprecia la imagen sin ninguna modificación. Es resultado crudo del monitoreo con el E.L.T, se logra apreciar árboles, trazas de línea que son los cables de luz.

4.2.3 Realización de TIN en global Mapper 16

Después de la etapa de limpieza de nubes se procedió a exportarlas en formato “*.las”; se abrieron en el software Global Mapper 16 conforme a su orden de fecha en que fue monitoreada, iniciando con Col1.las. Se procedió a dibujar un área en donde se incluyó la máxima concentración de puntos y se delimito el área se continuó a realizar el TIN de cada nube de puntos (figura 36).

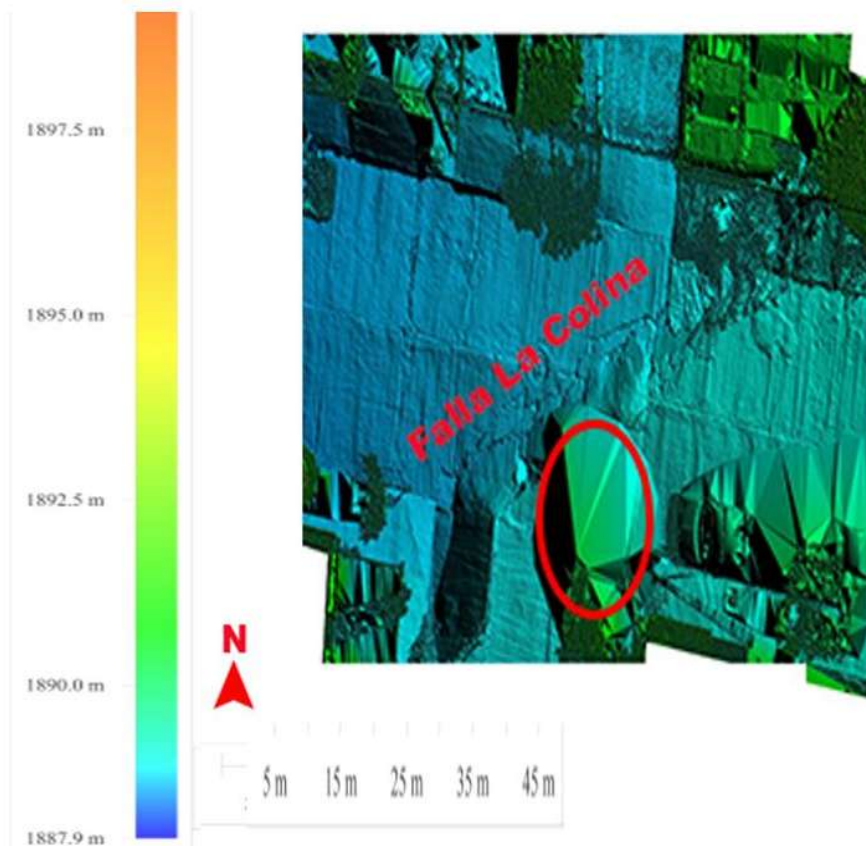


Figura 36. En la figura se aprecia una línea roja que representa el cruce de la falla La Colina. La elipse representa la ubicación del Escáner. Los triángulos que se aprecian en la parte derecha es en donde se eliminaron puntos y zonas con sombra; con la falta de puntos y mayor separación entre ellos se obtuvo un mallado con triángulos con mayor tamaño.

4.2.4 Perfiles topográficos

Este apartado consistió en realizar perfiles topográficos de los *TIN* (Figura 37)

