



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

**Instituto de Investigaciones en Ciencias de la
Tierra**



Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio

**CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA Y
CINEMÁTICA DE LA DEFORMACIÓN DE TALUDES
EN CANALES: CASO DE ESTUDIO RÍO CHIQUITO,
MORELIA.**

TESIS

Para obtener el grado de:

Maestra en Geociencias y Planificación del Territorio

Autor:

Luz María Cerda Molina

Asesor:

Víctor Manuel Hernández Madrigal

Morelia, Michoacán

Noviembre, 2023

DEDICATORIA

"Si caminas solo, irás más rápido, si caminas acompañado, llegarás más lejos"

Este trabajo se lo dedico a mi esposo y a mis padres, por su apoyo incondicional en cada paso de mi vida, por ser el ancla que me sostiene, por todo el amor y comprensión.

Gracias por estar hoy y siempre 

AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT)** por abrirme las puertas para realizar mi posgrado en sus aulas .

A **CONAHCYT** por la beca otorgada en el tiempo que estuve en el posgrados para poder realizar mis estudios.

A mi asesor el **Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal**, por darme la oportunidad de trabajar con él, por sus consejos, por mostrarme el mundo de los procesos de remoción en masa, la implementación de nuevas metodologías para el beneficio de la población, por no dejarme caer y creer en mí, gracias por estar.

A **mis profesores** el Dr. Jesús Arturo Muñiz Jauregui, al Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto, la Dra. Isabel Israde Alcántara, al Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera, al Dr., Gerardo Manuel Rodríguez Torres, por sus consejos y apoyo, muchas gracias.

A la **Dra. Cecilia Irene Villaseñor Reyes**, por todo tu apoyo y consejos, por siempre estar presente cuando tenía dudas y tenerme paciencia, gracias por ser una guía en mi camino.

A mi honorable **comité de sinodales**, al Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, A la Dra. Cecilia Irene Villaseñor Reyes, Al Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera, A la Dra. Martha Gabriela Gómez Vasconcelos, Al Dr. Boris Chako Tchamabe y al Dr. Eleazar Arreygue Rocha, por aceptar ser parte de mi comité, por su apoyo, por brindarme un poco de su valioso tiempo en revisar mi tesis y darme sus valiosos comentarios, muchísimas gracias.

A la **Dra. Erna Martha López Granados**, por escucharme cuando más perdida estuve, por tu comprensión y apoyo, por los viajes y diversión, gracias por tener siempre una sonrisa.

A la **Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva**, por ser una gran coordinadora de la maestría, por cuidar de los alumnos y estar al pendiente de todos nosotros, muchas gracias.

A la **Mtra. Cintya Escobar Aguilar**, por ser una gran amiga durante mi estancia en la maestría, por las risas y la diversión, muchas gracias.

A mis hermanitos de maestría **Santiago y David**, el mostrarme su apoyo, sus consejos, por hacerme parte de su vida y no dejarme caer cuando más lo necesitaba, fue un honor haber estado con ustedes, gracias por su amistad.

A mis compañeros y amigos, **Lolita, Karlita, Karla Garcia, Salvador, Elesbaan, Atziri, Karina, Itza, Lupe, Ruth, Memo y Paloma**, por sus risas, sus consejos, su apoyo, por los detalles, por cada abrazo y momentos de diversión, gracias por siempre estar.

A **mi familia**, por siempre creer en mí, por todo su apoyo en cada paso de mi vida, en especial a mi tía **Raquel** y mi tío **Antonio**, que nunca han dudado de mis capacidades, por siempre estar conmigo cuando más lo he necesitado, gracias a ustedes he llegado hasta donde estoy.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
Resumen	1
Abstract.....	2
1. Introducción.....	4
1.1 Planteamiento del problema	5
1.2 Hipótesis.....	6
1.3 Objetivos	6
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	6
1.3.2 <i>Objetivo particular</i>	6
2. Marco conceptual	7
2.1 Amenazas Naturales.....	7
2.2 Procesos de Remoción en Masa	8
2.3 Geometría de los PRM	11
2.4 Nomenclatura de un talud o ladera.....	13
2.5 Estabilidad de talud	14
2.6 Factores que determinan la estabilidad de un talud.....	14
3. Antecedentes	16
3.1 Antecedentes históricos locales.....	16
3.2 Represamientos por PRM.....	18
3.3 LiDAR Terrestre.....	22
3.4 Técnicas de estudio en los PRM	23
4. Área de estudio	25
4.1 Ubicación	25
4.2 Marco geológico.....	26
4.2.1 <i>Geología regional (Morelia)</i>	26
4.2.2 <i>Geología estructural de Morelia</i>	29
4.2.3 <i>Geología local (Río Chiquito)</i>	31
4.3 Hidrología	33
4.3.1 <i>Descripción hidráulica del sitio</i>	36
4.4 Clima	37
4.5 Uso de suelo y vegetación.....	38

5. Metodología	40
5.1 Recopilación bibliográfica	41
5.2 Trabajo de campo	41
5.2.1 <i>Delimitación del segmento de estudio</i>	41
5.2.2 <i>Levantamiento de datos (TLS)</i>	41
5.2.3 <i>Verificación de fracturas y cuerpos inestables</i>	44
5.3 Trabajo de gabinete	45
RiSCAN PRO	45
5.3.1 <i>Registro Grueso</i>	45
5.3.2 <i>Registro Fino</i>	47
Global Mapper	49
5.3.3 <i>Clasificación de nube de puntos</i>	49
5.3.4 <i>Modelo Digital de Elevación</i>	52
5.3.5 <i>Digitalización de fracturas/Grietas</i>	53
CloudCompare	54
5.3.6 <i>Comparación de nube de puntos (C2C)</i>	54
6. Resultados	56
6.1 Modelo Digital de Terreno y Cartografía	56
6.2 Densidad de fracturas/grietas	59
6.3 Deformación y fracturas	60
6.4 Geometría del talud	61
6.5 Morfometría de los PRM	64
6.5.1 <i>PRM 1</i>	65
6.5.2 <i>PRM 2</i>	67
6.5.3 <i>PRM 3</i>	69
6.5.4 <i>PRM 4</i>	71
6.6 Cinemática	73
6.6.1 <i>Sección 1</i>	79
6.6.2 <i>Sección 2</i>	85
6.6.3 <i>Sección 3</i>	87
6.6.4 <i>Sección 4</i>	91
6.6.5 <i>Sección 5</i>	93
6.6.6 <i>Sección 6</i>	97

6.6.7	Sección 7	100
7.	Análisis y discusión de resultados	103
8.	Conclusiones	107
9.	Recomendaciones	109
10.	Bibliografía	110
Anexo 1		119
Anexo 2		126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Tipos de amenazas	7
Figura 2.	Nomenclatura de un deslizamiento. Fuente: Suárez,-Díaz 1998.	13
Figura 3.	Nomenclatura de taludes y laderas. Fuente: Suárez-Díaz, 1998.....	13
Figura 4.	a) Mapa de Morelia de 1898 donde se muestra el antiguo cauce del Río Chiquito y su posterior rectificación b) Antiguo cauce del Río y c) Rectificación (1937). Fuente: (Güiza et al., 2020) y fotografías por Morelia a través del tiempo.	17
Figura 5.	Entubamiento del Río Chiquito. Fuente: Morelia a través del tiempo.	17
Figura 6.	Bocetos de una presa contra deslizamientos de tierra con las dimensiones medidas. Fuente: Oppikofer et al., 2020.....	20
Figura 7.	Deslizamiento del talud del Río Chiquito. Fuente: Víctor Manuel Hernández Madrigal.	21
Figura 8.	Ubicación del área de estudio.	25
Figura 9.	Columna estratigráfica de la ciudad de Morelia. Fuente: Modificada de Arreygue, 2005.	28
Figura 10.	a) Principales fallas de la ciudad de Morelia, con dirección preferencial NE-SW Y E-W. Fuente: Modificada de Avellan, 2020. b) Sistema de fallas en el centro de México. Sistema San Luis de La Paz – Salinas Hidalgo (SLP – SH), En líneas gruesas grises se marcan las fallas que pertenecen al Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA). Fuente: (Álaniz-Álvarez et al., 2002).....	30
Figura 11.	a) Perfil del talud donde se observa el relleno antropogénico, b) perfil perpendicular a la av. Solidaridad, donde se observa el relleno antropogénico.	31

Figura 12. Mapa geológico y estratigrafía de los volcanes en la porción noroeste de la ciudad de Morelia. Fuente: modificado de Avellán et al., (2020b)	32
Figura 13. Mapa hidrológico a) Región hidrográfica Lerma-Santiago b) Ubicación de la ciudad de Morelia y c) Microcuenca del Río Chiquito. Mapa base MDE sombreado con resolución de 5 m.....	35
Figura 14. Gráfica de precipitación y temperatura media mensual de Morelia. Fuente: tomada de INEGI, 2016.	37
Figura 15. a) Área de ejercicio en el sector norte del Río Chiquito, entre las calles Río Mayo y Colegio de San Miguel, b) Ciclopista y trotapista, sector norte. Fuente: Google, 2023. .	39
Figura 16. Flujo de trabajo para la geometría y cinemática de los taludes del Río Chiquito.	40
Figura 17. Imágenes de campo. a) y b) Posicionamiento del escáner terrestre para la obtención de nubes de puntos sobre el segmento de estudio.....	42
Figura 18. Vista frontal del equipo RIEGL VZ-1000. Fuente: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017.....	43
Figura 19. Vista superior del equipo RIEGL VZ-1000. Fuente: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017.....	44
Figura 20. <i>Puntos estables seleccionados en el registro grueso a) 2021, b) 2022 y c) 2023</i>	46
Figura 21. Estimación de correspondencia entre la nube de referencia no deformada P (roja) y la nube deformada Q (azul). Tomada de Jafari, 2016.....	48
Figura 22. . Categorías para una zona urbana. Fuente: Porras et al., 2014.	49
Figura 23. Barra de herramientas de la función Módulo LiDAR de Global Mapper 22.0. Fuente: Blue Marble Geographics, 2017.....	50
Figura 24. Clasificación de nube de puntos. a) Nubes de puntos completas sin clasificar de 2021. b) Nubes de puntos del segmento de estudio clasificadas.....	51
Figura 25. Barra de herramientas de la función Analysis de Global Mapper 22.0, para la generación del Modelo Digital de Elevación (MDE). Fuente: (Blue Marble Geographics, 2017.	52
Figura 26. Herramienta Line Density en ArcMap. Fuente: (ESRI, 2016).....	54

Figura 27. Medición de distancia en el algoritmo de búsqueda de vecino más cercano. Tomdade (Jafari, 2016).....	55
Figura 28. Modelo Digital de Terreno (MDT) obtenido a partir de las nubes de puntos. El rango de colores indica las alturas, siendo el azul las mínimas y el rojo las máximas.	57
Figura 29. Mapa planimétrico, donde se muestra la división de las siete sección a partir del MDT.....	58
Figura 30. Mapa de densidad de fracturas.....	59
Figura 31. a) Fracturas sobre la carpeta asfáltica, la parte oscura corresponde a los saneamientos realizados en la vialidad, b), c) y d) Deformaciones visibles sobre la vialidad.	60
Figura 32. Perfil 1. Descripción geométrica del talud.....	62
Figura 33. Perfil 2. Descripción geométrica del talud.....	62
Figura 34. Perfil 3. Descripción geométrica del talud.....	63
Figura 35. Mapa inventario de deslizamientos.....	64
Figura 36. a) Perfil topográfico A-A' del PRM 1, donde se muestran las características de fracturas superficiales inferidas, así como el cuerpo principal del deslizamiento, b) Dimensiones aproximadas del cuerpo de acuerdo con (IAEG Commission on Landslides, 1990).....	66
Figura 37. a) Perfil topográfico B-B' del PRM 2, donde se muestran las características de fracturas superficiales inferidas, así como el cuerpo principal del deslizamiento, b) Dimensiones aproximadas del cuerpo de acuerdo con (IAEG Commission on Landslides, 1990).....	68
Figura 38. PRM 2 observado en campo a la altura del estacionamiento de Soriana del Río.	68
Figura 39. a) Perfil topográfico C-C' del PRM 3, donde se muestran las características de fracturas superficiales inferidas, así como el cuerpo principal del deslizamiento, b) Dimensiones aproximadas del cuerpo de acuerdo con (IAEG Commission on Landslides, 1990).....	70
Figura 40. PRM 3 observado en campo a la altura del estacionamiento de Soriana del Río.	70

Figura 41. a) Perfil topográfico D-D' del PRM 4, donde se muestran las características de fracturas superficiales inferidas, así como el cuerpo principal del deslizamiento, b) Dimensiones aproximadas del cuerpo de acuerdo con (IAEG Commission on Landslides, 1990).....	72
Figura 42. PRM 4 observado en campo a la altura del estacionamiento de Soriana del Río, se observa la deformación de la guarnición, así como el hundimiento de la carpeta asfáltica (Google, 2023).....	72
Figura 43. Gráficas de velocidad correspondientes a la sección 1, 2 y 3.....	75
Figura 44. Gráficas de velocidad horizontal correspondientes a la sección 4, 5, 6 y 7.....	76
Figura 45. Gráficas de vertical correspondientes a la sección 1,2,3 y 4.....	77
Figura 46. Gráficas de vertical correspondientes a la sección 5, 6 y 7.....	78
Figura 47. Sección 1. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.	79
Figura 48. Perfil topográfico A-A', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	80
Figura 49. Perfil topográfico B-B', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	81
Figura 50. Perfil topográfico C-C', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	82
Figura 51. Perfil topográfico D-D', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	83
Figura 52. Perfil topográfico E-E', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos	84
Figura 53. Sección 2. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.	85

Figura 54. Perfil topográfico A-A', sección 2 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	86
Figura 55. Sección 3. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.	87
Figura 56. Perfil topográfico A-A', sección 3 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	88
Figura 57. Perfil topográfico B-B', sección 3 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	89
Figura 58. Perfil topográfico C-C', sección 3 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	90
Figura 59. Sección 4. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.	91
Figura 60. Perfil topográfico A-A', sección 4 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	92
Figura 61. Sección 5. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.	93
Figura 62. Perfil topográfico A-A', sección 5 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	94
Figura 63. Perfil topográfico B-B', sección 5 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	95
Figura 64. Perfil topográfico C-C', sección 5 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	96

Figura 65. Sección 6. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.	97
Figura 66. Perfil topográfico A-A', sección 6 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	98
Figura 67. Perfil topográfico B-B', sección 6 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	99
Figura 68. Sección 7. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023	100
Figura 69. Perfil topográfico A-A', sección 7 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los procesos de remoción en masa a partir del mecanismo y material involucrado. Fuente: Información tomada de Ayala, 2000.....	11
Tabla 2. Rango de errores de las nubes de puntos en el registro grueso.....	46
Tabla 3. Rango de errores en las nubes de puntos en el registro fino.	48
Tabla 4. Cantidad de puntos totales , clasificados y submuestreo por cada monitoreo.	51
Tabla 5. Velocidades horizontales anuales a partir de las nubes de puntos.	74
Tabla 6. Velocidades verticales anuales a partir de las nubes de puntos.	74
Tabla 7. Valores de desplazamiento para cada temporalidad.....	102

Resumen

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) son el fenómeno natural más peligroso que causa graves daños a la infraestructura humana o incluso provoca un gran número de muertes cada año. La evaluación y gestión del peligro de movimientos en masa, especialmente debido a deslizamientos de tierra, es, por tanto, uno de los principales problemas, especialmente en las regiones montañosas con desarrollo urbano. En este estudio los deslizamientos de tierra están relacionados con la erosión fluvial del río Chiquito en Morelia, Michoacán. El Río Chiquito es el segundo canal y afluente más importante del Río Grande, que atraviesa la ciudad de Morelia. Tiene una longitud aproximada de 17 km comienza al sur del municipio de Morelia, en los pueblos de La Lobera y La Lechuguilla, siendo los 7 km restantes al cauce rectificado.

A su paso por el área urbano, este canal presenta frecuentes desbordamientos, particularmente en épocas de lluvias, lo que pone en riesgo de inundaciones a la población cercana. Además, en el tramo comprendido entre la Av. Ventura Puente y Calzada Juárez, se observan grietas semicirculares y pequeñas depresiones en la capa asfáltica, posiblemente asociadas a la inestabilidad de las riberas de dicho río. Por lo tanto, el riesgo de inundaciones aumenta por la probabilidad de que se desarrolle una presa de deslizamiento de tierra. Este proyecto tiene como objetivo evaluar el peligro de inestabilidad de las laderas del Río Chiquito monitoreando la deformación del terreno, elaborando la cartografía-inventario de MRP, e identificando condicionantes y posibles desencadenantes, a través del levantamiento de datos a través del Escáner Láser Terrestre (TLS).

La fase de campo fue fundamental, se realizaron tres monitoreos con temporalidad de 1 año, a partir de las nubes de puntos del primer monitoreo en 2021 se obtuvo un MDT de alta resolución, este permitió cartografiar las fracturas de la carpeta asfáltica y la caracterización geométrica del talud, a partir de perfiles topográficos transversales. La segunda fase fue el trabajo de gabinete, el cual consistió en tres etapas para el procesamiento de datos: georreferenciación, limpieza de ruido externo y obtención de la cinemática a partir de la comparación de nubes. A partir de los resultados obtenidos se cartografiaron un total de 643 fracturas. La comparación de nubes dio desplazamientos heterogéneos en todo el segmento de estudio, con valores mínimos de -0.039 y máximos de - 0.1. Las observaciones en campo

y el MDT, permitieron delimitar y caracterizar la morfología de cuatro deslizamientos, clasificándolos como deslizamientos rotacionales. Estos resultados permitieron determinar que las causas principales de esta inestabilidad del talud son de índole antropogénico.

Palabras clave: canal, represamiento, Escáner LiDAR Terrestre, subsidencia diferencial, nube de puntos.

Abstract

Mass Removal Processes (MRP) are the most dangerous natural phenomenon that causes severe damage to human infrastructure or even causes a large number of deaths each year. The assessment and management of the danger of mass movement, especially due to landslides, is, therefore, one of the main problems, particularly in mountainous regions with urban development. In this study, the landslides are related to fluvial erosion of the Chiquito River in Morelia, Michoacán. The Río Chiquito is the second most important canal and tributary of the Río Grande, which runs through the city of Morelia. It has an approximate length of 17 km, beginning south of the municipality of Morelia, in the towns of La Lobera and La Lechuguilla, with the remaining 7 km being the rectified riverbed.

As it cross the urban area, this canal has frequent overflows, particularly in rainy seasons, which put the nearby population at risk of flooding. Furthermore, in the segment between Av. Ventura Puente and Calzada Juárez, semicircular cracks and small depressions are observed on the asphalt layer, possibly associated with the instability of the banks of said river. Thus, the risk of flooding is enhanced by the probability of the development of a landslide dam. This project aims to evaluate the danger of instability of slopes of the Rio Chiquito by monitoring the deformation of the terrain, preparing the cartography-inventory of MRP, and identifying conditioning factors and possible triggers, through the survey of data through the Terrestrial Laser Scanner (TLS).