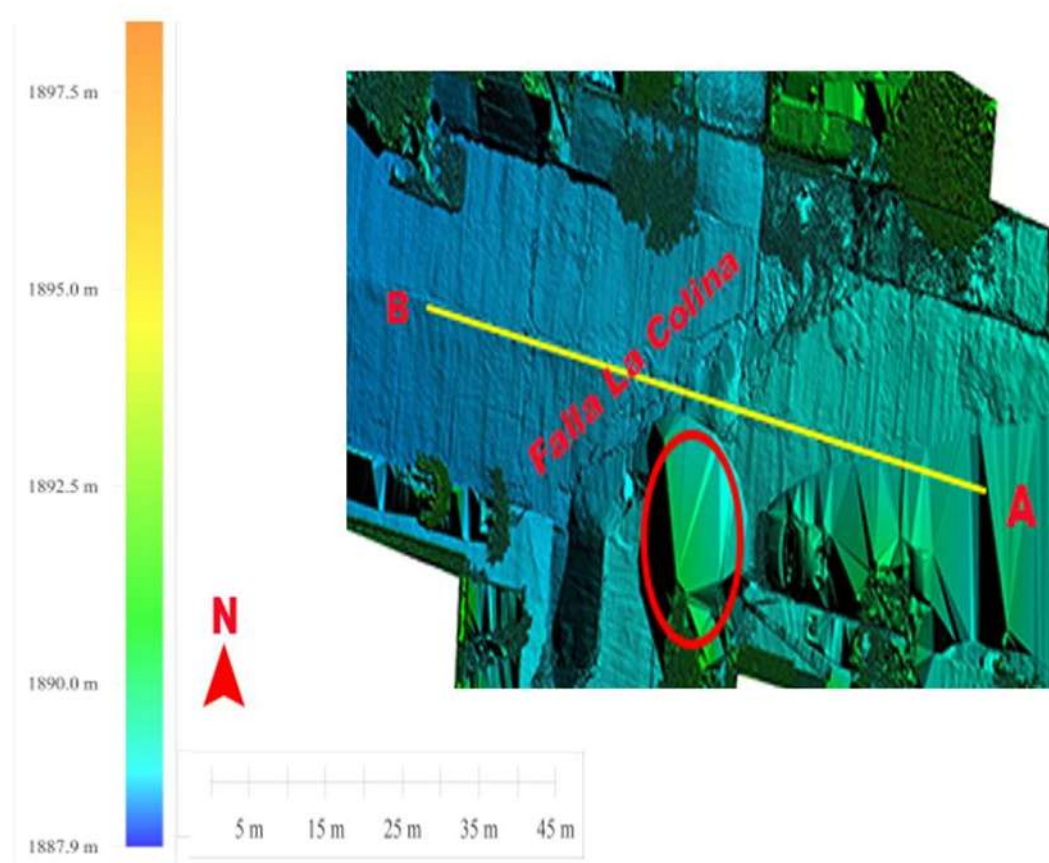


Figura 37. En esta figura se muestra el TIN a línea amarilla representa la trayectoria del perfil y las letras A-B la dirección del perfil. Las zonas de color negro que se aprecian son en donde no existe ningún punto, la elipse roja representa la zona en donde se colocó el ELT.

4.2.5 Resultados finales calle Halcón

Los resultados que se obtuvieron en la calle Halcón hasta en estas etapas tienen errores en la unión de las nubes de puntos que se trataron de corregir mediante la colocación de *tp* (puntos de control). Mediante el análisis de los resultados se descubrió el motivo de los errores que fueron realizados al momento de la obtención de las nubes de puntos y se volvió a hacer una salida a campo en la calle Halcón pero ahora se cuidó la siguiente característica para la obtención de la nube de puntos:

Se realizó una salida a campo el día 27 de junio del 2016 y se colocó el Escáner en un punto de control al igual que los reflectores, la altura de todos los reflectores fue de 2m, se puso a esa altura por que se comparó con las nubes de puntos del monitoreo hecho el 24 de noviembre del 2015 en donde los reflectores estuvieron a 2m de altura y el Escáner en esa ocasión se colocó en un punto de control, con una resolución de 0.05°.

La nube se nombró Col4 y pasó por las cuatro etapas de unión de nube, en esta ocasión se importó sin la necesidad de colocar *tp*, se limpió la nube, se importó al programa Global Mapper 16, después se realizó un TIN de toda la nube de puntos y se finalizó el procesamiento de la nube con el perfil topográfico (figura 38).



Figura 38. En la imagen se aprecia los perfiles correspondientes al segundo monitoreo y cuarto monitoreo hecho en la calle Halcón, la zona de los perfiles correspondientes al bloque de piso (distancia 0-7.00m) se encontraron al mismo nivel sin hundimiento o elevación, dado que en esta zona no existe hundimiento. Pero a partir de la distancia 10m se observó que inicia un descenso del perfil correspondiente al cuarto monitoreo (perfil rojo) provocado por el cruce de la falla La Colina, en esta distancia se aprecia descenso de parte del perfil rojo identificado como subsidencia local.

Para comparar los niveles de descenso de los perfiles del segundo y cuarto monitoreo se restó la elevación total del segundo monitoreo menos la elevación del cuarto dando como resultado la siguiente grafica de hundimiento total de noviembre del 2015 a junio del 2016 (figura 39).

Con los resultados que se obtuvieron de la comparación del hundimiento total del terreno se logró medir la subsidencia local en el bloque que se hunde de la calle Halcón; con un hundimiento de 2cm de noviembre de 2015 a junio del 2016 y una velocidad de subsidencia de 0.286mm/mes.

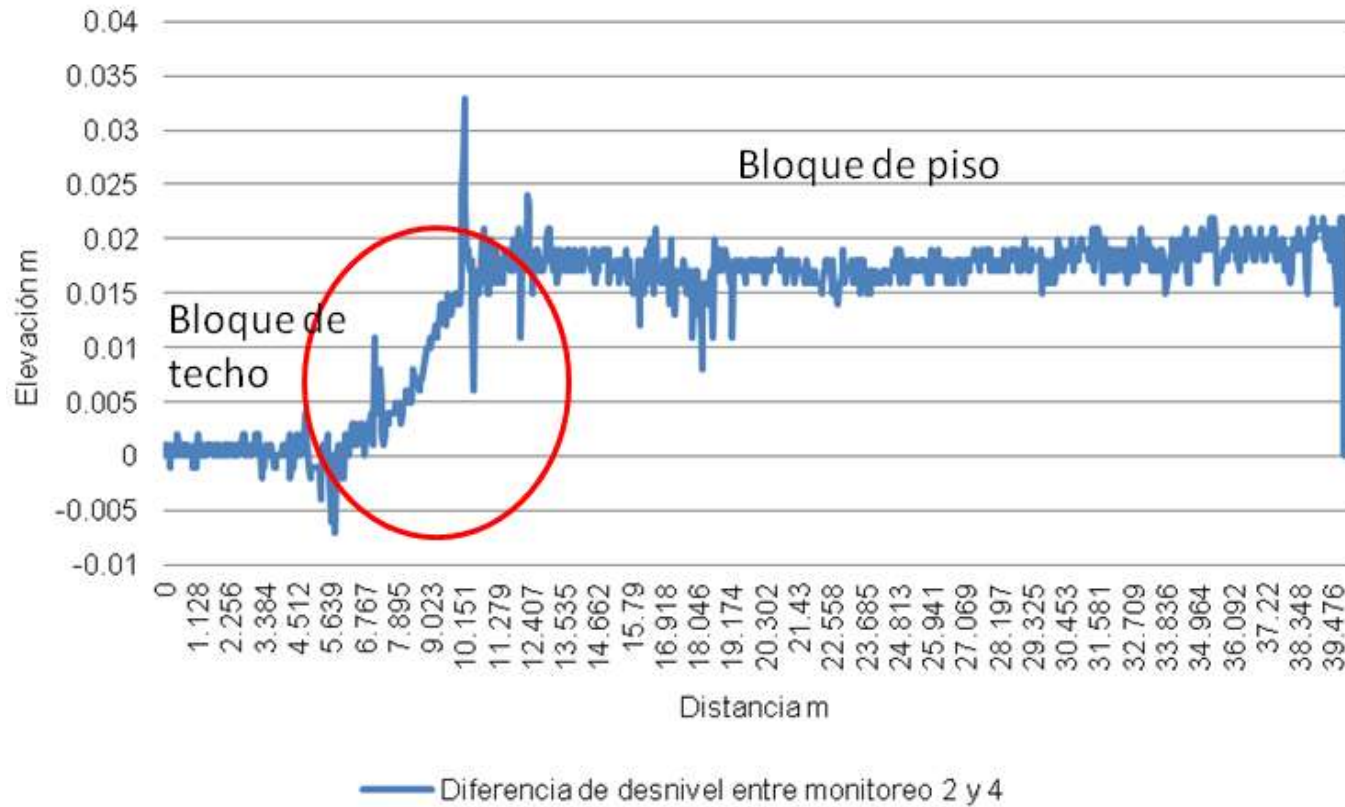


Figura 39. En el perfil ubicado entre la distancia 7.428m -10.968m, se muestra que el perfil del cuarto monitoreo desciende de 1mm a 1.7cm, identificándose ésta zona como subsidencia diferencial, con una franja de afectación superficial de 3.54m. En el bloque de piso ubicado entre la distancia de 10.968-39.476m se aprecia que el hundimiento vuelve a ser casi constante

Mediante la comparación de las nubes de puntos del 24 de noviembre del 2015 y 27 de junio del 2016 de la calle Halcón, en el programa Riscan Pro se obtuvieron las siguientes imágenes (figura 40, 41 y 42) en donde se identificó las zonas con afectación por subsidencia diferencial, y los vectores de desplazamientos en los inmuebles.