The field phase was fundamental, three monitoring periods of 1 year were carried out, from the point clouds of the first monitoring in 2021 a high-resolution MDT was obtained, this allowed mapping the fractures of the asphalt layer and the geometric characterization of the slope, based on transverse topographic profiles. The second phase was the office work, which

consisted of three stages for data processing: georeferencing, cleaning of external noise and obtaining the kinematics from the comparison of clouds. From the results obtained, a total of 643 fractures were mapped. The comparison of clouds gave heterogeneous displacements throughout the study segment, with minimum values of -0.039 and maximum of - 0.1. Field observations and MDT allowed us to delimit and characterize the morphology of four graduals, classifying them as rotational graduals. These results allowed us to determine that the main causes of this slope instability are anthropogenic in nature.

Keywords: canal, landslide dams, Terrestrial LiDAR Scanner, differential subsidence, point cloud.

1. Introducción

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) son fenómenos naturales muy peligrosos que causan daños severos a la infraestructura humana o incluso gran cantidad de muertes cada año (Silhán, et al., 2019). En la literatura los PRM o procesos de ladera (slope processes) son igualmente denominados como procesos gravitacionales (gravitational processes) o, en sentido coloquial se conocen también como deslaves o derrumbes (Alcántara-Ayala, 2000; Lavell, 2003; Borja-Baeza y Alcántara-Ayala, 2010). Se ha visto un aumento de este fenómeno por acción del cambio climático que ha provocado altas precipitaciones de mayor duración (Mora-Ortiz y Rojas-González, 2012). La evaluación y el manejo del peligro de movimiento de masa, especialmente por deslizamientos, es, por lo tanto, uno de los principales problemas, particularmente, en regiones montañosas con desarrollo urbano. Las relaciones de magnitud-frecuencia son la mejor expresión de los mecanismos complejos de ocurrencia de movimiento de masas. Por lo tanto, la magnitud y la frecuencia son datos de entrada esenciales para la evaluación de peligro (Malik et al., 2017).

Los PRM se clasifican de acuerdo con el mecanismo de movimiento y material, dentro de esta clasificación se encuentran los desprendimientos, vuelco o desplome flujos, expansión lateral, complejos, deslizamiento traslacional y rotacional.

Los deslizamientos rotacionales se caracterizan por superficies de ruptura cóncavas, curvas o en forma de cuchara, grietas en la superficie original del terreno a lo largo donde se formará el escarpe principal, escarpe principal regularmente vertical y carente de soporte, lo cual puede generar movimientos posteriores, en su parte baja acumulación de la masa desplazada (Cruden & Varnes, 1996).

El estudio de represamientos por deslizamientos de tierra es una parte fundamental de la gestión del riesgo. El represamiento de ríos por deslizamientos es el resultado de la interacción entre deslizamientos y ríos, estos están determinados por el movimiento de deslizamientos (Jin et al., 2022). Dichos estudios de estos deslizamientos se han centrado principalmente en el bloqueo del río, clasificándolo como obstrucción parcial o total, así como el riesgo que conllevan estos eventos (Ortiz-Giraldo et al., 2023).

En la ciudad de Morelia se desarrolla el Río chiquito de oriente a poniente a lo largo de la av. solidaridad, la cual se ha visto afectada por deformaciones y fracturas, tanto en su parte sur como en la norte. Dentro de estas deformaciones se distinguen la separación de la carpeta asfáltica y las guarniciones, así como el hundimiento de estas. Dichas deformaciones pueden estar ligadas a PRM, existiendo un riesgo por represamiento en el canal.

Para poder determinar las posibles causas de estas deformaciones, se implementó el uso del Escáner LiDAR Terrestre (TLS). Se obtuvieron nubes de puntos a partir de tres monitoreos con temporalidad de 1 año, permitiendo obtener mayor detalle del terreno, la identificación de las zonas con mayor deformación y su velocidad de desplazamiento.

1.1 Planteamiento del problema

El Río Chiquito es un afluente que atraviesa la ciudad de Morelia con una dirección Este-Oeste. La trayectoria original del río fue rectificada en 1936, con la finalidad de evitar inundaciones en la zona. No obstante, en la última década se han hecho evidentes rasgos cinemáticos que indican la inestabilidad en los taludes del río y que afectan a la Av. Solidaridad, vialidad construida a ambos costados del canal, más específicamente entre las calzadas Juárez y Ventura Puente. Esta situación pone en riesgo la operatividad de la Av. Solidaridad, la estabilidad estructural de las casas-habitación cercanas a la vialidad y cauce, y el flujo de agua del río la cual podría verse interrumpida ante un eventual dique-deslizamiento con severas consecuencias en la población cercana. Hasta el momento no se tiene un registro cartográfico del agrietamiento y mucho menos de la evolución espaciotemporal de la deformación, por lo que se imposibilita el análisis de su correlación con respecto a potenciales factores condicionantes y detonantes.

1.2 Hipótesis

Caracteriza la geometría y cinemática de las deformaciones de los bordos del Río Chiquito, permitirá obtener las posibles causas que estén detonando dichas deformaciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Efectuar la caracterización geométrica y cinemática de la inestabilidad de taludes del Río Chiquito.

1.3.2 *Objetivo particular*

- Levantamiento de tres monitoreos utilizando un escáner laser terrestre.
- Efectuar el registro de las tres nubes de puntos (georreferenciación y alineación)
- Efectuar el mapa inventario de la inestabilidad de taludes a partir de la cartografía de deformaciones identificables sobre las nubes de puntos, y verificarlas en campo.
- Evaluar el desplazamiento en las direcciones X, Y y Z.
- Evaluar velocidades de la deformación.
- Evaluar la dirección preferencial de fracturas.
- Correlacionar los factores naturales y antropogénicos con la evolución paulatina de la inestabilidad de los taludes del cauce del Río Chiquito.
- Proponer las posibles medidas de mitigación que permitan disminuir los riesgos identificados en la zona y que afecten de manera considerable a la comunidad.

2. Marco conceptual

2.1 Amenazas Naturales

Los fenómenos naturales son aquellos eventos que se producen en la naturaleza, es decir, que no son provocados directamente por la acción humana. Cuando estos eventos se tornan peligrosos para el ser humano, se les denomina amenazas naturales. Las amenazas antropogénicas, son aquellos generados por la actividad humana (DDRMA, 1991)(Fig. 1).

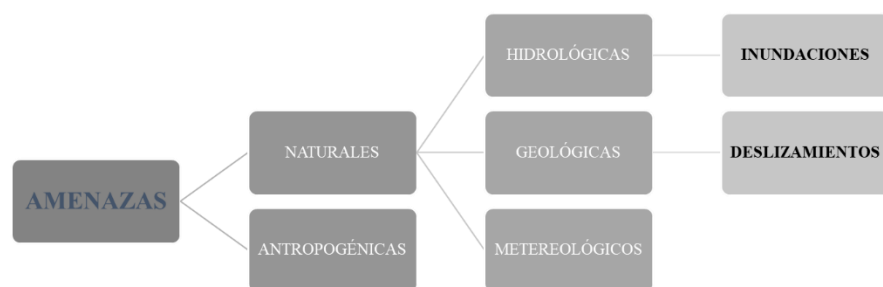


Figura 1. Tipos de amenazas

En este trabajo, las amenazas naturales que se abordan son de índole hidrológico y geológico:

Inundaciones. Las inundaciones son aquellos eventos producidos por una precipitación máxima, tormenta.

Deslizamientos. Evento que se caracteriza por caída de rocas, derrumbes, flujo de materiales no consolidados, que pueden desencadenarse por actividad sísmica, saturación del suelo por altas precipitaciones o la erupción de un volcán.

2.2 Procesos de Remoción en Masa

Los procesos de remoción en masa (PRM), en inglés *mass movement processes*, son igualmente conocidos como procesos de ladera (*slope processes*), procesos gravitacionales (*gravitational processes*) o en sentido general como deslizamientos (*landslides*). La definición de los PRM ha evolucionado con el paso del tiempo, a partir de las ideas de diferentes especialistas en la materia. Sharpe (1938), define un *landslide*, como aquel movimiento ladera abajo de material seco (roca, tierra), a través de un mecanismo de movimiento o desprendimiento de este. Por otro lado Varnes (1958) lo define como un movimiento hacia abajo y hacia afuera, de los materiales ya sean naturales o artificiales, que conforman los taludes. Skempton y Hutchinson (1969) describen un deslizamiento, como el movimiento de ladera debajo de suelo o rocas que ocurre en una superficie de cizallamiento, en los límites de la masa desplazada. Coates (1977), lo plantea como un conjunto de fenómenos en donde la gravedad, es la principal fuerza involucrada, mientras que Brunsden (1979) opta por el término de procesos de remoción en masa, en donde el movimiento del material ladera abajo no requiere un medio de transporte, ya sea agua, hielo o aire.

Alcántara-Ayala (2000) hace referencia a la inconsistencia de agrupar los términos anteriores a los diferentes tipos de procesos de remoción en masa bajo el término *landslide*, ya que cada proceso se diferencia por el mecanismo de movimiento y el material involucrado, por lo cual propone, la traducción de *landslide* como “movimiento del terreno”.

En este trabajo, los PRM se definen como el movimiento hacia abajo de los materiales formadores de laderas o taludes bajo la acción de la gravedad.

Existen numerosos sistemas de clasificación de los PRM, cada uno toma en cuenta distintas características. Por ejemplo, hay clasificaciones de acuerdo a los atributos morfológicos de la superficie de ruptura y el área de depósito (Skempton, 1953; Blong, 1973; Brunsden, 1973; Crozier, 1973), de acuerdo al tipo y velocidad de movimiento (Sharpe, 1938; Ward, 1945; Hutchinson, 1968; Zaruba y Menci, 1969; Coates, 1977; Varnes, 1978), según el tamaño y tipo de los materiales involucrados (Zaruba y Menci, 1969), dependiendo del grado de actividad (Erskine, 1973) o clasificación climática (Hutchinson, 1968).

Las clasificaciones más aceptadas en el mundo de habla inglesa son las que definió Varnes (1954, 1978) y Hutchinson (1968), EPOCH (1993), elaboró una diferencia entre el tipo de movimiento y los materiales involucrados a partir de las clasificaciones ya mencionadas (*Tabla 1*). Esta nueva clasificación es la más aceptada a nivel internacional, la cual se basa en el mecanismo del movimiento estos movimientos los dividen en caídas o desprendimientos (*falls*), vuelcos o desplomes (*topples*), deslizamientos (*slides*), expansiones laterales (*lateral spreading*), flujos (*flows*) y movimientos complejos (*complex movements*) (Alcántara-Ayala, 2000). Con base en las características físicas del área de estudio se describen a continuación los tipos de movimientos (EPOCH, 1993):

Deslizamientos (Landslides) Son movimientos que ocurren sobre una o varias superficies de ruptura. Pueden ser progresivos (no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla), de velocidad y extensión muy variables y en donde pueden operar varios agentes de movimiento, como agua, aire y viento. La superficie de ruptura o superficie de debilidad determina del tipo de deslizamiento, donde las superficies cóncavas, curvas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales (*rotational slide o slump*), las superficies de ruptura semiplanas u onduladas a los movimientos traslacionales (*translational slide, block slide o slab slide*) y las superficies de ruptura planas a los deslizamientos planos (*rockslide, debris slide, mudslide*).

Flujos (Flows) Movimientos de masas de material fino a grueso. Por su alta presencia de agua, tiende a comportarse como un «fluido», sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas. Algunos flujos pueden resultar de la alteración de suelos como sedimentos no consolidados. Estos se clasifican de acuerdo con su contenido, en flujos de rocas (*rock flows*), flujos de derrubios (*debris flows*) y flujos de arena o suelo (*soil flows*).

- a) **Flujos de derrubios (*debris flows*)**. Se caracterizan por material grueso de diferente diámetro (bloques de rocas, derrubios y roca compuesta). Pueden ser activados por la

actividad pluvial, debido a la pérdida de resistencia, debido a la saturación de agua dentro de los poros del material. Se originan en pendientes que de 20 a 45° y su velocidad va de 1 m/s hasta 12-15 m/s (González de Vallejo, 2004).

- b) Flujos de arena o suelo (*soil flows*).** Se dan en materiales finos (arena, limo, arcilla). La pérdida de estabilidad suele estar relacionada con la saturación de agua, mientras que, en los suelos arenosos secos, el movimiento puede ser inducido por actividad sísmica. La velocidad de desplazamiento puede variar, suele estar relacionada a la pendiente de la ladera y la cantidad de agua.

Expansiones laterales Movimientos en sentido lateral o casi horizontal, resultado de la fracturación y expansión de suelos o materiales rocosos compactos superficiales. Están relacionados a la licuefacción o fluidización del material subyacente menos competente. Se clasifican en expansiones laterales en rocas (*rock spreading*), en derrubios (*debris spread*) y en suelos (*soil spreading*).

Movimientos complejos Movimiento inicial que se transforma en otro al desplazarse ladera abajo, ocurre cuando se presentan diferentes tipos de mecanismo de ruptura o falla o la combinación de estas. Dentro de estos movimientos se encuentran las avalanchas de rocas (*rock avalanche*), de detritos (*debris avalanche*), flujos deslizantes (*flow slide*) y flujo de tierras (*slump-earthflow*)

Mecanismo de movimiento	Tipo de material involucrado		
Tipo	Roca (<i>rock</i>)	Derrubios(<i>debris</i>)	Suelo (<i>soil</i>)
Desprendimientos (<i>falls</i>)	Caída o desprendimiento de rocas (<i>rockfall</i>)	Caída o desprendimiento de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caída o desprendimiento de suelos (<i>soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>topple</i>)	Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelos (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)	Individual (<i>simple</i>) Multiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Multiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Multiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)
Deslizamiento translacional o de bloque no rotacional (<i>translational slide, non-rotational</i>)	Deslizamiento de roca en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelos (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Flujos (<i>flows</i>)	Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo (<i>soil flow</i>)
Expansión lateral (<i>lateral spreading</i>)	Expansiones laterales en rocas (<i>rock</i>)	Expansiones laterales en derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones laterales en suelos (<i>soil spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)	Ejemplo: Alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: Flujo deslizante (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: Rotación con fujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

Tabla 1. Clasificación de los procesos de remoción en masa a partir del mecanismo y material involucrado. Fuente: Información tomada de Ayala, 2000.

2.3 Geometría de los PRM

Como se mencionó anteriormente, la definición de PRM parte de las ideas de diferentes autores. Cruden y Varnes (1993), describen las características observables de los

movimientos de masa (*Fig. 2*) y, a partir de esta descripción Suárez Díaz (1998), sintetiza la geometría de los deslizamientos en doce partes, las cuales se describen a continuación:

Escarpe principal Corresponde a la superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material.

Escarpe secundario Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa en movimiento.

Cabeza Parte superior de la masa del material que se mueve.

Cima Este corresponde al punto más alto de la cabeza, el cual tiene contacto entre el material perturbado y el escarpe principal

Corona Parte donde el material se encuentra inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.

Superficie de falla Área debajo del movimiento que delimita el volumen del material desplazado.

Pie de la superficie de falla Línea de intercepción entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

Base Área cubierta por el material perturbado

Punta o uña Punto que se encuentra a más distancia de la cima

Cuerpo Material desplazado el cual se encuentra por encima de la superficie de falla.

Costado o flanco Un lado (perfil lateral) del movimiento

Superficie original del terreno Superficie que existía antes de la ocurrencia del movimiento.

Derecha e Izquierda Deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

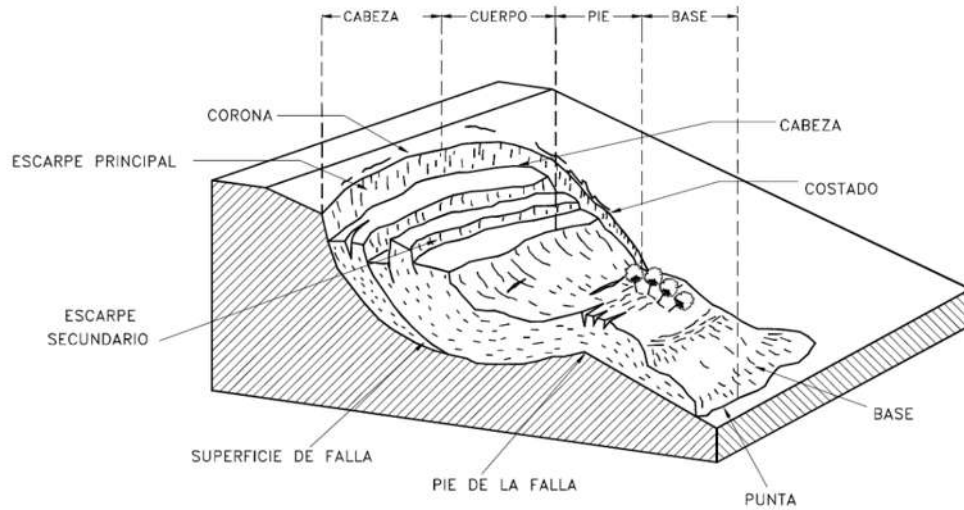


Figura 2. Nomenclatura de un deslizamiento. Fuente: Suárez,-Díaz 1998.

2.4 Nomenclatura de un talud o ladera

Un talud o ladera se define como una masa de tierra que no es plana si no que posee cambio de pendiente (*Fig. 3*). Una ladera se define cuando su formación fue de origen natural y talud cuando su origen es antropogénico. Los taludes se clasifican en tres categorías: a) terraplenes, b) cortes de ladera natural y c) muros de contención (Suárez-Díaz, 1998).

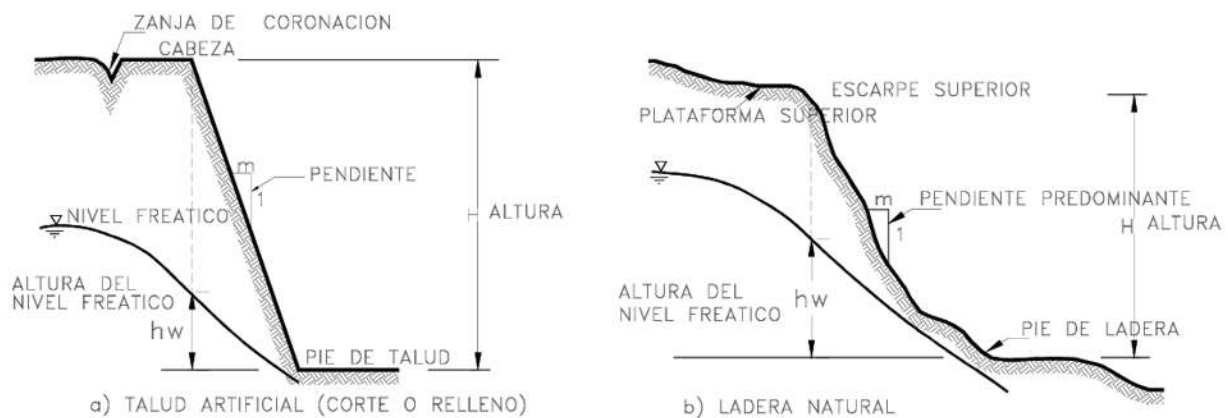


Figura 3. Nomenclatura de taludes y laderas. Fuente: Suárez-Díaz, 1998.