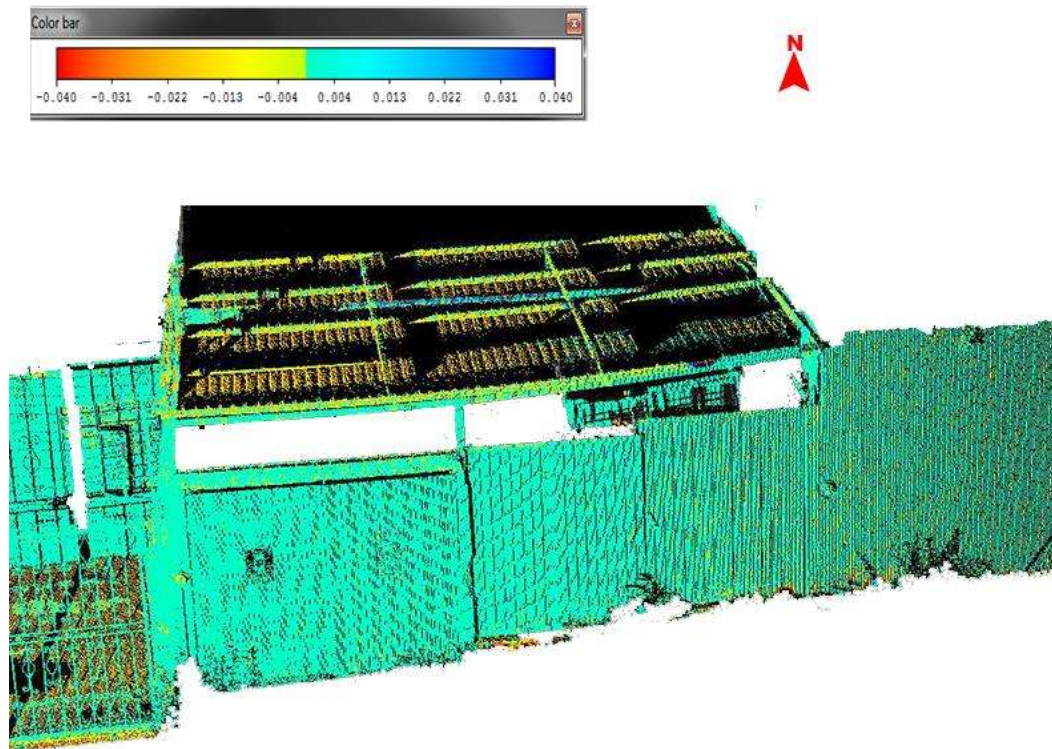


Figura 40. Imagen tomada de la nube de puntos de la calle Halcón en donde los puntos de verde son tomados sin desplazamiento por que se encuentra dentro del rango de error del equipo entre los 5 mm, mientras que se observa mayor concentración de los vectores de desplazamiento en el techo entre los - 4 mm hasta los -1.3 cm representados por los puntos de color amarillo.

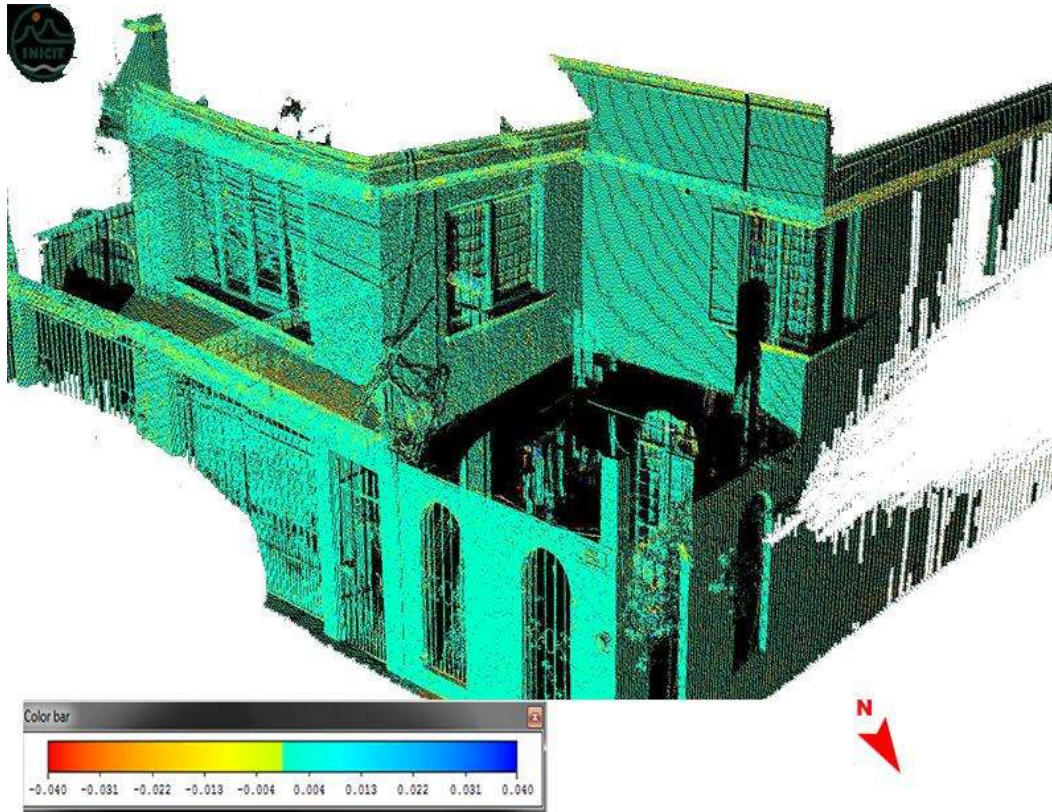


Figura 41. Imagen tomada de la nube de puntos de la calle Halcón en donde se compararon nubes de puntos tomada el 9 de nov. Del 2015 con la nube del 27 de junio del 2016, los puntos de color verde son tomados sin desplazamiento por que se encuentra dentro del rango de error del equipo entre los 4 mm, mientras que se observa mayor concentración de los vectores de desplazamiento representado por los puntos de color amarillo en la parte del techo y ventanas entre los – 4 mm hasta los – 1.3 cm.

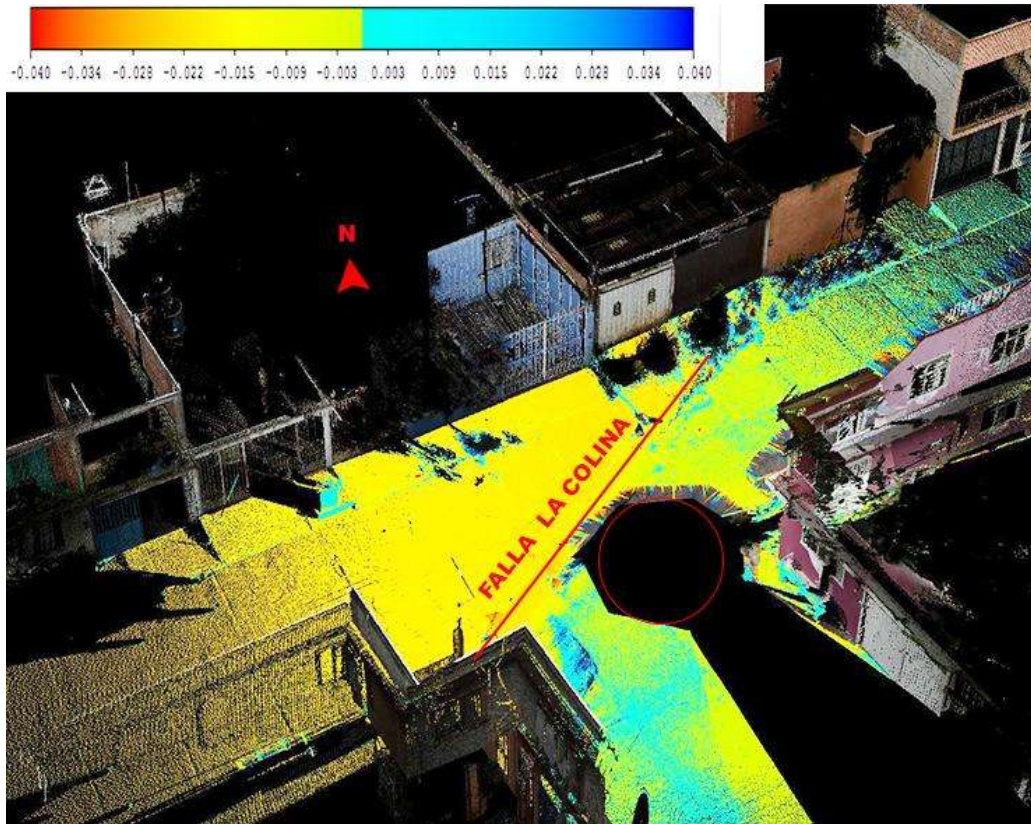


Figura 42. Comparación de nubes correspondientes a solo la calle Halcón, sin los inmuebles, en donde los puntos amarillos (casi color mostaza) representan la zona con niveles negativos entre los 9 mm – 1.5 cm correspondientes a los afectados por subsidencia y los puntos verdes y amarillos claro que se encuentran en el bloque de piso son identificados como zona sin subsidencia ya que se mantienen en valores de 0 cm hasta los 8 mm ya que el rango de error del equipo es de los 5mm. El bloque de piso se encuentra casi fijo y el bloque de techo es el que se mueve