Definición de los elementos constitutivos de un talud o ladera:

1. **Altura.** Distancia vertical entre el pie y la cabeza.
2. **Pie.** Sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe.** Sitio de cambio brusco en su parte superior
4. **Altura de nivel freático.** Distancia vertical desde el pie de talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
5. **Pendiente.** Inclinação del talud o ladera.

2.5 Estabilidad de talud

Se define como la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. La estabilidad de un talud dependerá de la resistencia del material del cual estén compuestos, a los empujes a los que estén sometidos o las discontinuidades que presenten (Valladares-Ibarra, 2015).

2.6 Factores que determinan la estabilidad de un talud

La estabilidad de una ladera o talud está directamente relacionadas con aquellos factores capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre esta.

Budhu, (2007) menciona los factores principales que pueden afectar la estabilidad de un talud natural o antropogénico, estos son:

- i. **Erosión.** El agua y viento erosionan continuamente las laderas naturales y antropogénicas, provocando un cambio en la geometría de la pendiente. Los ríos o arroyos erosionan las partes más bajas del talud, resultando un colapso de la pendiente o deslizamiento de tierra.

- ii. **Precipitaciones.** Las lluvias intensas saturan, ablandan y erosionan el suelo, el agua se infiltra a través de las grietas existentes debilitando las capas subyacentes, provocando deslizamientos de lodo.
- iii. **Sismos.** Los sismos inducen fuerzas dinámicas reduciendo la resistencia al corte y rigidez del suelo. En suelos saturados de grano grueso la presión de poro aumenta, provocando que los suelos se comporten como fluidos viscosos, a este fenómeno se le conoce como licuefacción.
- iv. **Geología.** Algunas fallas de talud son provocados por aspectos geológicos no detectados, como las características litológicas, estructurales y estratigráficas. El conjunto de estos aspectos, determinar la superficie de falla que puede presentarse, siendo de tipo planar, circular, en cuña, por inclinación o por colapso de la estructura.
- v. **Cargas externas.** Las cargas sobre la corona del talud aumentan la carga gravitacional, provocando la falla de la pendiente.
- vi. **Excavación y/o rellenos.** La actividad de construcción cerca del pie del talud pueden causar fallas al eliminar la resistencia lateral. Estas actividades corresponden a trabajos de excavación o rellenos.

3. Antecedentes

3.1 Antecedentes históricos locales

El Río Chiquito se ubica en la parte baja de la loma de Santa María, con una longitud aproximada de 25 km, se desarrolla de oriente a poniente a lo largo de la Av. Solidaridad. Es el principal afluente del Río Grande, el cual divide la ciudad en dos partes, antes de desembocar en la cuenca del Lago de Cuitzeo. Su microcuenca está ubicada al SE de la ciudad, compone la segunda fuente de importancia para el abasto de agua de la mancha urbana, conjuntamente es una zona de reserva ecológica.

Entre los años 1936-1938, se llevó a cabo la rectificación del Río Chiquito (*Fig. 4*), con el propósito de evitar las inundaciones recurrentes que se producían durante el siglo XIX (Güiza et al., 2020). La construcción del nuevo canal del Río Chiquito se realizó de forma paralela al cauce natural que presentaba una forma irregular. Este antiguo cauce se ubicaba en donde actualmente se encuentra el Boulevard García de León. Esta obra contrajo efectos negativos, ya que provocó un perímetro mayor de inundación, esto debido a la ausencia del Plan de Crecimiento de la ciudad (Vieyra A. y Larrazábal A., 2014). En los años cincuenta, el Río Chiquito fue entubado (*Fig. 5*) para funcionar como drenaje de aguas negras, así como para evitar la formación de ciénegas e inundaciones (Güiza et al., 2020).

Estudios previos de las inundaciones en la ciudad de Morelia concuerdan en que la principal condición de las inundaciones es la ausencia del Plan de Crecimiento de la ciudad, debido a la rectificación de los cauces naturales, utilizando los antiguos cauces para el desarrollo urbano (Arreygue-Rocha et al., 2012). No se tomaron en cuenta las características hidrológicas del cauce, el nivel de la corona del canal, siendo este de mayor altura que el de las calles perimetrales, la construcción de numerosos puentes, que representan un obstáculo para la escorrentía del río. Asimismo, los materiales arrastrados se acumulan en los primeros puentes, formándose diques y disminuyendo el área del cauce, provocando el desbordamiento e inundaciones en la zona urbana cercana al río. La fuerte sedimentación sobre el cauce del río y la espesa vegetación han disminuido considerablemente el área de desfogue del río, que en tiempo de lluvias excepcionales ponen en riesgo de inundación a las colonias aledañas al mismo (Arreygue-Rocha et al., 2005).

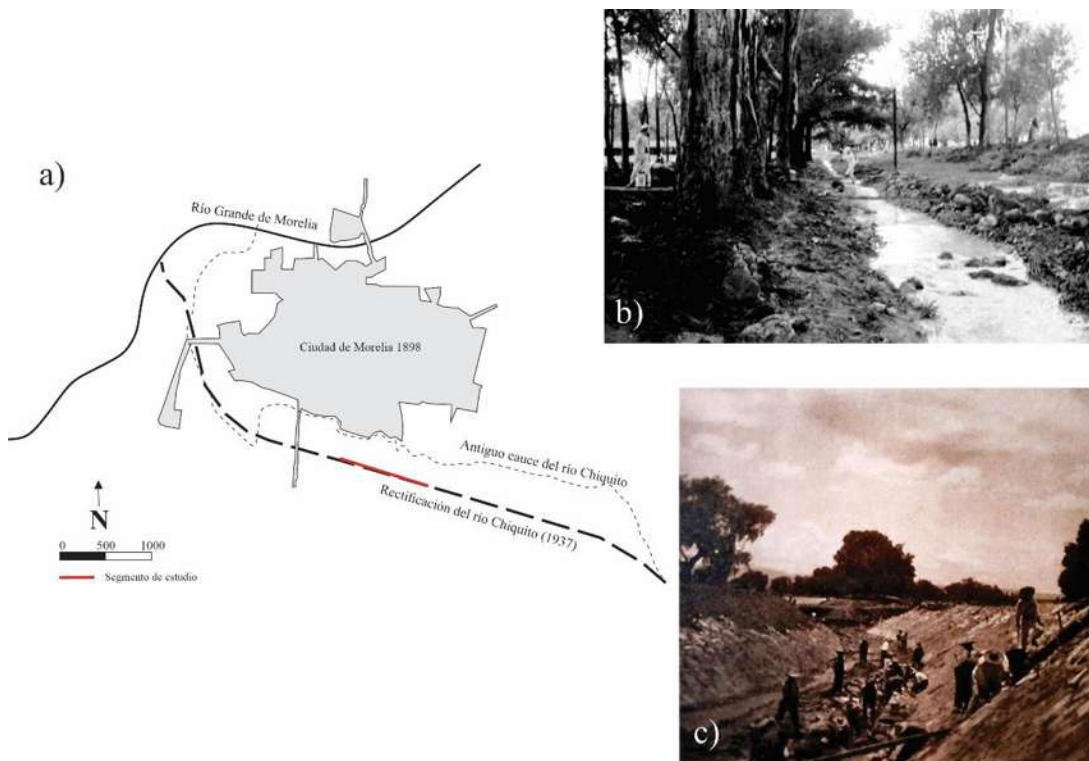


Figura 4. a) Mapa de Morelia de 1898 donde se muestra el antiguo cauce del Río Chiquito y su posterior rectificación b) Antiguo cauce del Río y c) Rectificación (1937). Fuente: (Güiza et al., 2020) y fotografías por Morelia a través del tiempo.



Figura 5. Entubamiento del Río Chiquito. Fuente: Morelia a través del tiempo.

En los últimos años la ciudad de Morelia se ha visto afectada por inundaciones debido a las lluvias torrenciales presentadas en la temporada de lluvias, lo que ha afectado la capacidad hidráulica del Río Grande y Chiquito, siendo esta rebasada, ocasionando que la corriente sufriera desbordamientos en sus cauces (Domínguez-Sánchez et al., 2014).

En septiembre del año 2003, el Río Grande presentó un desbordamiento por una avenida extraordinaria, afectando colonias de la ciudad, entre las cuales se encontraban Tres Puentes, Carlos Salazar, Prados Verdes y Felicitas del río (Godínez, 2007). Estas inundaciones se volvieron a presentar en el mes de junio de 2017, donde el Río Chiquito presentó desbordamiento, afectando las instalaciones de Policía y Tránsito (Quadratín, 2017). En octubre de 2018, las lluvias torrenciales provocadas por el huracán “Willa” y la tormenta tropical “Vicente” provocaron inundaciones debido al desbordamiento del Río Grande, con al menos 27 colonias inundadas, siendo las colonias Ventura Puente, Carlos Salazar, Jacarandas, Los Manantiales e Industrial las más afectadas (Rivero, 2018).

Estos eventos también se han presentado en otras ciudades, como el desbordamiento del canal La compañía en Valle de Chalco (La Jornada, 2010), el desbordamiento del canal Lerma, en Ixtapaluca, Edo de México (WRadio, 2023), desbordamiento del canal en Cuauhtepic, en la alcaldía Gustavo A. Madero (NMas, 2023), las inundaciones en Concordia, en Sinaloa, provocadas por el desbordamiento de río y canales pluviales (RÍODOCE, 2023).

3.2 Represamientos por PRM

La presa de deslizamientos (landslide dams) se define como aquellos deslizamientos de tierra en movimiento que bloquean un curso de agua permanente o efímero, dando lugar a la formación de un reservorio natural de agua y/o sedimentos. Estos varían de tamaño desde pocos metros cúbicos hasta varios kilómetros cúbicos (Hermanns, 2013). Una primera clasificación de estos deslizamientos fue descrita por (Costa y Schuster, 1987), la cual se basa en la distribución bidimensional del deslizamiento en un solo valle y la forma en planta de la presa. La identificación de depósitos de presas por deslizamientos ha limitado esta

clasificación, Hermanns et al. (2011), proponen una nueva clasificación tomando en cuenta la relación tridimensional de los cuerpos de deslizamientos y también los fenómenos comunes; a) lagos formados en el propio depósito del deslizamiento, b) formación de múltiples presas de deslizamiento de tierra en un valle, c) presas de deslizamiento de tierra en confluencias de dos o más valles fluviales y d) el caso más raro de presas de deslizamiento de tierra que afectan las divisiones de drenaje (Hermanns, 2013).

A partir de eventos históricos de represamientos por deslizamientos al suroeste de Noruega, se realizó un modelo de medición a partir de inventarios y características de presa de deslizamientos (*Fig. 6*), esta última descrita y modificada por Hermanns et al. (2011). Para dicho análisis se tomaron en cuenta lagos actuales como indicadores de posibles represas incautadas por derrumbes masivos de taludes rocosos (*RSF*, por sus siglas en inglés). Las presas detectadas se cartografiaron y registraron en una base de datos geoespacial (Oppikofer et al., 2020). Las características de la presa incluyen:

- Tipo de deslizamiento de tierra.
- Clasificación morfológica de las presas (vista en planta y perfil)
- Dimensiones (ancho del valle *WV*, ancho de la presa *WD*, longitud de la presa *LD*, área de la presa *AD*, altura media de la presa *HD_{mean}*, altura máxima de la presa *HD_{max}* y el volumen de la presa *VD*).
- Zona de captación de agua (*AC*) aguas arriba y el valor del índice de bloqueo adimensional (*DBI*) resultante.
- Evaluación de la estabilidad de la presa.

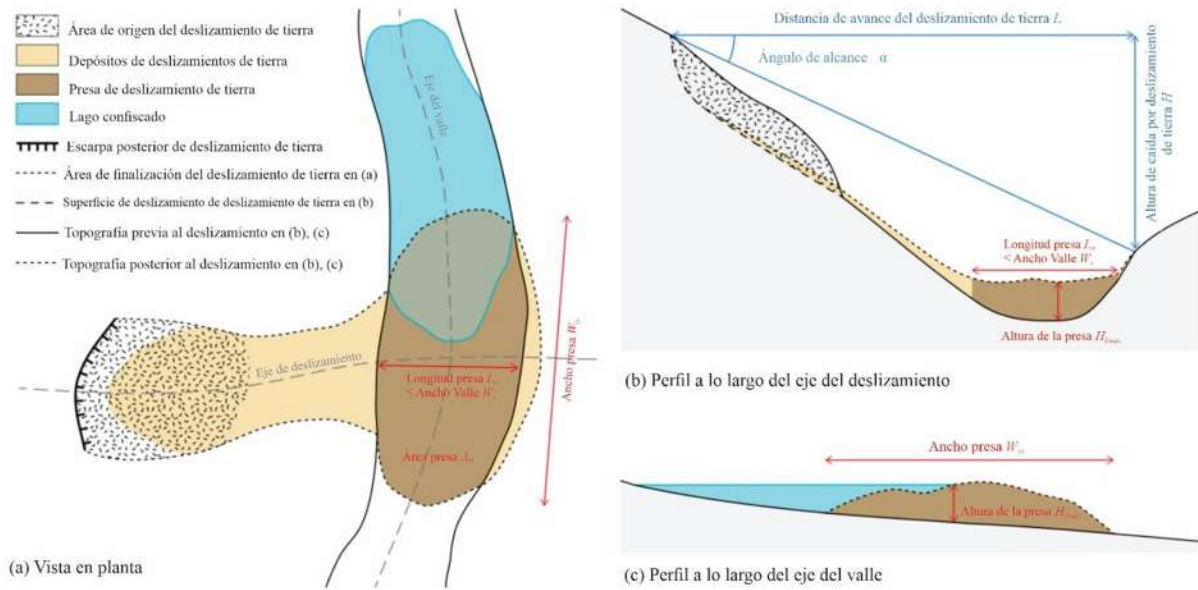


Figura 6. Bocetos de una presa contra deslizamientos de tierra con las dimensiones medidas. Fuente: Oppikofer et al., 2020.

El estudio de represamientos por deslizamientos de tierra es una parte fundamental de la gestión del riesgo. El represamiento de ríos por deslizamientos es el resultado de la interacción entre deslizamientos y ríos, estos están determinados por el movimiento de deslizamientos, la deposición de sedimentos, por el ancho del canal entre otros parámetros morfométrico e hidrológicos. Estudios previos determinaron que las características del deslizamiento (magnitud, topografía, materia) y las características hidrológicas (ancho del valle, descarga, nivel hidráulico), se combinan para determinar la probabilidad de un represamiento en el cauce de un río (Jin et al., 2022). Los represamientos representan una amenaza considerable para la seguridad de seres humanos y la infraestructura. Estos pueden causar inundaciones aguas arriba e inundaciones por ruptura de presas aguas abajo (Zeng et al., 2022). A gran escala, estos eventos son un peligro geológico típico en las regiones montañosas tectónicamente activas, en Estados Unidos (Schuster y Costa, 1986), Italia (Casagli y Ermini, 1999), Canadá (Clague y Evans, 2000), Nueva Zelanda (Korup, 2005), China (Cui et al., 2009) y Japón (Sassa et al., 2015; Zeng et al., 2022).

Eventos históricos han revelado que la lluvia y los terremotos son dos de los principales desencadenantes de deslizamientos de tierra, en particular, los que bloquean los ríos

desarrollados en las laderas rocosas, son inducidos preferentemente por eventos sísmicos en cinturones montañosos tectónicamente activos (Zhao et al., 2022).

Yang et al. (2022), dividió la evaluación de los represamientos causados por deslizamientos, en cualitativos y cuantitativos. La evaluación cualitativa, contribuye a la comprensión de riesgos aguas abajo y la evaluación cuantitativa, es una base para la mitigación de emergencias, evalúa los riesgos de ruptura de la presa en términos de probabilidad de falla de la presa y pérdida por inundación.

Desde un punto más local, dentro de la ciudad de Morelia existe el caso del Río Chiquito, que, a lo largo del cauce, se observan cuerpos activos que se manifiestan mediante agrietamientos semicirculares y escarpes incipientes que deforman la infraestructura urbana alojada en los taludes del río (*Fig 7*). Además, se han registrado inundaciones históricas relacionadas con el Río Chiquito.

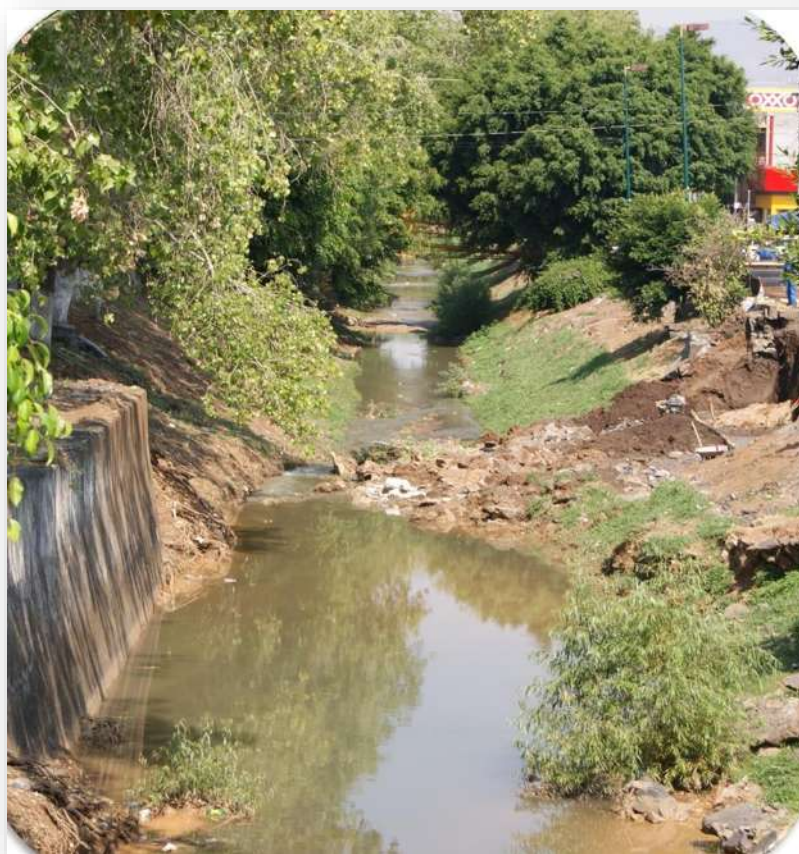


Figura 7. Deslizamiento del talud del Río Chiquito. Fuente: Víctor Manuel Hernández Madrigal.

3.3 LiDAR Terrestre

A través de los años se ha observado el desarrollo paulatino de la obtención y manejo de datos espaciales (Pancino, 2017). La llegada de la tecnología satelital y la informática, marcaron en la última década un antes y un después en el área de Ciencias de la Tierra, la combinación de estas disciplinas derivó de una ciencia común que recibió el nombre de Geomática. A manera de definición, la Geomática es la integración sistémica de técnicas y metodologías de adquisición, almacenamientos, procesamiento, análisis, presentación y distribución de información geográficamente referenciada. Los datos espaciales provienen del apoyo de ciertas disciplinas, tales como: la geodesia y la topografía, la cartografía, la teledetección o percepción remota, la fotogrametría, la geoestadística o análisis espacial, los Sistemas de Posicionamiento Global de Navegación por Satélite (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (Mendoza y Lois, 2009).