5. Discusión

A partir los resultados obtenidos aceptamos la hipótesis que establece que con el monitoreo multitemporal aplicando la tecnología del ELT, permitirá discernir los componentes vertical de la subsidencia diferencial, así como su franja real superficial de afectación.

Estos resultados guardan relación con lo que sostienen Garduño-Monroy *et al.*, (2001), Ávila-Olivera y, Cigna *et al.*,(2011), quienes señalan que la subsidencia diferencial presente en Morelia es provocada por la combinación de distintos fenómenos que son la existencia de fallas geológicas antiguas (fallas sinsedimentarias), depósito de sedimento en esta zona de estudio, movimientos lentos y continuos, donde la extracción de agua en las secuencias fluvio lacustres desencadena el fenómeno. .

Otro dato importante que aporta Cigna *et al.*, (2011), en su trabajo de investigación en la comparación de monitoreos a distintos intervalos de tiempo, mediante el uso de la tecnología de InSAR demostró que las altas tasas de subsidencia se presentan cerca de las trazas de fallas, este resultado es acorde con lo que en este trabajo se realizó, mediante la comparación de la nube de puntos hechas en las calles Juan de Grijalva y Halcón se identifico que las zonas cercanas, a las fallas Chapultepec y La Colina presentan mayor afectación.

También se tiene algo de similitud al estudio de los autores referidos con el presente trabajo en que ellos mencionan que la subsidencia en la Falla La Colina varió de 4-6 cm por año en el caso de la zona afectada por subsidencia diferencial de la colonia Las Águilas, mientras que Cigna *et al.*, (2011) agrega que este dato será mientras la tasa de deformación sea constante.

Mientras que en este trabajo se encontró que tasa de subsidencia diferencial es de 3.428cm pero la diferencia entre ambos resultados varia por pocos milímetros. Este dato se logró medir mediante la comparación de las nubes de puntos; se obtuvo que existe un hundimiento de 2cm en 7 meses del periodo de noviembre del 2015 a junio del 2016, faltando 5 meses para identificar el hundimiento en un

año. Pero la subsidencia total a un año se puede pre estimar con el resultado y periodo obtenido hasta ahora; se calcula mediante el uso de una regla de tres, dando como resultado 3.428 cm/año. El resultado puede variar ya que depende de varios factores como son la extracción de agua subterránea en los meses faltantes, temporada de lluvias y sequias.

En comparación a las metodologías hechas por, Garduño-Monroy *et al.*, (2001), Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2006) y, Cigna *et al.*,(2011), en este trabajo se logro medir la franja de afectación por subsidencia diferencial en la Calle Halcón dando un resultado de 3.54m apartir de la traza de la falla La Colina.

Referente a las metodologías utilizada mediante el uso de la tecnología del Escáner Laser Terrestre se tiene relación con Casula *et al.*, (2011) y Pesci *et al* (2010) en donde Casula *et al.*,(2011) realizaron monitoreos de la inclinación de las torres Asinelli y Garisenda en la ciudad de Bolonia (Italia), coloco al igual que nosotros reflectores para la unión de las nubes de puntos, y al comparar las nubes de puntos en el plano vertical obtuvieron resultados que les permitió detectar deformaciones en las torres.

Al igual que Pesci *et al.*, (2010) quienes aplicaron la tecnología del ELT y compararon las nubes de puntos monitoreadas a distintos intervalos de tiempo a partir de las nubes de puntos obtenidas de cada monitoreo realizaron los modelos digitales de superficie.

Y con la comparación de cada escenario obtuvieron modelos multitemporales de los cambios ocurridos en la caldera. Algo que no hicimos en el presente trabajo fue la realización del modelo digital de superficie para lograr comparar cada escenario, pero sí, un TIN que sirvió para comparar y analizar cada escenario.

6. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en este proyecto de investigación, se concluye que la metodología para el uso de la tecnología del ELS para el monitoreo de la subsidencia diferencial, es óptima para medir el movimiento vertical, aun cuando en este trabajo no se logró medir el movimiento horizontal, porque el lapso de tiempo de comparación entre cada nube de puntos fue corto, y si es que existe este fenómeno es lento en comparación al movimiento vertical, necesitando mayor número de monitoreos para su medición. Esta metodología es aplicable para medir el movimiento horizontal mediante la comparación de nube de puntos.

Mediante la comparación y procesamiento de las nubes de puntos se calculó la franja de afectación superficial en las colonias afectadas por el hundimiento diferencial mediante datos crudos del equipo, este resultado es de suma importancia, ya que la franja de afectación en la mayoría de los casos analizados son en base a datos empíricos o reporte de los daños reflejados en las construcciones bajo el criterio de quien hace el análisis de las construcciones y calles pero mediante los resultados obtenidos esto se puede confirmar.

La franja de afectación es un dato de suma importancia para la contribución de trabajos de evaluación inmobiliaria, valuación, planificación, proyectos de construcción y creación de mapas de peligro a subsidencia diferencial.

En el monitoreo hecho en la calle Juan de Grijalva, no se obtuvieron resultados dado que se cometieron errores en la metodología, afectando los resultados en la unión de nubes de puntos y errores en campo colocando a diferentes alturas los reflectores en cada monitoreo hecho con el Escáner; otro error fue que el equipo no se colocó en un punto fijo.

Se hicieron correcciones hasta lograr una metodología óptima, lográndose corregir únicamente las nubes de la calle Halcón, no se logró afirmar o negar la hipótesis

referente al existente movimiento lateral izquierdo en esta zona porque el posible desplazamiento es más lento que el desplazamiento vertical.

Dado que el lapso de tiempo entre las nubes de puntos monitoreadas correctamente es de 7 meses, tiempo muy corto para identificar vectores horizontales, probablemente si se compara con futuras nubes de puntos de la misma zona a un año o más, se logrará comprobar la hipótesis.

Se concluye que el método utilizado para el levantamiento, edición y corrección de las nubes de puntos es óptimo para el monitoreo de la subsidencia, ya que se lograron medir la franja de afectación numéricamente, dato aún no logrado mediante el monitoreo con métodos tradicionales.

Mediante este estudio se comprueba que el uso del Escáner Laser Terrestre es favorable para el monitoreo de la subsidencia diferencial ya que mediante la revisión de antecedentes aún no se encuentran registrados trabajos la mayoría son referente a la restauración de centros históricos, deslizamientos, vegetación, arquitectura, geología, levantamientos mineros y subterráneos, etc.

7. Recomendaciones

- Identificar la zona en donde se hará el monitoreo con el escáner laser e identificar las horas en donde existe menor o nulo tránsito vehicular para mejorar el escaneo de las nubes.
- Colocar puntos de control, en donde se ubicarán reflectores y Escáner Laser, de preferencia que los reflectores se encuentre cerca de las zonas afectadas por subsidencia diferencial y el Escáner en el centro de ello (podría ser en el centro de la calle).
- La altura en los reflectores debe de ser la misma en cada reflector y en cada nube, al momento de hacer el barrido con el escáner, si es que se trabajara la misma zona para comparación a distintos intervalos de tiempo.
- Colocar el Escáner Laser en un punto en donde se aprecie bien los reflectores y la zona afectada por subsidencia diferencial.
- Enumerar los reflectores.
- Hacer croquis de ubicación de los reflectores y Escáner Laser.
- Fechar los monitoreos y nubes de puntos.
- Para el procesamiento de las nubes de puntos limpiar las nubes hasta dejar el nivel de terreno, para facilitar el trabajo en la realización de los perfiles topográficos.
- Para lograr medir el desplazamiento horizontal hacer monitoreos con diferencia mínima de un año entre la primer nube de puntos obtenida y la última.