La adquisición o levantamiento de datos se apoya de una amplia gama de instrumentos, técnicas y métodos matemáticos. En particular, la Percepción Remota (PR), permite inferir datos de un objeto o del ambiente físico sin estar en contacto directo con ellos, lo cual resulta de gran importancia, cuando se requieren datos sobre amplias zonas geográficas (Mendoza y Lois, 2009).

Esto se hace detectando la energía electromagnética reflejada o emitida a través de sensores. Para que la PR funcione, son necesarios los siguientes elementos: a) Fuente de energía, b) Radiación y atmósfera, c) Cubierta terrestre, d) Sistema sensor, e) Transmisión, recepción y procesamiento y f) Aplicación (Chuvieco, 1995). Los sensores están divididos en pasivos o activos. Los pasivos son aquellos que detectan la energía proveniente de fuentes naturales. Los sensores activos, por otra parte, emiten su propia fuente de radiación, empleando transmisiones y detecciones de energía electromagnética (Villegas-Vega, 2008). Como el LiDAR y los radares. La ventaja de estos es el poder usarlos en cualquier momento y en cualquier situación atmosférica, ya que funcionan como emisor y receptor de su propia energía.

Los sistemas activos, se pueden dividir en tres tipos: SAR (*Synthetic Aperture Radar*), InSar (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) y LiDAR (*Light Detection and Ranging*) (Vargas-Sánchez, 2020).

LiDAR, es un sistema típico de medición y detección mediante laser que transmite pulsos de luz que se reflejan en el terreno y en otros objetos, obteniéndose puntos de alturas o puntos de elevación. Para conocer la distancia se miden los intervalos de tiempo entre la transmisión y la recepción de los pulsos, con base en la información posicional obtenida mediante los receptores del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), ubicados en el medio aerotransportado y la Unidad de Medida Inercial (IMU) (Céspedes y Pérez, 2008).

Los sensores LiDAR se clasifican en Escáner Láser Aerotransportado (ALS) y Escáner Láser Terrestre (TLS), siendo este último el más accesible. El resultado de un levantamiento es una nube densa de puntos tridimensionales irregulares y distribuidos que se caracterizan por tener coordenadas XYZ (Céspedes Salamanca y Pérez Castillo, 2008), que pueden incluir atributos adicionales como intensidad, número de devoluciones, clasificación de puntos, bandas RGB (rojas, verdes y azules), tiempo de registro del GPS, entre otros (Vargas-Sánchez, 2020).

3.4 Técnicas de estudio en los PRM

Los movimientos de masa han sido estudiados partir de una amplia variedad de técnicas de monitoreo, que incluyen inclinómetros, Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Interferometría de Radar de Apertura Sintética (*InSAR*) y Detección y Rango de Luz (*LiDAR*). Cada una de estas técnicas se aplican dependiendo de las características del deslizamiento.

Los inclinómetros proporcionan detalles del subsuelo de los deslizamientos de tierra, que otras técnicas no capturan, con la desventaja de tener una resolución espacial deficiente, además de romperse cuando un deslizamiento se mueve demasiado rápido.

Los GPS, montados permanentemente, permiten el monitoreo de los movimientos de deslizamientos superficiales, sin embargo, el costo de montar las unidades necesarias para la detección es demasiado alto (Conner y Olsen, 2014).

La técnica InSAR, ha brindado un gran apoyo para la detección y monitoreo de peligros naturales, ya que proporcionan datos de desplazamiento del suelo, caracterizados por medidas rápidas y fácilmente actualizables, precisión milimétrica y centimétrica, alta resolución espacial, buen muestreo temporal y cobertura de área amplia, lo cual reduce esfuerzo y costo (Bianchini et al., 2013).

Dentro de esta técnica, para reconstruir la evolución temporal del terreno, se han desarrollado los métodos de A-DInSAR, conocidos como “algoritmos de series temporales”, los cuales están clasificados en dos grupos: Persistent o Permanent Scatter Interferometry (PSI) o Interferometría de Dispersores Persistentes y Small Baseline Subset (SBAS) o conjunto de Líneas de Base Pequeñas (Palacios-Gómez, 2019). Un ejemplo de los países en los que se ha aplicado este método es Turquía (Eker et al., 2021) , España (Bianchini et al., 2013), India (Niraj et al., 2021).

Por otro lado, el escáner terrestre LiDAR ha demostrado ser una herramienta eficaz en la caracterización geológica y evaluación de deslizamientos de tierra (Conner y Olsen, 2014). Esta técnica permite generar con gran rapidez alta densidad de datos georreferenciados. Esto se consigue con la combinación de tres tecnologías: un láser, un sistema de referencia inercial de alta precisión (*IMU, Inertial Measurement Unit*) y un sistema de posicionamiento global por satélite (Navarro-Cerrillo et al., 2010).

LiDAR, proporciona los datos en forma de nube de puntos tridimensional, donde cada punto tiene sus propias coordenadas XYZ. Este conjunto de datos, son una de las mejores fuentes para generar modelo de terreno (MDT) de alta resolución, lo cual representa el terreno con mayor precisión (Sharma et al., 2021). Este método ha revolucionado el estudio de los deslizamientos de tierra y la geomorfología, ya que proporciona una topografía de resolución fina. Desde principios del siglo XXI, esta técnica ha estado ampliamente disponible y el número de publicaciones geocientíficas sobre esta temática ha aumentado a un ritmo exponencial desde 1990 (Jaboyedoff y Derron, 2020).

Las ventajas de esta técnica radican en la rápida recolección de datos, amplio campo de visión y medición de alta precisión y exactitud. Además, el LiDAR terrestre, se ha considerado el más seguro y eficaz de los métodos tradicionales (Vargas-Sánchez, 2020).

4. Área de estudio

4.1 Ubicación

La ciudad de Morelia tiene una extensión de 1306 km², ubicada entre las coordenadas de 19°42' N y 101°11' O. Se encuentra a una altura promedio de 1940 m.s.n.m., en el antiguo Valle de Guayangareo. Rodeada de lomas y colinas, al este el volcán de Punhuato, al noroeste los volcanes Quinceo y Tetillas, al oeste el volcán Águila y al sur la caldera de Atécuaro (Avellán et al., 2020a).

El segmento de estudio del Río Chiquito tiene una longitud de 1.65 km. Se localiza al sur de la ciudad de Morelia (*Fig. 8*), entre las coordenadas 19°41'20" N, 101°10'50" W y 19°41'35" N, 101°11'40" W, entre la intersección de la calzada Juárez y la calzada Ventura Puente.

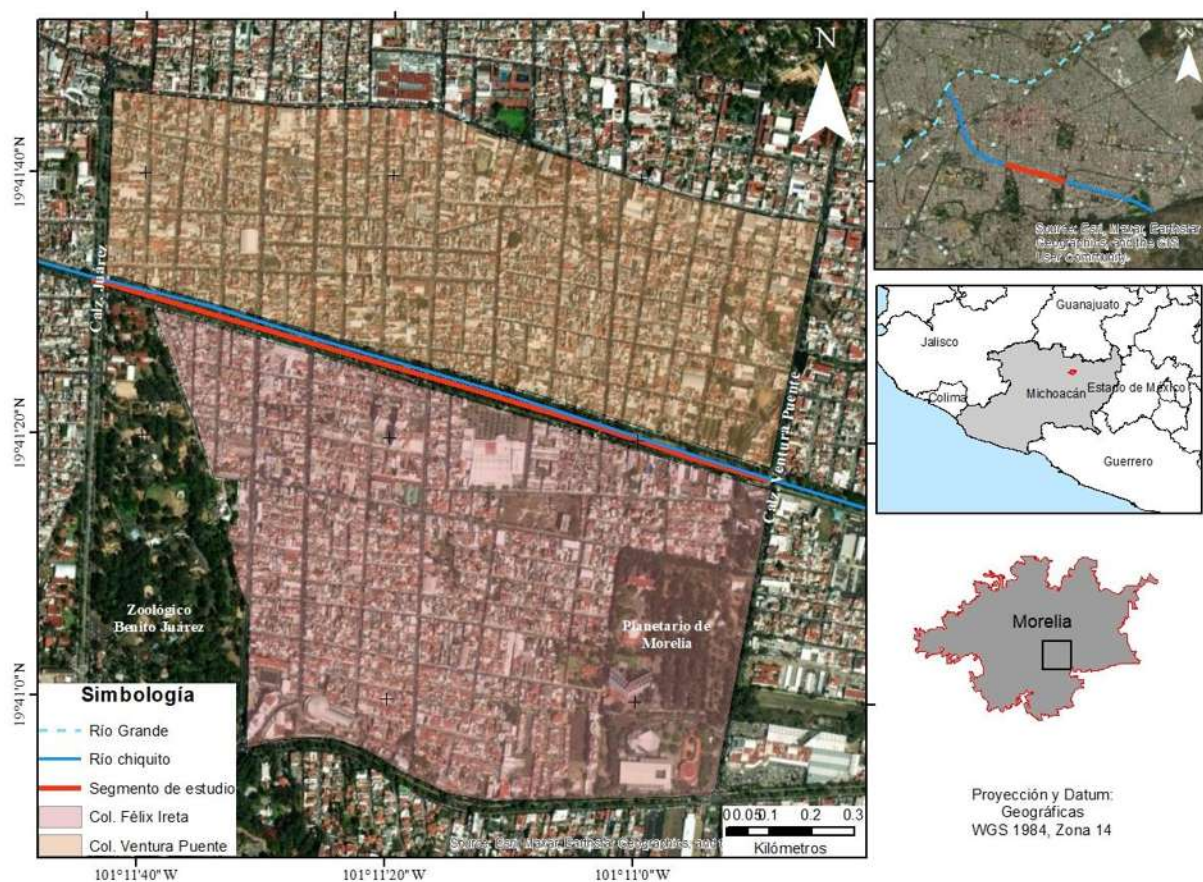


Figura 8. Ubicación del área de estudio.

4.2 Marco geológico

4.2.1 Geología regional (Morelia)

La ciudad de Morelia se encuentra en el sector central del Cinturón Volcánico Trans Mexicano (CVTM), dentro de la intersección de dos sub-provincias geológicas, al sur la Sierra de Mil Cumbres (SMC) y al norte el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG). Este último ocupa un área aproximada de 40,000 km² y alberga alrededor de 1000 a 1200 conos máfico-intermedios, conos de lava, domos de lava, maars, anillos de toba, volcanes tipo escudo, volcanes de ceniza, siendo el Parícutín el más joven, seguido del volcán Jorullo. El tipo de lava más voluminoso tiene una composición andesítica, seguido por andesitas basálticas y basalto (Hasenaka y Carmichael, 1985).

Los productos eruptivos comprenden una edad del Plioceno, con un aumento de actividad durante el Pleistoceno (Avellán et al., 2020a), los cuales se emplazan discordantemente sobre ignimbritas del Mioceno, que forman parte de la SMC (Gómez-Vasconcelos et al., 2015)

Desde un punto estratigráfico en la ciudad de Morelia se pueden reconocer diferentes unidades litológicas (*Fig. 9*). A continuación, se describen dichas unidades, desde la más antigua a la más reciente:

Andesitas Mil Cumbres del Mioceno

Esta unidad se caracteriza por una secuencia de lavas andesíticas de color verde intensamente alteradas y fracturadas. Abarca un rango de edades de 23 a 14 Ma. (Garduño et al., 2001; Gómez-Vasconcelos et al., 2015) Esta unidad constituye el substrato más profundo del área, con un espesor de 800 m, aflorando en la cañada del Río Chiquito (Arreygue-Rocha et al., 2005).

Cantera de Morelia (Ignimbrita)

Unidad que consiste en varios horizontes de flujos piroclásticos de composición riolítica de color rosa, con un espesor máximo de 200 m, denominada como ignimbrita (Hernández Madrigal et al., 2011). Su edad es Mioceno (16.8 Ma) (Gómez-Vasconcelos et al., 2015).

Secuencia volcánica del cerro del Punhuato

Al Este de la Ciudad de Morelia, la SMC, está cubierta por domos andesíticos y dacíticos y flujos de lava del complejo volcánico Punhuato, con una edad de 16.3 ± 0.64 Ma. Al sureste de la SMC, consiste en lavas andesíticas a riolíticas e ignimbritas del complejo volcánico Punhuato, con una edad de 16.3 Ma (Gómez-Vasconcelos et al., 2015).

Secuencia lacustre

Secuencia que aflora al sur de la ciudad de Morelia, a través de pozos perforados se estima un espesor de hasta 50 m. Esta unidad se encuentra constituida principalmente por arenas, gravas y limos que sobreyace a un basamento volcánico. Hacia el sur, la secuencia adelgaza y culmina con limos de color café (Garduño et al., 2001). Con una edad de 3.6 Ma (Avellán et al., 2020)

Secuencia volcánica Plio-Pleistocénica

Unidad más reciente que corresponde a productos del vulcanismo monogenético del CVTM. Esta secuencia está constituida por depósitos de lluvia piroclástica la cual corresponde a la unidad piroclástica de la caída de Cuitzeo, con una edad de 1480 ± 0.016 Ma, le subyace la unidad del volcán Quinceo, la cual se caracteriza por flujos de lava de entablamiento débil y brechas desmoronadas, estas rocas son porfiríticas con plagioclasa y fenocristales de piroxeno, esta unidad tiene una edad de 1365 ± 0.010 Ma en la cima y 1355 ± 0.017 Ma en la parte Este del Quinceo (Avellán et al., 2020).

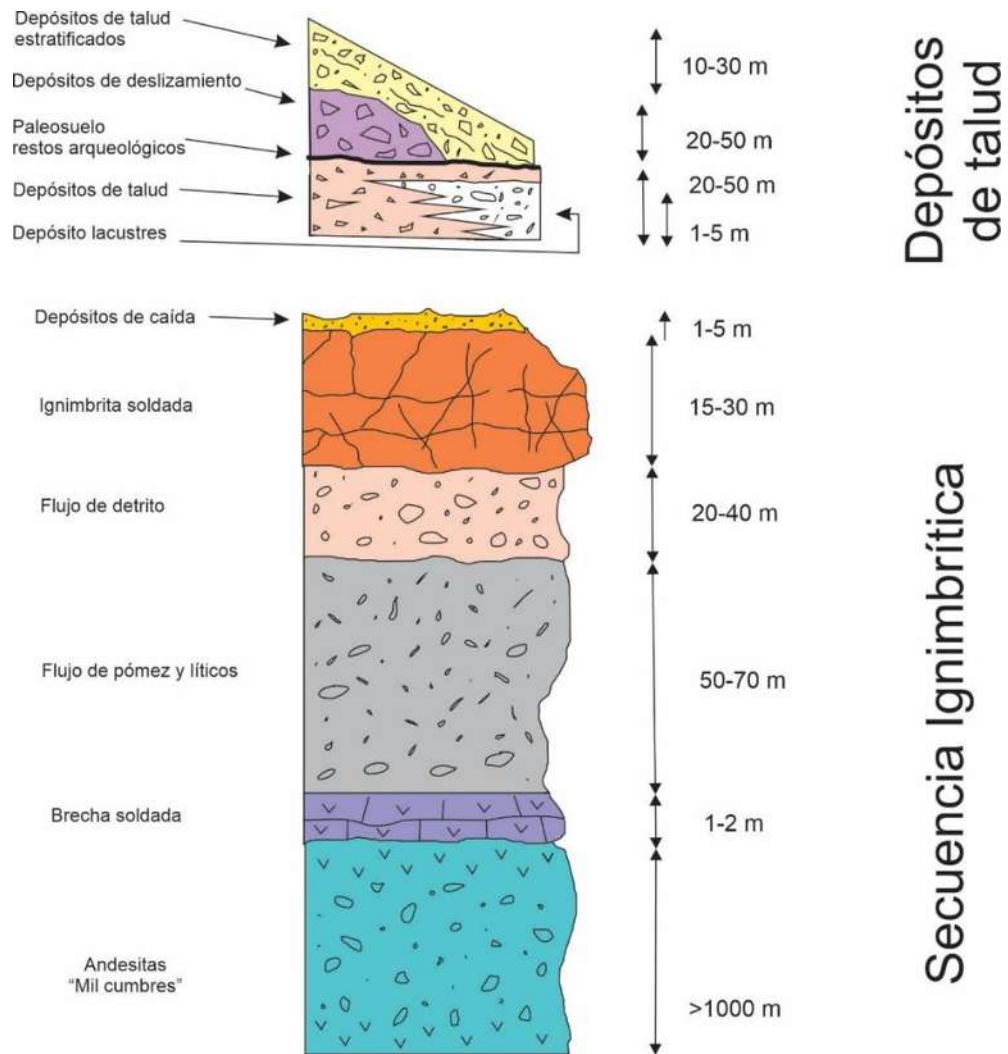


Figura 9. Columna estratigráfica de la ciudad de Morelia. Fuente: Modificada de Arreygue, 2005.

4.2.2 Geología estructural de Morelia

La ciudad de Morelia está localizada dentro del Sistema de Fallas Morelia-Acambay (SFMA), ligada a la presencia de fallas activas de dirección NE-SW y E-W (Arreygue-Rocha et al., 2005). Existen también lineamientos con direcciones NNW-SSE, entre los que se destaca la Falla del Río Chiquito, (Arreygue et al., 2002).

Algunos volcanes del CVMG, están alienados paralelamente a dos sistemas de fallas: a) Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y b) Sistema de fallas Morelia-Acambay, las cuales forman una estructura de medio graben al oeste del Lago de Cuitzeo.

El SFMA se originó hace 19 Ma, es una franja de fallamiento cortical de ~220 km de largo y ~ 40 km de ancho, con dirección preferente ENE (Soria-Caballero et al., 2021), el cual dio origen a la mayoría de las cuencas lacustres E-W (*Fig. 10*). Este se ha dividido en diez segmentos de falla, Queréndaro-Indaparapeo, Charo, Tarimbaro-Álvaro Obregón, Central Morelia, La Paloma, Los Azufres, Zinapécuaro, Cointzio, Huiramba y Pátzcuaro, (Avellán et al., 2020a).

Garduño y colaboradores (2001), describen las fallas geológicas de Morelia, las cuales divide en dos grupos:

Fallas ligadas a hundimiento

Estas fallas presentan rupturas con orientación NE-SO, pertenecen a este grupo los lineamientos La Colina, Central Camionera, Torremolino, Cuautla (bloque hundido en el lado norte) y falla Chapultepec (bloque hundido hacia el sur). El desplazamiento de estas fallas está ligado a la sobreexplotación de acuífero, al comportamiento mecánico de los suelos y a las técnicas de extracción del agua.

Fallas potencialmente sísmicas

La actividad sísmica que presenta el estado de Michoacán es de tres tipos: a) Sismos Intraplaca, b) Actividad volcánica, c) Ligados a fallas geológicas activas. En Morelia, las fallas que están asociadas a este último tipo son: La Colina, Tarimbaro y los segmentos del sistema de fallas de Morelia-Acambay, como La Paloma, Cerritos y Cointzio.

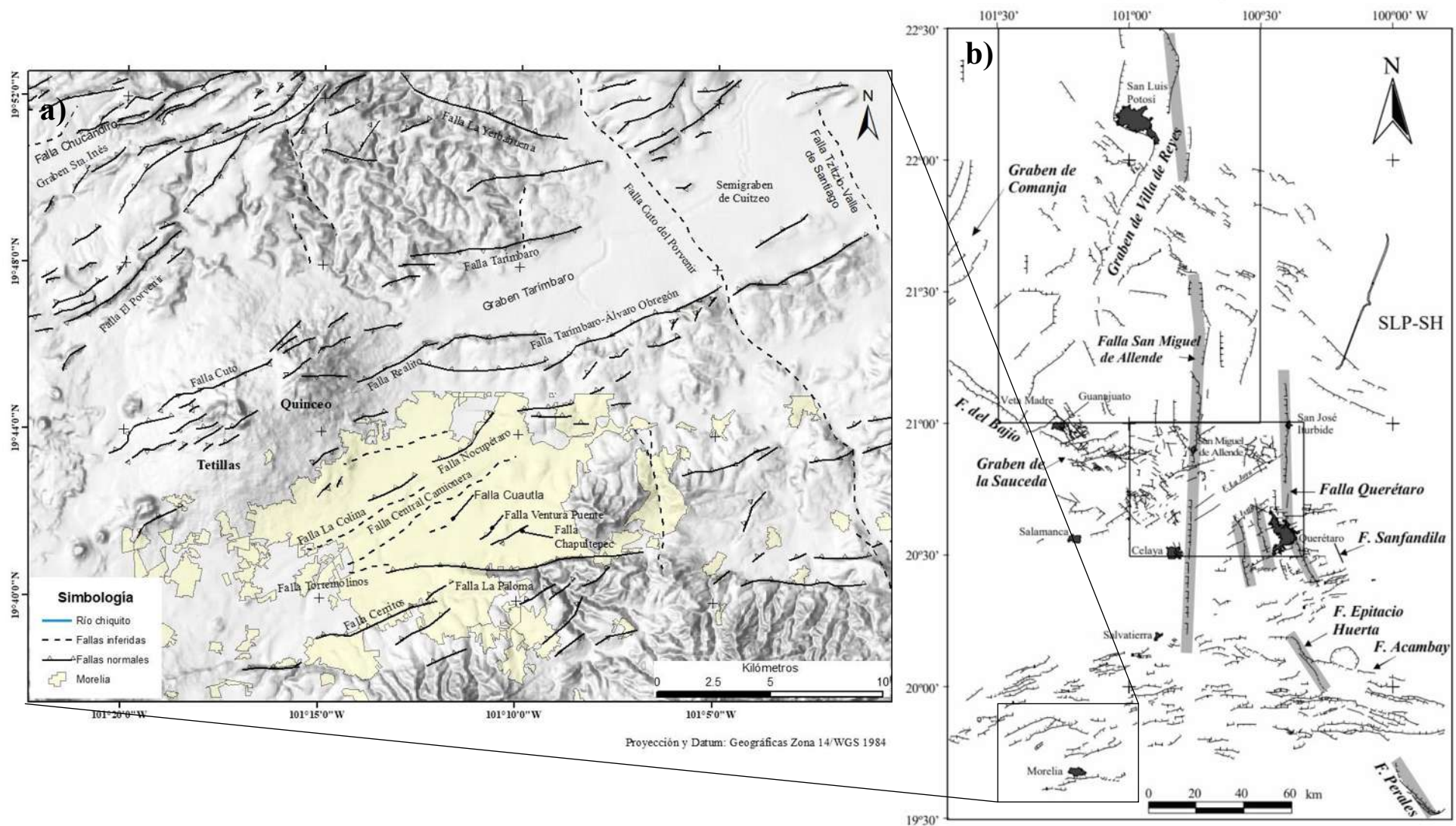


Figura 10. a) Principales fallas de la ciudad de Morelia, con dirección preferencial NE-SW Y E-W. Fuente: Modificada de Avellan, 2020. b) Sistema de fallas en el centro de México. Sistema San Luis de La Paz – Salinas Hidalgo (SLP – SH), En líneas gruesas grises se marcan las fallas que pertenecen al Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA). Fuente: (Álaniz-Álvarez et al., 2002)

4.2.3 Geología local (Río Chiquito)

Localmente el área de estudio se encuentra constituida por sedimentos fluvio-lacustres del paleo-lago de Cuitzeo, con una edad de 3.6 Ma (Avellán et al., 2020) (*Fig. 11*) la cual aflora en la parte sur y oriente de la ciudad de Morelia, con una edad del Mioceno-Plioceno, caracterizan por limos y arcillas, con un espesor de hasta 60 m (Hernández Madrigal et al., 2011). Esta unidad subyace al relleno antropogénico de los taludes. A lo largo del Río Chiquito, se han observado algunos afloramientos de ignimbrita, la cual podría corresponder a la ignimbrita Atécuaro, con una edad de 16.8 Ma, la cual aflora a lo largo del escarpe de la falla Morelia y Cerritos, así como en los filtros viejos del Río Chiquito de Morelia (Correa-Gómez, 2022). Su color es claro pero varía entre vino, rojo, naranja y blanco, tiene diferente grados de soldamiento y compactación, con textura porfiríticas y vítreas, en muestra de mano (Gómez-Vasconcelos et al., 2015). Dentro del segmento de estudio, se aprecia un afloramiento, el cual se localiza a la altura de la Av. Solidaridad y la intersección de la calle García Obeso.



*Figura 11.*a) Perfil del talud donde se observa el relleno antropogénico, b) perfil perpendicular a la av. Solidaridad, donde se observa el relleno antropogénico.

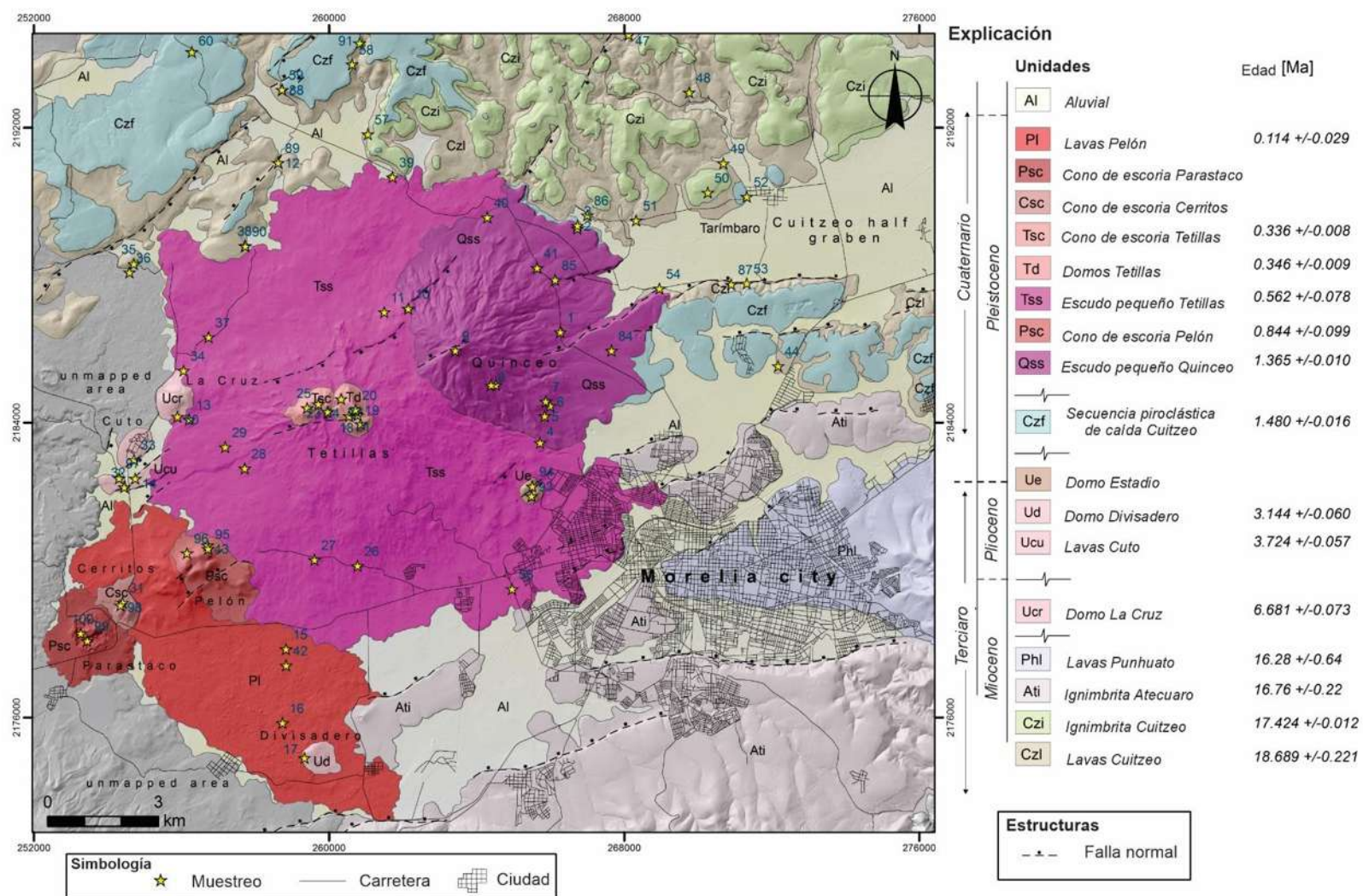


Figura 12. Mapa geológico y estratigrafía de los volcanes en la porción noroeste de la ciudad de Morelia. Fuente: (Avellán et al., 2020b)

4.3 Hidrología

De acuerdo con la clasificación de la Red Hidrográfica del INEGI (2010), la ciudad de Morelia se localiza dentro de la Región Hidrográfica *Lerma-Santiago* (RH12), la cual cuenta con una extensión territorial de 133,853 km², con una precipitación normal anual de 723 mm y un escurrimiento natural medio superficial de 13,180 hm²/año (CONAGUA, 2014). Esta región se comprende por 58 Cuencas Hidrográficas y comprende los estados de Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zacatecas (*Fig. 13*).

La cuenca de Cuitzeo se ubicada dentro de esta región hidrológica, entre los límites del estado de Guanajuato y Michoacán, la cual comprende los municipios de: Acuitzio, Álvaro Obregón, Copándaro, Cuitzeo, Charo, Chucándiro, Huandacareo, Indaparapeo, Morelia, Queréndaro, Santa Ana Maya, Tarímbaro y Zinapécuaro. En total abarca una superficie aproximada de 4,025 km², tiene una precipitación promedio anual de 1,000 mm en las partes medias de 600 mm, en las partes bajas y 1,500 mm, en las partes más altas (Maza et al., 2014). Se caracteriza por ser una cuenca endorreica, que no tiene salida o conexión con el mar, conformada por colinas, lomeríos altos y planicies, siendo una cuenca relativamente plana, la cual se desarrolla sobre materiales volcánicos de composición intermedia a básica, de edad Mioceno-Cuaternario (Mendoza et al., 2002).

La cuenca del lago de Cuitzeo, de acuerdo con sus características hidrográficas, se divide en tres subcuencas: la del Río Queréndaro, la del Río Zinapécuaro y la del Río Grande (Oseguera-Medina, 2014). La cuenca del Río Grande tiene un área aproximada de 1,200 km² (Arreygue-Rocha et al., 2012).

El Río Grande es el escurrimiento principal que alimenta a la Cuenca del lago de Cuitzeo, nace en la parte sureste del municipio de Acuitzio, tiene una longitud aproximada de 88 km y se forma por la unión de los ríos Tiripetio y Tirio. Sus principales afluentes son los arroyos Lagunillas, Barranca de San Pedro, La Alberca, Las Tierras y la Quemada, el arroyo San José, el río Charo, el San Marcos y el río Chiquito (Oseguera-Medina, 2014).

La cuenca del Río Chiquito cuenta con una extensión de 85 km², se origina en los montes de la Lobera y la Lechuguilla de la Sierra de Mil Cumbres, y se une con los arroyos La Cuadrilla, Agua

Escondida, El Salitre, El Peral, Bello y Carindapaz (Carreón-Nieto, 2014). Su precipitación anual varía de 398 mm a 1208 mm.

Las zonas de recarga más importante de la ciudad de Morelia se encuentran en la Caldera de Atécuaro y las subcuencas del río Grande y Chiquito. Ambas cuencas son la recarga principal de los acuíferos alojados en las secuencias lacustres y fluvio-lacustres y en los depósitos de la caldera de Atécuaro (ignimbritas y andesitas fracturadas). Al NW de la ciudad se tiene otro flujo de recarga, la cual proviene de las lavas de El Quinceo-Las Tetillas y del C. El Águila (Garduño-Monroy et al., n.d.).

El Río Chiquito, ubicado al sur de Morelia tiene una longitud aproximada de 17 km, que van desde las zonas más altas, al SE de la microcuenca, hasta las más bajas al N de la microcuenca, en donde se asienta la ciudad. Los últimos 7 km, corresponden al cauce rectificado, el cual se une con el Río Grande (Güiza et al., 2020). El Río Chiquito es el segundo afluente principal que corre por la ciudad, tiene su origen en la cañada de Jesús del Monte, conocido también como Arroyo San Miguel y Agua Zarca.

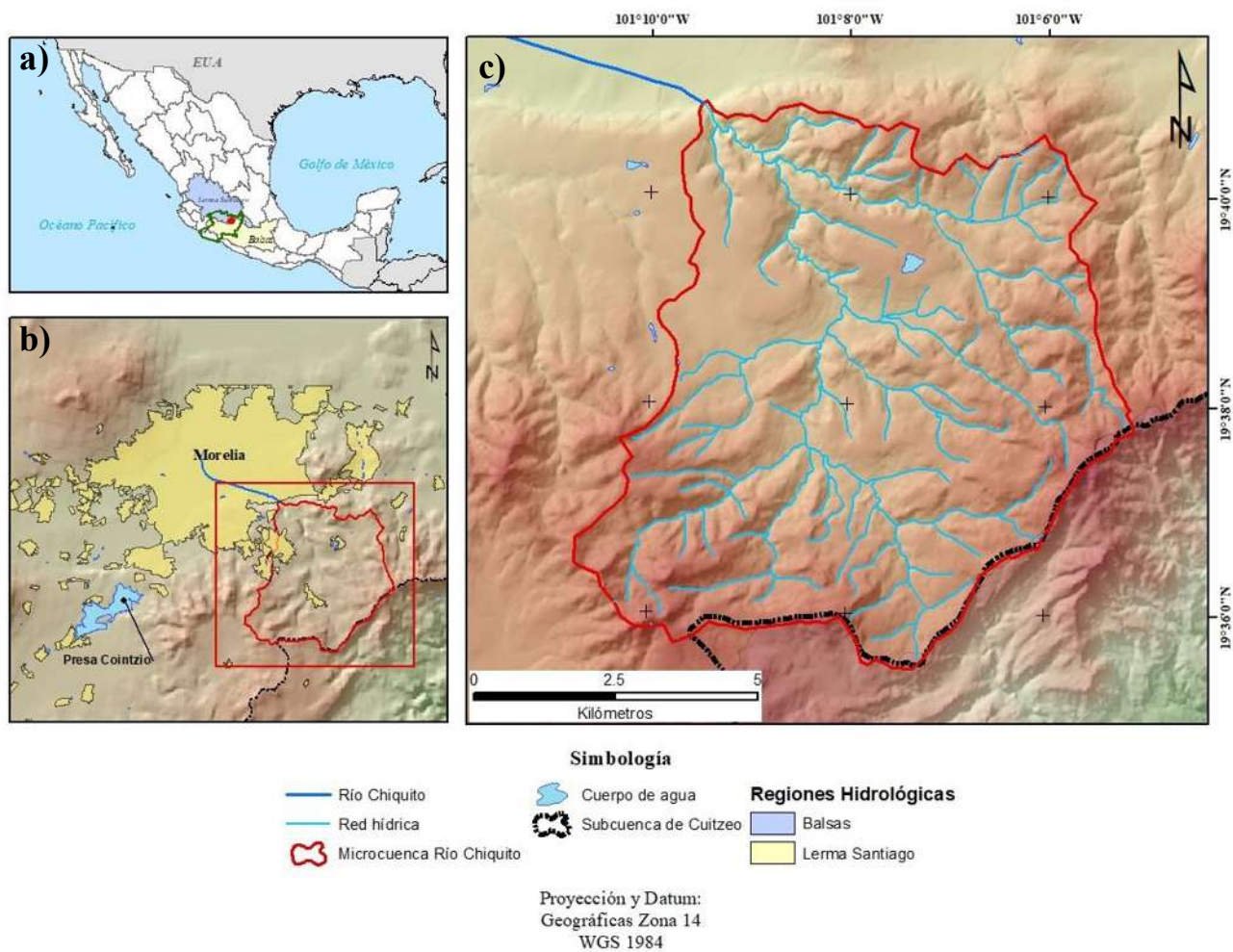


Figura 13. Mapa hidrológico a) Región hidrográfica Lerma-Santiago b) Ubicación de la ciudad de Morelia y c) Microcuenca del Río Chiquito. Mapa base MDE sombreado con resolución de 5 m.

4.3.1 Descripción hidráulica del sitio

Domínguez-Sánchez et al. (2014), describieron las características físicas del Río Chiquito desde la Av. Camelinas hasta la confluencia con el Río Grande, que corresponde a una longitud de 6.15 km. Dicho tramo se clasificó en tres subtramos: 1) Av. Camelinas a la Calz. Ventura Puente, 2) Calz. Ventura Puente a la Calz. Juárez y 3) Calz. Juárez hasta la confluencia con el Río Grande.

En el primer tramo tiene una sección transversal en forma trapezoidal irregular, con una profundidad de 4 m hasta el fondo del cauce, 3 m de ancho con un tirante de 15 cm en temporada de estiaje que aumenta a 40 cm en temporada de lluvias. Los taludes presentan una gran densidad de vegetación y en el lecho del cauce tiene rocas que obstruyen el flujo. El segundo y tercer tramo presentan casi las mismas condiciones centrales, aumentando el tirante del cauce con ciertos sedimentos en su fondo, y en algunos márgenes de éste desaparecen.

Las secciones transversales del tramo urbano rectificado del Río Chiquito fueron redimensionadas para un gasto máximo de $125 \text{ m}^3/\text{s}$. Posteriormente se realizó otro estudio sobre la capacidad hidráulica efectiva, en ausencia de puentes, el cual dio como resultado $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta reducción del caudal está directamente relacionada con la elevada tasa de sedimentación y la densidad de vegetación. Esto sugiere que las principales causas de las inundaciones de Morelia son debido a la poca capacidad hidráulica de sus secciones y a la presencia de 19 puentes, todos en el tramo urbano. Otro de los principales problemas que presenta el Río Chiquito, es la inestabilidad de sus márgenes, además de que el concreto hidráulico presenta fracturas y es afectado por fenómenos de asiento diferencial, ocasionando una importante modificación de la capacidad de evacuación de caudales del río (Arreygue-Rocha et al., 2012).