8. Referencias bibliográficas

- Abellán, A., Vilaplana, J., & Martínez, J. (2006). La aplicación de un largo alcance Terrestre láser escáner con un estudio detallado de caída de rocas en la Vall de Núria (Pirineos Orientales, España). *sciencedirect*, 136-148.
- Agus, S., Yoichi, F., Jun, N., & Takahito, K. (2014). Detecting Land Subsidence Using Gravity Method in Jakarta and Bandung Area, Indonesia. *ScienceDirect*, 17-26.
- Autodesk. (12 de agosto de 2016). *AutoCAD Civil 3D*. Obtenido de AutoCAD Civil 3D: <http://docs.autodesk.com/CIV3D/2012/ESP/landing.html>
- Ávila Olivera, J. A., & Garduño Monroy, V. (2006). Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF) en la ciudad de Morelia, Mich., México. *Geotermia*, 50-59.
- Blasone, G., Cavalli, M., Marchi, L., & Carzorzi, F. (2014). Supervisión de las zonas de origen de sedimentos en una cuenca de captación de flujo de escombros usando terrestre láser de barrido. *sciencedirect*, 23-36.
- Cabral Cano, E., Díaz Molina, O., & Delgado Granados, H. (2011). Subsistencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Redalyc*, 53-60.
- California Department of Water Resources. (15 de Septiembre de 2016). CA.GOV. Obtenido de CA.GOV: <http://www.water.ca.gov/groundwater/landsubsidence/LSmonitoring.cfm>
- Casula, G., Boschi, E., & Pesci, A. (2011). Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): Detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings. *ScienceDirect*, 117-127.
- Chaussard, E., Wdowinsk, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *ScienceDirect*.
- Cigna, F., Osmanoglu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, t. H., Avila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., . . . Wdowinski, S. (2011). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic. *SciVerse ScienceDirect*, 146-161.
- Garduño-Monroy, V., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., & Rodríguez-Torres, G. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de

- acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México . *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37-54.
- GimGEOMATICS. (domingo 11 de Septiembre de 2016). *GimGEOMATICS*. Obtenido de GimGEOMATICS: <http://www.gim-geomatics.com/nube-puntos>
- Hernández Madrigal, V. M., Garduño Monroy, V. H., & Ávila Olivera, J. A. (2011). *ATLAS DE PELIGROS GEOLOGICOS DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACAN*. Morelia, Michoacan.
- Hung, W.-C., Hwang, C., Liou, J.-C., Lin, Y.-S., & Yang, H.-L. (2012). Modeling aquifer-system compaction and predicting land subsidence in central Taiwan. *ScienceDirect*, 78-90.
- INEGI. (mayo de 2009). Aguascalientes, Ags, México, México.
- Liu, C., Zhou, F., Gao, J., & Wang, J. (2012). Some problems of GPS RTK technique application to mining subsidence monitoring. *ScienceDirect*, 223-228.
- McClusky , S., & Tregoning, P. (2013). Background paper on subsidence monitoring and measurement with a focus on coal seam gas (CSG) activities. *Chief Scientist y Engineer*, 1-43.
- Oskouie, P., Becerik-Gerber, B., & Soibelman, L. (2016). Medición automatizada de desplazamientos muros de contención carretera usando terrestres láser escáneres. *sciencedirec*, 86-101.
- Pesci, A., Teza, G., Casula, G., Loddo, F., De Martino, p., Dolce, M., . . . Pingue, F. (2010). Multitemporal laser scanner-based observation of the Mt. Vesuvius crater: Characterization of overall geometry and recognition of landslide events. *ScienceDirect*, 327–336.
- Qian, W., Min-Koo, K., Jack CP, C., & Hoon, S. (2016). Evaluación de la calidad automatizada de elementos prefabricados de hormigón con irregularidades geométricos utilizando terrestre láser de barrido. *sciencedirect*, 170-182.
- RIEGL. (2012). *3D Terrestrial Laser Scanner Riegl VZ-400 / RIEGL VZ-1000*. Australia: RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GmbH, Australia.
- RIEGL. (30 de Abril de 2015). *MicroGeo*. Obtenido de MicroGeo: <http://www.microgeo.it/Laser-Scanner/laser-scanner-3d.php>
- Sarychikhina, O., Glowacka, E., Suárez Vidal, F., Mellors, R., & Ramírez Hernández, J. (2011). Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el. *Redalyc*, 1-13.

- Tomas, R., Herrera, G. ..., Cooksley, G., & Mulas, J. (2011). Persistent Scatterer Interferometry subsidence data exploitation using spatial tools: The Vega Media of the Segura River Basin case study. *ScienceDirect*, 411-428.
- Toth, J. S. (2009). *TOPOGRAPHIC LASER RANGING AND SCANNING*. New York: CRC Press Taylor y Francis Group.
- Tung, H., & Ching Hu, J. (2012). Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of central Taiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. *ScienceDirect*, 126-135.
- Zermeño De León, M., Esquivel Ramírez, R., Hernández Navarro, A., Mendoza Otero, E., & Arellano Sánchez, J. (2005). Influencia de la Extracción del Agua en la Subsistencia y Agrietamiento de la ciudad de Aguascalientes. *Investigación y Ciencia*, 15-22.