4.4 Clima

En la ciudad de Morelia predomina el clima subhúmedo, con una temperatura máxima de 33°C en mayo y mínima de 8°C, la temperatura media mensual es de 18.5°C (*Fig. 14*). Cuenta con una precipitación anual de 760 mm, donde el mes más húmedo es agosto y el mes más seco febrero (INEGI, 2017).

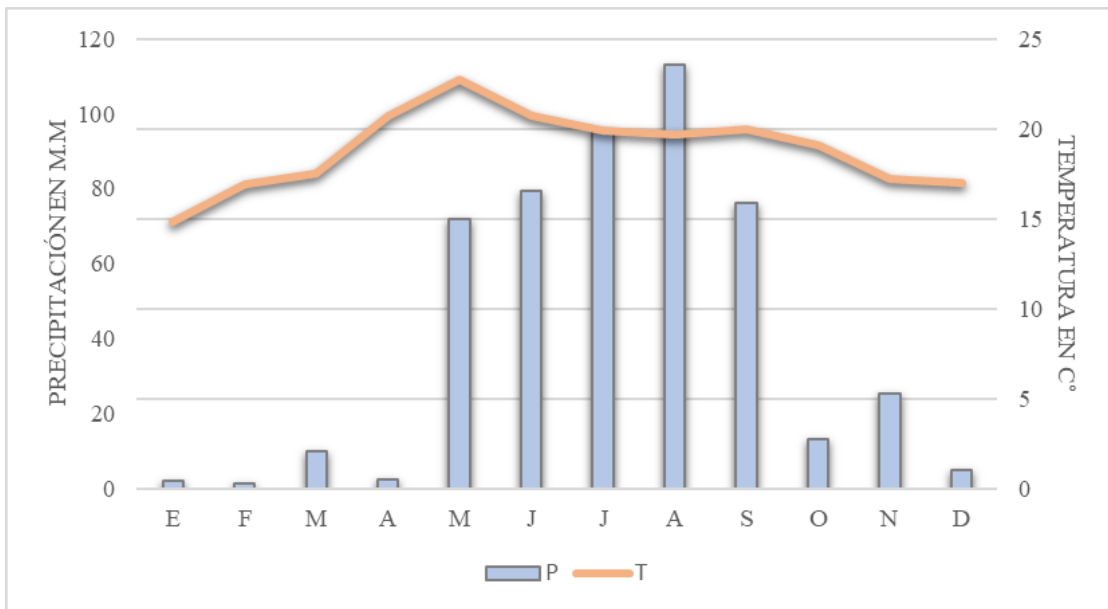


Figura 14. Gráfica de precipitación y temperatura media mensual de Morelia. Fuente: tomada de INEGI, 2016.

4.5 Uso de suelo y vegetación

La mancha urbana de la ciudad de Morelia tuvo su mayor expansión territorial en el siglo XX y principios del siglo XXI, particularmente a partir de la década de 1960, tuvo un crecimiento sobre espacios periféricos, lo que ocasionó un cambio de uso agropecuario y forestal a tipo urbano (Sánchez y Urquijo, 2014).

La principal actividad económica del municipio de Morelia es el comercio y el turismo (sector terciario - 63.67%), en menor medida la industria de la construcción y manufacturera (sector secundario - 25.91%) y en último término la agricultura, ganadería, caza y pesca (sector primario - 6.64%).

La vegetación del municipio de Morelia se destaca por ser Bosque de pino, Bosque de encino, Matorral subtropical, Bosque mesófilo de montaña, Pastizal, Vegetación acuática y subacuática y Bosque de galería (García y Jiménez, 1993) .

El área de estudio presenta diferentes usos:

- Bosque relicto en galería, en donde prevalecen las especies de fresno y álamo
- Uso deportivo. En el sector norte del río, de la c. Isidro Huarte hasta el cruce con la Calz. Ventura Puente, sus bordos son usados como parques lineales que se caracterizan por ciclistas, trotapistas y áreas de ejercicio (*Fig.15*)
- Cultivo de temporal (maíz).
- Vialidad. La Av. Solidaridad en su parte inicial (Av. Camelinas) cuenta con tres carriles, que se reducen a dos en el tramo de la Calz. Juárez y la c. Jacona, en donde la avenida alcanza los 8 m de ancho, generando una geometría de cuello de botella, provocando una congestión vehicular (Ibáñez-Hernández, 2008).



Figura 15. a) Área de ejercicio en el sector norte del Río Chiquito, entre las calles Río Mayo y Colegio de San Miguel, b) Ciclopista y trotapista, sector norte. Fuente: Google, 2023.

5. Metodología

La metodología es el camino a seguir de manera ordenada para llegar a un resultado, a continuación, se muestra el flujo de trabajo que se realizó en este trabajo, partiendo de la recopilación bibliográfica para después desarrollar el trabajo de campo y gabinete.

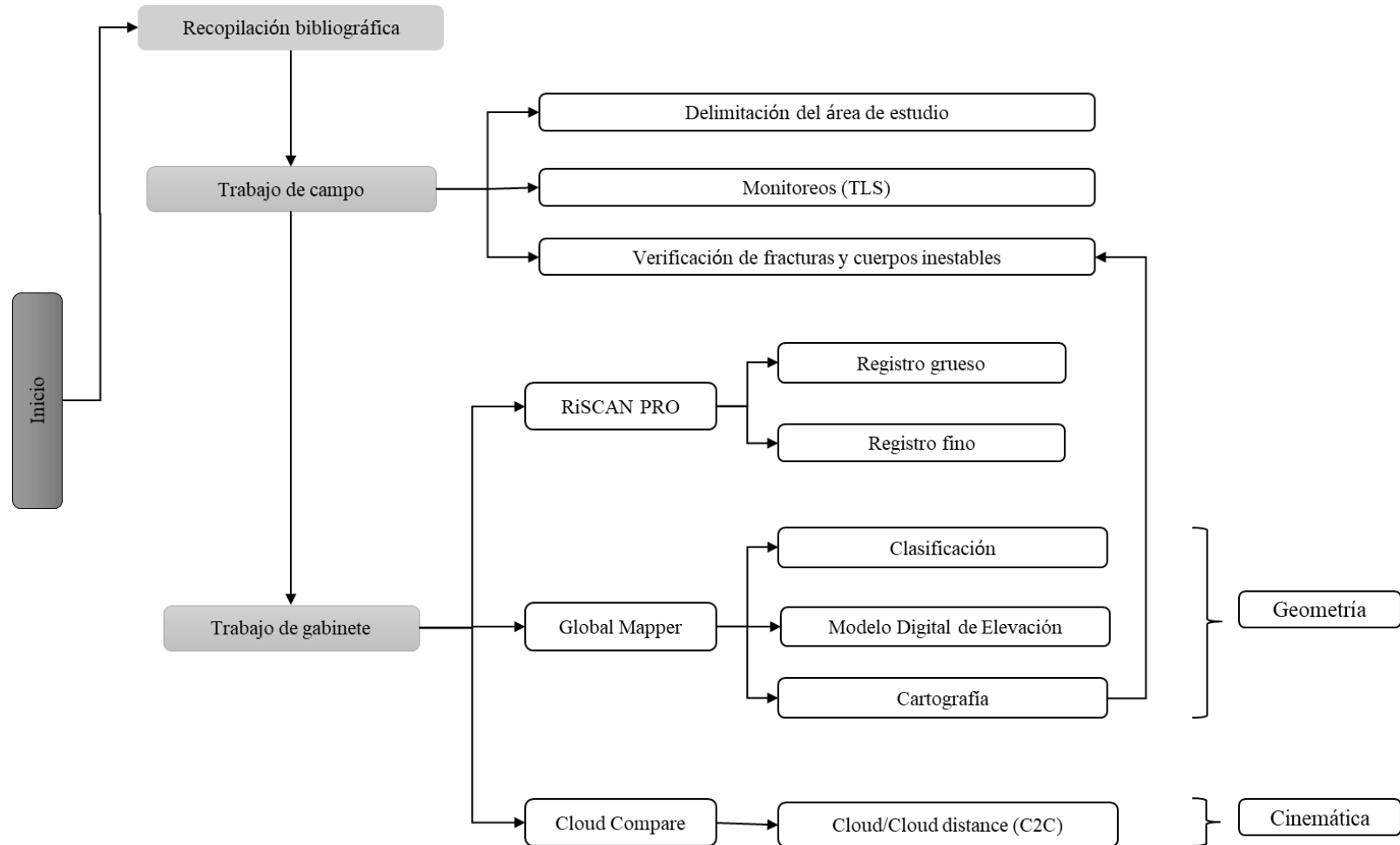


Figura 16. Flujo de trabajo para la geometría y cinemática de los taludes del Río Chiquito.

5.1 Recopilación bibliográfica

Primeramente, se realizó una revisión bibliográfica de trabajos y textos, en los cuales hubiese una relación de los PRM en zonas urbanas y represamientos ligados a estos eventos, partiendo desde lo regional hasta lo particular. Además, se realizó una recopilación de antecedentes históricos del área de estudio.

5.2 Trabajo de campo

La fase de campo fue fundamental para la obtención del Modelo Digital de Elevación (MDE) de alta resolución, la cartografía a detalle de fracturas y la caracterización geométrica y cinemática de los taludes del Río Chiquito. La cartografía se obtuvo a través del levantamiento de datos por medio del Escáner Láser Terrestre (TLS, *Terrestrial Laser Scanner*).

5.2.1 Delimitación del segmento de estudio

Para la delimitación del segmento de estudio, se realizó un recorrido previo del lugar, partiendo del cruce de la Calz. La Huerta y Av. Solidaridad hasta el cruce de Av. Solidaridad y Perif. Paseo de la República. A partir de la observación de densidad de fracturas, daños en la vía pública, cuerpos inestables sobre el cauce del Río Chiquito y el hundimiento apreciable sobre la vía, se delimitó el segmento partiendo de la Calz. Juárez y Av. Solidaridad hasta el cruce con la Calz. Ventura puente, teniendo una longitud aproximada de 1.64 km.

5.2.2 Levantamiento de datos (TLS)

La obtención de datos fue a partir del levantamiento por medio de TLS en tres monitores. El primero se realizó el 9 de mayo de 2021, el cual consistió en 58 escaneos, obteniendo 524,871,700 millones de puntos con coordenadas X,Y y Z. En la parte sur de la Av. Solidaridad, se realizaron 27 escaneos y 31 en su parte norte, con una distancia aproximada

de 50 a 60 metros de un escaneo con respecto a otro. El segundo levantamiento se realizó el 14 de mayo de 2022, teniendo una temporalidad de 1 año, el cual consistió en 57 escaneos con un total de 470,697,312 millones de puntos obtenidos. El último levantamiento se realizó el 26 de febrero de 2023, el cual consistió en 61 escaneos, obteniendo 535,314,329.00 millones de puntos, con una temporalidad de 9 meses con respecto a los dos primeros.



Figura 17. Imágenes de campo. a) y b) Posicionamiento del escáner terrestre para la obtención de nubes de puntos sobre el segmento de estudio.

El equipo empleado fue el escáner láser terrestre, *RIEGL VZ-1000* (Fig. 16), el cual proporciona un rango de medición de más de 1400 m, con una resolución angular de 5mm y una tasa de medición de hasta 122,000 mediciones/seg, ofreciendo un campo de visión de 100° en dirección vertical y 360° en horizontal. El equipo permite la integración de una cámara DSLR (*digital single lens reflex*), sensores de inclinación integrados y plomada láser, así como un receptor GNSS (Fig. 18 y 19) (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017).

RiSCAN PRO es el software que maneja el escáner láser RIEGL para procesar los datos, estos datos se almacenan en una serie de carpetas para elaborar un proyecto en RiSCAN PRO. Estas carpetas están divididas en calibraciones, colecciones, escaneos, vistas, sistema de coordenadas, objetos, registro y reportes. Este software cuenta con herramientas para el

procesamiento de datos (*Ajuste de datos, Georreferenciación de proyectos, Filtración y Registro de posición de escaneo*) y análisis de datos (*Mallado, Cálculo de volumen, Comparación de superficies, Creación de polilínea, Herramienta Línea de rotura, Líneas de contorno, Secciones, Ajuste de esfera, Ajuste plano*). La exportación de las nubes de puntos es en formato .csv ASCII (RIEGL Laser Measurement Systems, 2016). Además, cuenta con cinco funciones principales: adquisición, visualización, procesamiento, análisis e intercambio de datos (Vargas-Sánchez, 2020).



Figura 18. Vista frontal del equipo RIEGL VZ-1000. Fuente: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017.

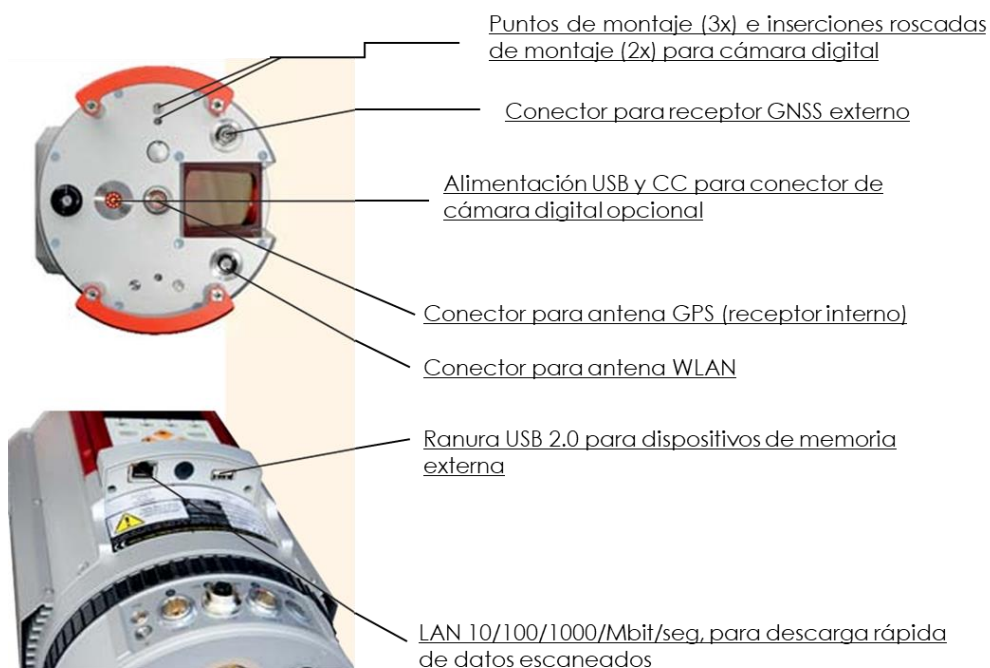


Figura 19. Vista superior del equipo RIEGL VZ-1000. Fuente: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017.

5.2.3 Verificación de fracturas y cuerpos inestables

Después de realizar la digitalización de las fracturas/grietas (ver subtema 5.3.5), se procedió a realizar un recorrido sobre el segmento de estudio, tanto en su parte Norte como en la Sur, para la verificación de las fracturas. Esta parte del trabajo fue de suma importancia, para la cuantificación de grietas no perceptibles en el Modelo Digital de Terreno (MDT). Las características que se tomaron en cuenta para su identificación fueron su longitud, forma, densidad.

Para los cuerpos inestables sobre el talud, se observaron ciertas características representativas de un PRM, ubicando su corona, cabeza y pie, árboles con cierta curvatura, las cuales se relacionan a PRM antiguos, la relación de fracturas con los cuerpos inestables. Además, se observaron relaciones antropogénicas, como la carga vehicular, el ancho del margen del río con la cercanía a la vialidad, la densidad de alcantarillado y ubicación de canales.

5.3 Trabajo de gabinete

La segunda fase fue el trabajo de gabinete, el cual consistió en tres etapas para el procesamiento de datos. El primero consistió en la georreferenciación, ajuste grueso y fino del primer, segundo y tercer levantamiento, en el software RiSCAN PRO. La segunda fase fue la limpieza de los datos a partir de la clasificación de los puntos para obtener el Modelo Digital de Terreno (MDT) y posteriormente la digitalización de grietas/fracturas, utilizando el software Global Mapper. La última fase fue la obtención del hundimiento y/o desplazamiento de los cuerpos inestables, el cual se obtuvo tomando los datos del primer levantamiento como referencia para el ajuste del segundo y tercer levantamiento en el software CloudCompare.

RiSCAN PRO

5.3.1 Registro Grueso

El primer paso para el procesamiento de datos es la georreferenciación y el ajuste grueso de cada nube de puntos. Los datos adquiridos durante el levantamiento se almacenan y organizan en una serie de carpetas para elaborar un proyecto en RiSCANPRO.

La georreferenciación es una técnica mediante la cual se procesa el sistema de coordenadas TLS, teniendo como resultado un sistema de coordenadas del terreno. Existen dos formas de georreferenciación, ya sea el método directo o indirecto (Abbas et al., 2014). La aplicación del método depende de las especificaciones del levantamiento y disponibilidad del equipo. Ambos métodos, son formas de GPS diferencial, el cual requiere visibilidad y una estación base al alcance del TLS, para una medición exacta y precisa (Vargas-Sánchez, 2020).

El registro grueso se realizó a través de la herramienta *Coarse registration*, seleccionando puntos de control, en aquellos objetos estáticos, como fachadas de infraestructuras, torres de luz y banquetas (*Fig. 20*). La nube de referencia fue el escaneo 58, y a partir de esta, se unió con el escaneo 1 y 57, esto para evitar error al unir las nubes posteriores. Con el primer

levantamiento georreferenciado y ajustado, se procedió a tomar como referencia para georreferenciar y ajustar el segundo y tercer levantamiento. Al generar el empalme de estas nubes, se generan errores centimétricos (*Tabla 2*), los cuales fueron disminuidos en el registro fino.

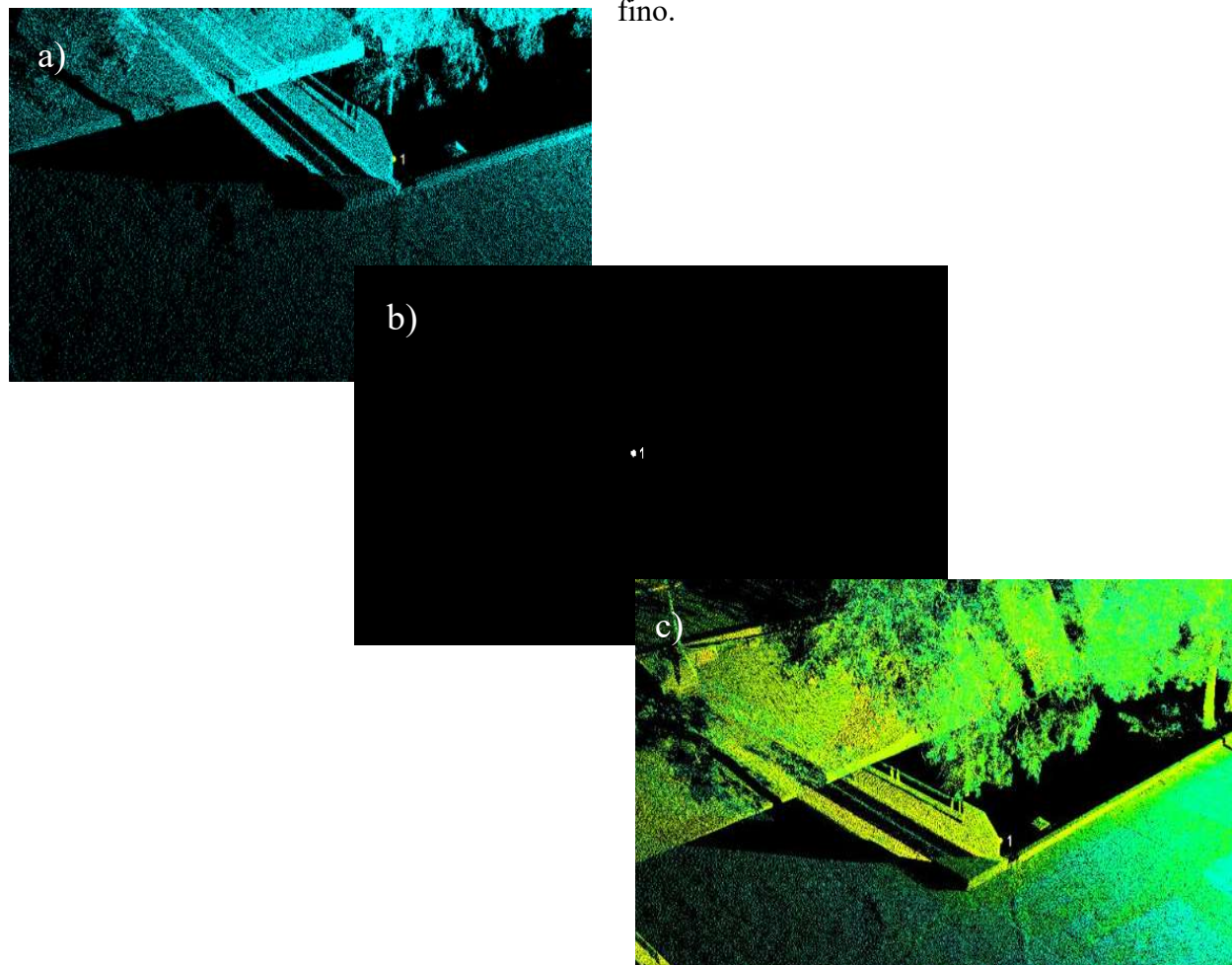


Figura 20. Puntos estables seleccionados en el registro grueso a) 2021, b) 2022 y c) 2023

Temporalidad	No. Nube	Error
2021	1 - 58	4 cm - 8 cm
2022	60 - 116	3 cm - 6 cm
2023	117 - 177	1 cm - 4 cm

Tabla 2. Rango de errores de las nubes de puntos en el registro grueso.

5.3.2 Registro Fino

A partir del registro grueso, se procedió a realizar el registro fino, el cual tiene como objetivo obtener la máxima superposición de dos nubes. El primer paso para realizar el registro fino fue la generación de planos, a través de la herramienta *Multi Station Adjustment > Extract plane taches*. Con los planos correspondientes a cada nube, se procede al ajuste fino a través de la herramienta *Multi Station Adjustment > Start Adjustment*. Se utiliza el algoritmo Punto más Cercano Iterativo (ICP, en sus siglas en inglés), el cual consiste en estimar una transformación rígida entre $p_i \in P$, de la nube de referencia y $q_i \in Q$, de la nube de puntos objetivo (*Fig. 21*). Al utilizar la búsqueda de puntos más cercanos y el cálculo de distancia euclidiana (*Ecuación 1*), el algoritmo estima el punto más cercano entre p_i y q_i como puntos de correspondencia (Jafari, 2016).

$$d_E(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2}$$

Ec. 1

Después, se calcula la alineación de la nube de puntos mediante una transformación geométrica, que consiste en encontrar la mejor matriz de rotación/ traslación necesaria para lograr el ajuste mediante métodos como el de descomposición de valores singulares (SDV) o *Quaterniones*. Esta matriz está compuesta por una matriz interior de rotación de 3x3 y su cuarta columna corresponde al vector de traslación (Porras et al., 2014) (*Ecuación 2*).

Matriz de Transformación =

$$= \begin{bmatrix} R1 & R2 & R3 & x \\ R4 & R5 & R6 & y \\ R7 & R8 & R9 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec. 2

Después de aplicar la matriz de transformación a la nube de puntos se genera en una nueva nube con coordenadas diferentes. Este proceso se realiza iterativamente hasta disminuir el error (Porras et al., 2014).

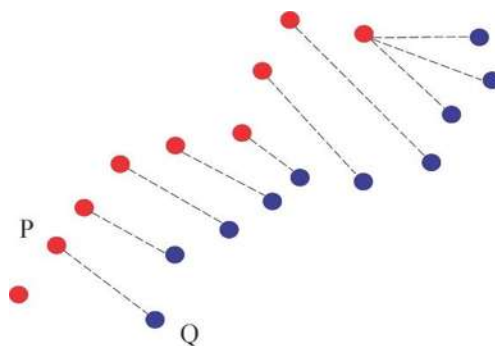


Figura 21. Estimación de correspondencia entre la nube de referencia no deformada P (roja) y la nube deformada Q (azul). Tomada de Jafari, 2016.

Este método permite alinear de una manera más precisa las nubes de puntos, generando errores milimétricos (*Tabla 3*). Para el registro grueso y fino del segundo y tercer levantamiento, se tomó como referencia el primer levantamiento previamente ajustada.

Temporalidad	No. Nube	Error
2021	1 - 58	3 mm - 4 mm
2022	60 - 116	3 cm - 6 cm
2023	117 - 177	1 cm - 4 cm

Tabla 3. Rango de errores en las nubes de puntos en el registro fino.

Global Mapper

5.3.3 Clasificación de nube de puntos

La clasificación de puntos fue una parte importante del procesamiento de los datos, a partir de esta limpieza se obtuvo el modelo digital de elevación (MDE). La clasificación consiste en la separación de puntos o segmentos en diferentes clases previamente definidas. Para el caso de los elementos de una zona urbana, los rasgos distintivos están organizados de una manera jerárquica (Porras et al., 2014) (*Fig. 22*).

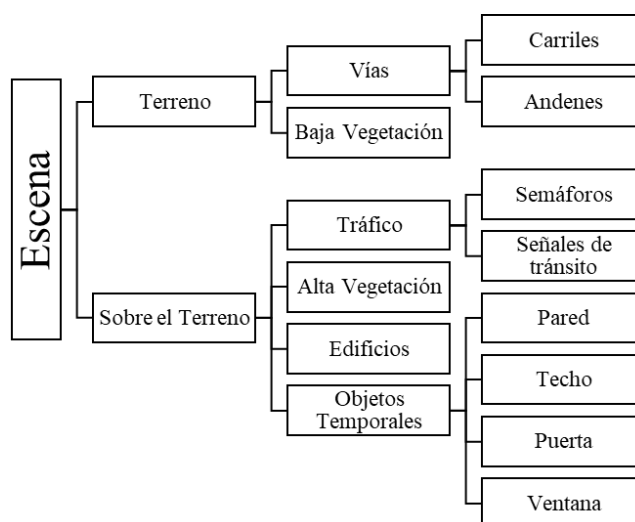


Figura 22. . Categorías para una zona urbana. Fuente: Porras et al., 2014.

Este procesamiento se llevó a cabo en la aplicación SIG, Global Mapper 22.0, a través del Módulo LiDAR(Blue Marble Geographics, 2017). Este módulo cuenta herramientas para el procesamiento de nubes de puntos, como clasificación manual y automática de nube de puntos, comparación de puntos, creación de modelos 3D, edición de perfiles, entre otras funciones (*Fig. 23*).

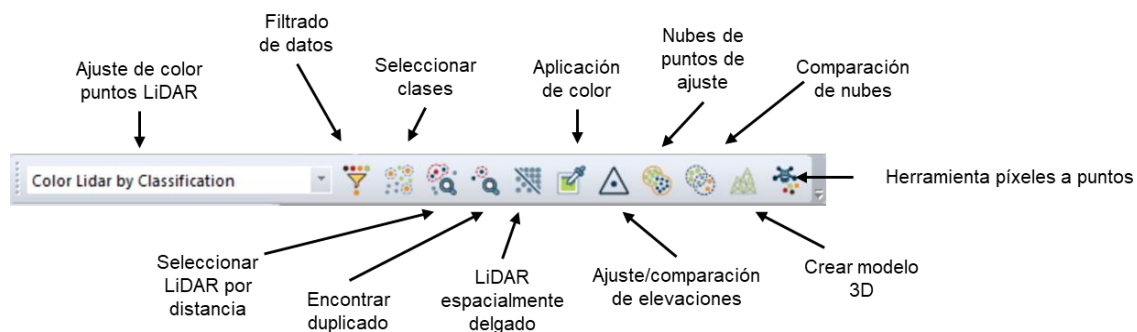


Figura 23. Barra de herramientas de la función Módulo LiDAR de Global Mapper 22.0. Fuente: Blue Marble Geographics, 2017.

El procesamiento de los datos inició con la exportación de las nubes de puntos en el software RiSCAN PRO en formato *.ASCII*, las nubes fueron divididas en 14 secciones y posteriormente se redujeron los puntos a una distancia de 0.01 m, en el software CloudCompare, estos datos se exportaron en formato *.LAS*. Este procesamiento de datos preliminar para su clasificación fue con la finalidad de aligerar el tamaño de las nubes de puntos e importar con mayor agilidad los datos en Global Mapper. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, desarrollo el formato LAS, el cual es un formato de archivo público que permite el intercambio de datos que contiene una nube de puntos 3D, es un archivo binario que mantiene toda la información procedente del sistema LiDAR. El formato LAZ es la versión comprimida de un archivo LAS, permitiendo que sea más fácil almacenar, compartir, copiar, transmitir o archivar grandes cantidades de LiDAR (GeoInnova, 2022). Otros archivos compatibles con ASPRS son; *.las*, *.laz*, *.tar*, *.gz*, *.tgz*, *.zip*, los cuales se pueden importar directamente en Global Mapper (Vargas-Sánchez, 2020).

Para esta área de estudio, se optó por clasificar los datos de manera manual, esto debido a la gran cantidad de ruido que se presenta en una zona urbana en comparación de un área montañosa (Fig. 24). Los puntos que son seleccionados se pueden clasificar en vegetación alta, media y baja, infraestructura, torres de luz, puente, agua, carretera, entre otros. Para la selección de estos puntos, se realizó un perfil de trayecto, a través del comando Path Profile/*LOS*, posteriormente se extrajeron perfiles secundarios, a través del comando *Extract*

Lines/Areas from perpendicular Profiles, el cual se encuentra dentro de la ventana de Path Profile, esto para comprender todos los puntos de la nube (*Tabla 4*).

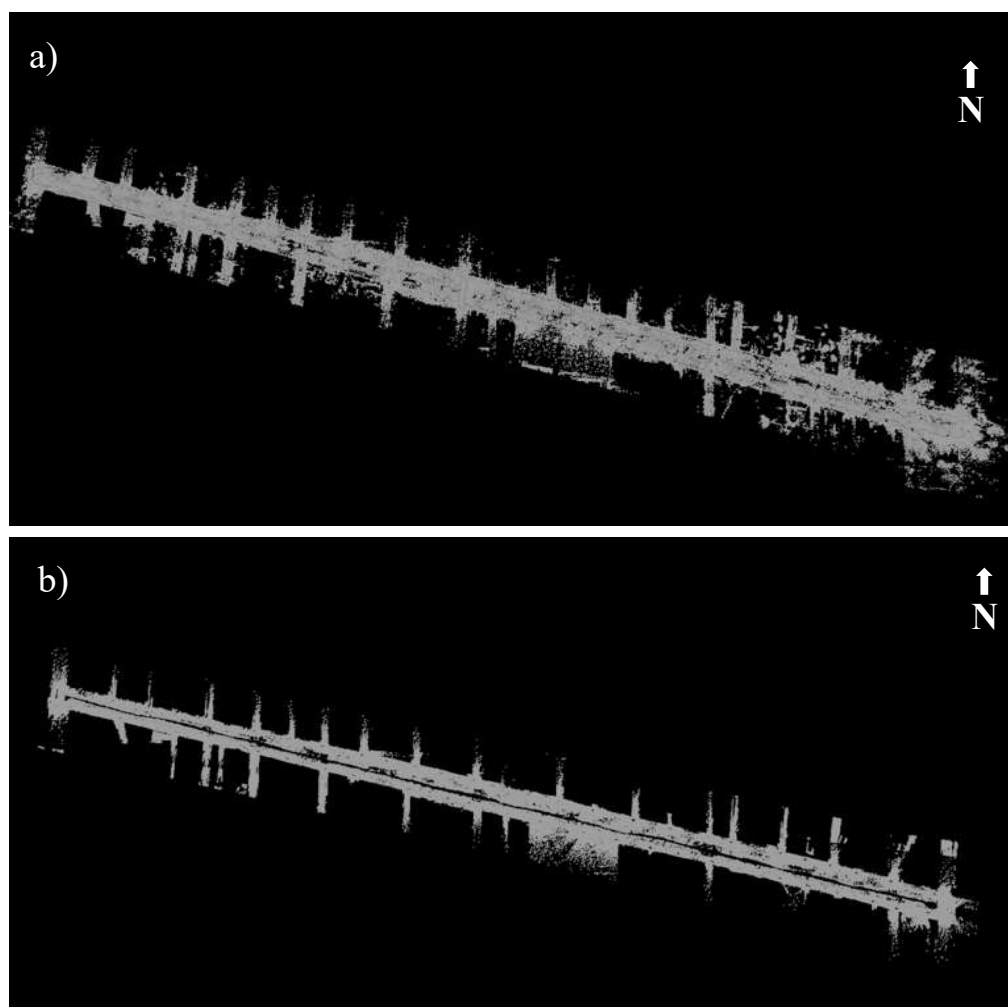


Figura 24. Clasificación de nube de puntos. a) Nubes de puntos completas sin clasificar de 2021. b) Nubes de puntos del segmento de estudio clasificadas.

Monitoreo								
2021		2022 (segmento sur)			2023 (segmento sur)			
Total	Clasificados	Total	Submuestreo (0.01 m)	Clasificados	Total	Submuestreo (0.01 m)	Clasificados	
524,871,700.00	125,166,116.00	470,697,312.00	273,126,317.00	57,110,219.00	535,314,329.00	309,868,968.00	60,770,869.00	
Porcentaje	100%	24%	100%	58%	12%	100%	58%	11%

Tabla 4. Cantidad de puntos totales , clasificados y submuestreo por cada monitoreo.

5.3.4 Modelo Digital de Elevación

Un Modelo Digital de Elevación se puede definir como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994). Dentro de este término se describen los modelos digitales de superficie (MDS) el cual representa todos los elementos existentes en la superficie (vegetación, infraestructuras, torres de luz, terreno). El modelo digital de terreno (MDT), es la recreación de la forma del terreno sin ningún ruido externo de la superficie.

Para obtener el MDT de alta resolución y exactitud, fue necesario el procesamiento de las nubes de puntos obtenidas a partir del LiDAR terrestre. Este procesamiento se llevó a cabo a partir de la clasificación de puntos, descrita anteriormente.

La resolución espacial y precisión del MDT, depende principalmente de la clasificación de los puntos y el método de interpolación de los puntos (Vargas-Sánchez, 2020). A partir de los datos clasificados, se realizó un filtro de datos, a través del comando *Filter LiDAR Data*, ubicado dentro del *Módulo LiDAR*, para visualizar solamente la superficie del terreno. Con las nubes de puntos libres de ruido externo, se generó un MDT, a través del comando *Create Elevation Grid* (Fig. 25), el cual utiliza una red irregular de triangulación (TIN, triangular irregular network), que conectan los valores conocidos entre los puntos (Vargas-Sánchez, 2020). Para el análisis del segmento de estudio, se trabajó solamente con el MDT – representativo de los taludes del Río Chiquito y su vialidad principal. Este se obtuvo de la clasificación previa de los datos en GlobalMapper, aplicando un filtrado, para visualizar solamente el terreno, ocultando las categorías clasificadas.

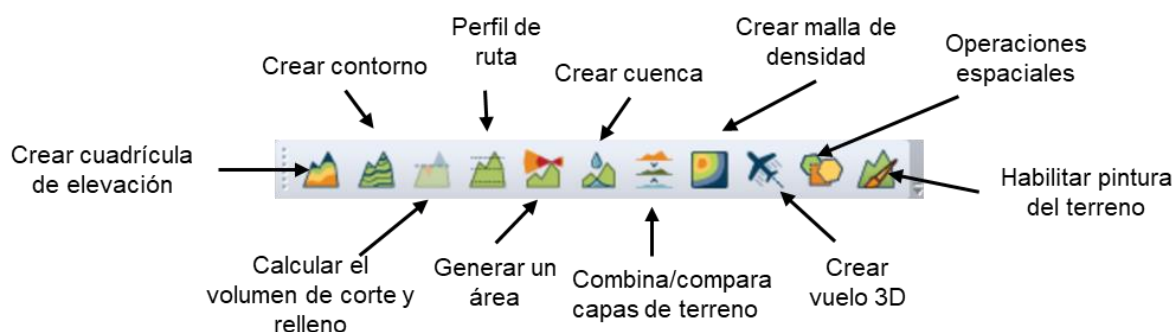


Figura 25. Barra de herramientas de la función *Analysis* de *Global Mapper 22.0*, para la generación del Modelo Digital de Elevación (MDE). Fuente: (Blue Marble Geographics, 2017).

5.3.5 Digitalización de fracturas/Grietas

El MDT digital de alta resolución que se generó a partir de las nubes de puntos del primer levantamiento, permitió visualizar con gran detalle las fracturas/grietas sobre la vialidad del segmento de estudio. Estas fracturas/grietas, se digitalizaron en Global Mapper 2.0 con la ayuda de la herramienta *Digitizer*. Este cuenta con tres *funciones Digitizer (Advanced)*, *Digitizer (Edit)* y *Digitizer (Create)*, los cuales permiten crear, eliminar, editar, mover, reconfigurar y copiar puntos, líneas y características de área en el mapa (Blue Marble Geographics, 2017).

La digitalización comprendió las fracturas/grietas, bordo del río, canales, banquetas, alcantarillado, puntos de levantamiento TLS, saneamiento del pavimento asfáltico, límite de vialidad, tope vial y línea del pavimento asfáltico. Cada distintivo se tomó en cuenta para el análisis posterior de la relación factores desencadenantes y condicionantes para la inestabilidad de los taludes.

Los datos se exportaron en formato shapefile (.shp) y se importaron en el software SIG *ArcMap*, de la familia *ArcGIS Desktop*. La georreferenciación de los datos fue a través de la herramienta *Spatial Adjustment*, el cual ofrece métodos interactivos para alinear e integrar los datos, generalmente se utiliza cuando se ha importado datos desde otra fuente (ESRI, 2016). Para esto se tomó como referencia datos vectoriales georreferenciados, correspondientes a la carta topográfica e14a23 (INEGI, 2021).

Con los datos georreferenciados, se procedió a la edición de los mapas cartográficos, a partir de la digitalización realizada en GlobalMapper. Para visualizar mejor detalle, el segmento de estudio se subdividió en siete secciones. Otro dato importante que se obtuvo a partir de la digitalización de las fracturas/grietas, fue la densidad de estas. El procesamiento de estos datos fue a través del software SIG *ArcMap*, con la herramienta *Line Density*. Con las fracturas digitalizadas, se calculó la dirección preferencial a través de Qgis, mediante la herramienta *Fiel Calculator*, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{degrees}(\text{azimuth}(\text{make_point}(\$x_at(0),\$y_at(0)),\text{make_point}(\$x_at(-1),\$y_at(-1))))$$

A partir de la densidad, se ubicó los segmentos más afectados por fracturas, esta se obtuvo a través de la herramienta *Line Density* en ArcMap (*Fig. 25*).



Figura 26. Herramienta Line Density en ArcMap. Fuente: (ESRI, 2016).

CloudCompare

5.3.6 Comparación de nube de puntos (C2C)

CloudCompare es una aplicación de uso libre para la administración y comparación de puntos 3D, se ha utilizado principalmente para tratar interiores de centrales eléctricas, escáneres laser y para tratar lecturas de presas o torres de enfriamiento. Este software permite calcular las distancias de dos nubes de puntos densas, filtrar el ruido de medición del escáner láser, identificar los objetos individuales, clasificación de puntos, entre otros (DGM et al., 2012).

Las nubes de puntos ajustadas se exportaron en formato *.ASCII* desde RiSCAN Pro y, después, se importaron en el software CloudCompare, en el cual se realizó un filtrado de puntos a 0.01 m, para disminuir la dimensión de las nubes. Estos datos se exportaron en formato *.LAS* e importaron en Global Mapper, para eliminar el ruido externo (infraestructura, vegetación, torres de luz, automóviles, etc.), lo cual permitió tener mayor detalle del terreno y evitar errores en el procesamiento de los datos en CloudCompare.

Con las nubes de puntos libre de ruido, se exportan en formato .LAS, consecutivamente se importan en CloudCompare. La distancia de las nubes se obtuvo a través de la herramienta *Cloud-to-Cloud Distance*, esta función permite calcular las distancias entre dos nubes de puntos, en la cual se selecciona la nube de referencia y la nube a comparar. La información de los resultados incluye: la distancia mínima y máxima, la distancia media, desviación estándar y el error relativo máximo (DGM et al., 2012).

Esta herramienta utiliza el método *cloud to cloud* (C2C) o nube a nube en español (Fig. 27), el cual, para cada punto de la nube comparada, el algoritmo busca el punto más cercano en la nube de referencia y calcula su distancia (euclidiana) (Jafari, 2016).

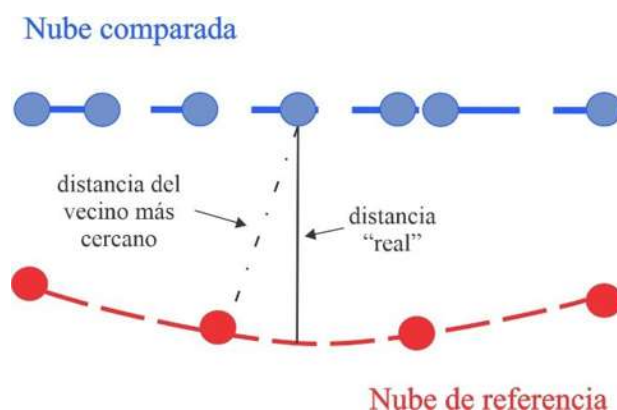


Figura 27. Medición de distancia en el algoritmo de búsqueda de vecino más cercano.
Tomada de (Jafari, 2016).

6. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del flujo de trabajo aplicado en la metodología.

6.1 Modelo Digital de Terreno y Cartografía.

El levantamiento con escáner láser terrestre fue la etapa fundamental del trabajo, para el análisis y procesamiento de los datos, ya que a través de esto se pudo obtener el modelo digital de terreno.

Como resultado se obtuvo un MDT a partir del primer monitoreo (2021) con una resolución de 0.026 metros (*Fig. 28*), con una elevación máxima de 1914 m.s.n.m y una mínima de 1877 m.s.n.m. El MDT permitió cartografiar las fracturas/grietas visibles sobre la vialidad.

Para visualizar con mayor detalle el MDT se optó por dividir el segmento en seis secciones (*Anexo 1*).

Dentro de los mapas cartográficos, se incluyeron los puntos de levantamiento, el límite del escaneo LiDAR, bordo del río, canales, alcantarillado, banquetas, tope vial, límite de la vialidad, el saneamiento y líneas del pavimento asfáltico (*Figura 29*). El mapa planimétrico se dividió a partir de las sección del MDT (*Anexo 2*).

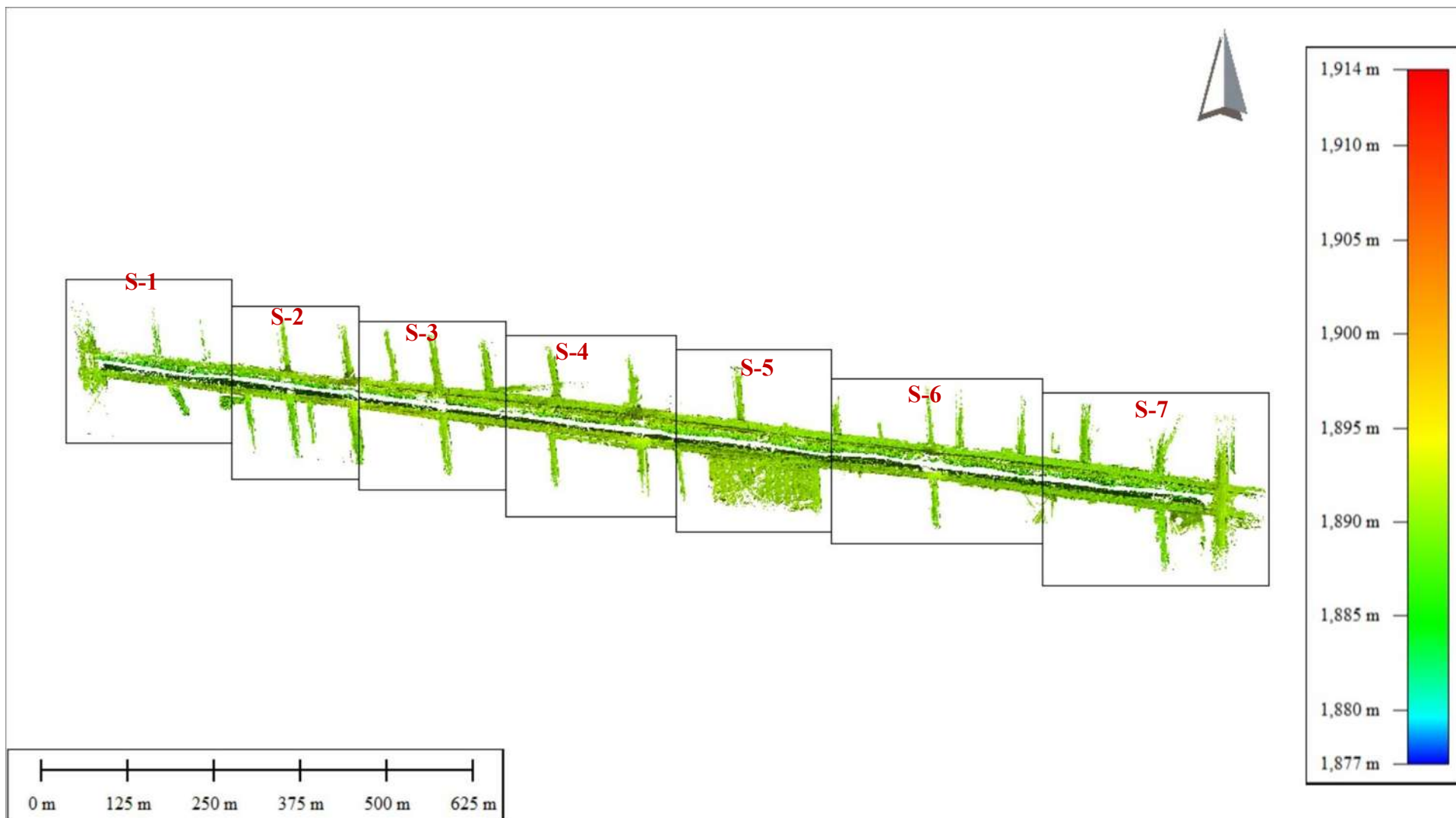


Figura 28. Modelo Digital de Terreno (MDT) obtenido a partir de las nubes de puntos. El rango de colores indica las alturas, siendo el azul las mínimas y el rojo las máximas.

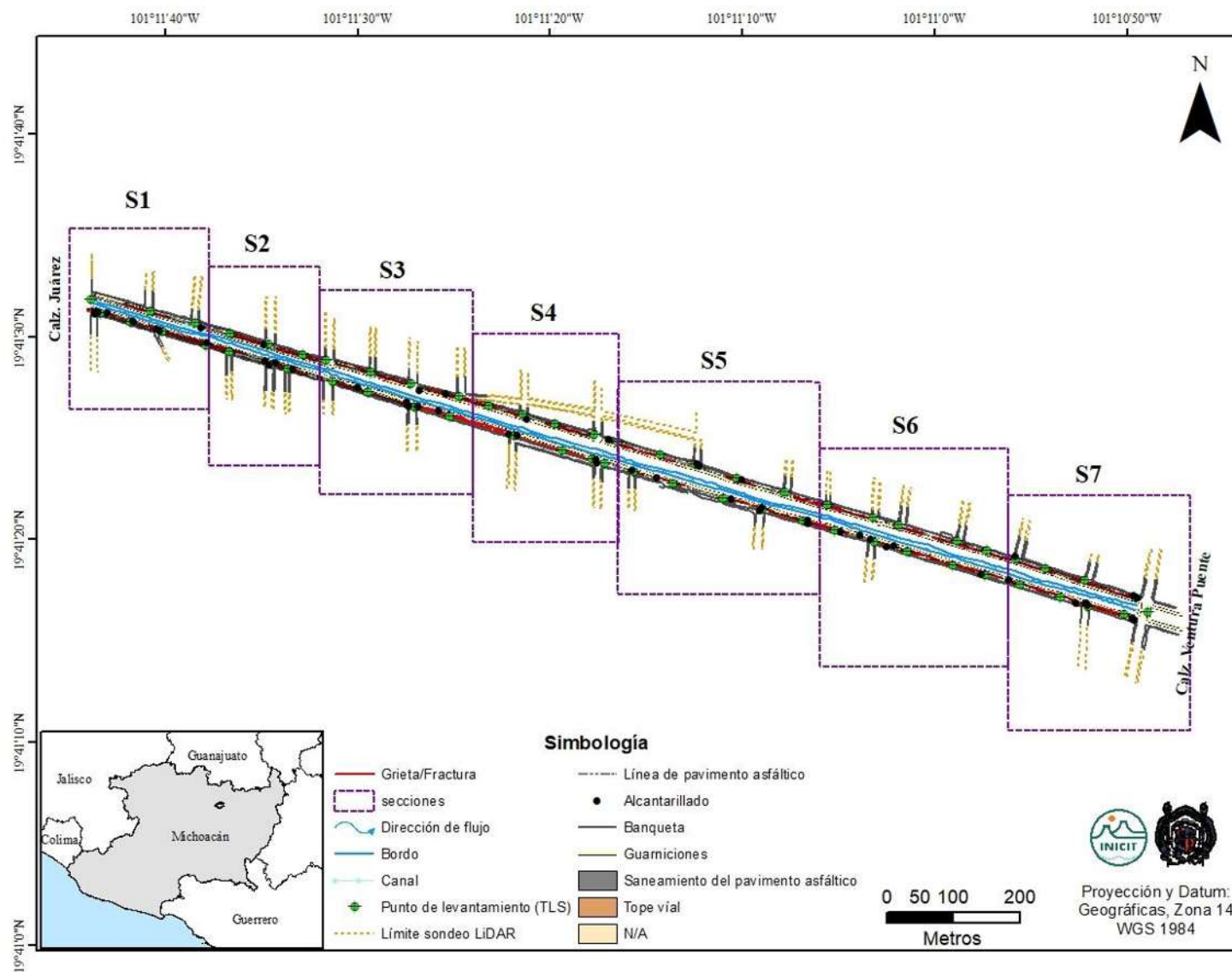


Figura 29. Mapa planimétrico, donde se muestra la división de las siete sección a partir del MDT.

6.2 Densidad de fracturas/grietas

La cartografía de los lineamientos fue un dato importante, en total se cartografiaron 643 fracturas/grietas en el MDT, estos datos nos permitieron obtener la densidad de fracturas sobre la vialidad (*Fig. 30*), tanto en su parte norte como en el sur.

Como resultado se localizó una zona altamente afectada por fracturas:

- Gran presencia de fracturas en la porción norte, entre las calles Isidro Huarte y Miguel de Cervantes Saavedra, al igual que en la porción sur, entre las calles Isidro Huarte y Soriana Río.

A partir de los datos vectoriales de las fracturas, también se calculó la dirección preferencial de estas, obteniendo como resultado una dirección preferencial WNW-ESE, con ángulos que oscilan entre los 271° - 280° y una dirección mínima NE-SW.

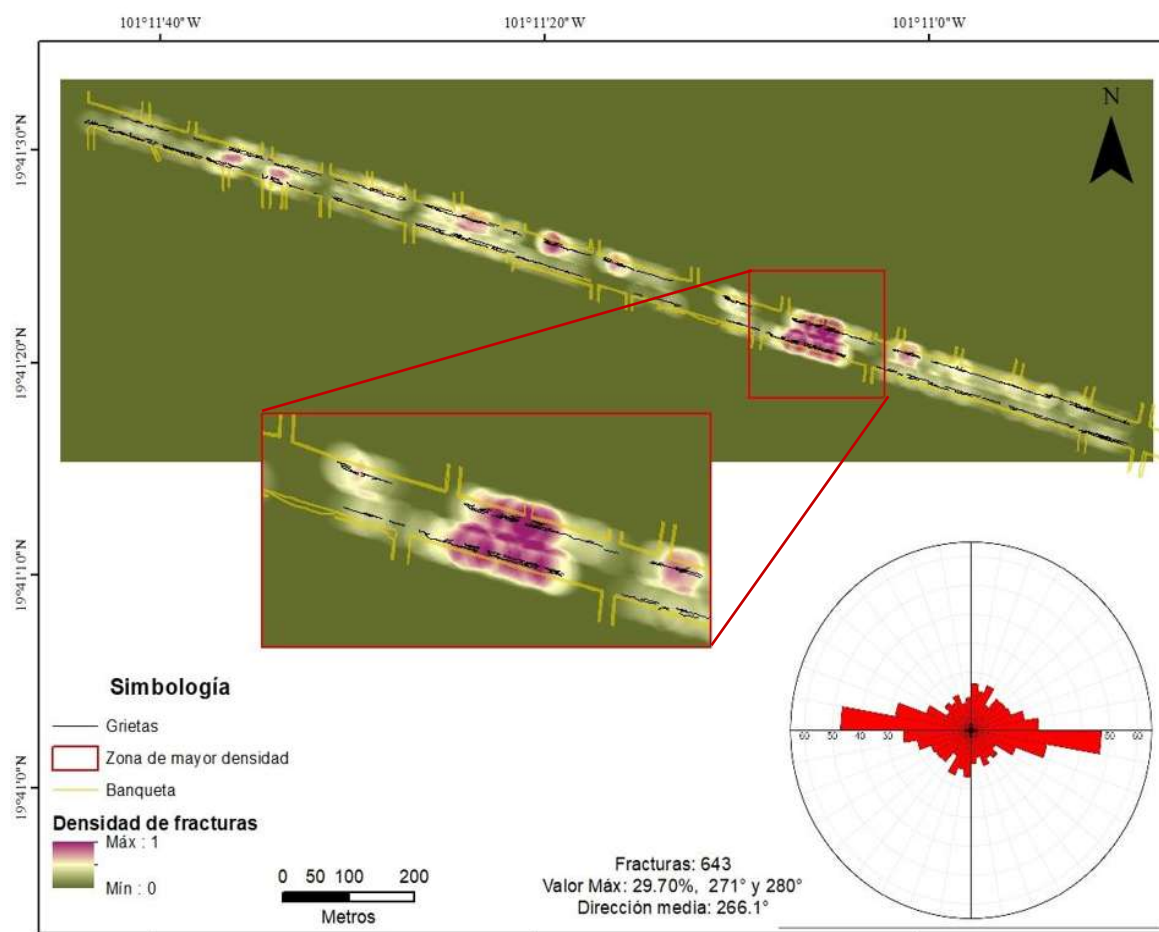


Figura 30. Mapa de densidad de fracturas.

6.3 Deformación y fracturas

La Av. Solidaridad se encuentra al sur de la ciudad de Morelia, la cual presenta una gran deformación y fracturas en la carpeta asfáltica (*Fig. 31*), tanto en su parte norte como en el sur, estas fracturas se intensifican a partir del cruce de la Calzada Juárez hasta el cruce con la Av. Ventura Puente. Dentro de las deformaciones se distinguen la separación de la carpeta asfáltica y las guarniciones, así como el hundimiento de estas.



Figura 31. a) Fracturas sobre la carpeta asfáltica, la parte oscura corresponde a los saneamientos realizados en la vialidad, b), c) y d) Deformaciones visibles sobre la vialidad.

6.4 Geometría del talud

Las observaciones en campo y el MDT, permitieron describir la geometría del talud. Esta geometría varía a lo largo del segmento, por lo cual se generalizaron en tres perfiles.

- a) Perfil 1. En este se observa que el hombro del talud corresponde a las guarniciones de la vialidad, esta geometría se observa aproximadamente en un tramo de 487 m, el cual corresponde a la calzada Juárez con intersección con la calle Virrey de Mendoza. Se infiere una superficie de falla a partir de la concentración y forma de las fracturas observadas en campo (*Figura 32*).
- b) Perfil 2. En este perfil se observa que el hombro se encuentra más retirado de la vialidad, formando la cabeza del talud donde su longitud varía de 2 a 3 m. Dicha geometría se observa a partir de la calle Virrey de Mendoza con la intersección de la calle Vicente Barroso, este tramo tiene una longitud aproximada de 1 km. Se infiere una superficie de falla a partir de la máxima deformación de la vialidad. (*Figura 33*).
- c) Perfil 3. Corresponde a un pequeño tramo del proyecto del parque lineal del Río Chiquito, con aproximadamente 72 m de longitud. En este perfil se observa el cambio de geometría del talud por actividad antropogénica, en donde el hombro del talud tiene una separación de la vialidad de 4 m, este corresponde a la ciclovía del parque lineal. La superficie de falla se infiere a partir de la máxima deformación de la vialidad hasta el pie del talud (*Figura 34*).

La pendiente del talud en todo el segmento varía, teniendo mínimas de 10° a 30° y máximas de 60° a 85° mientras que la altura varía de 4 m a 5 m.

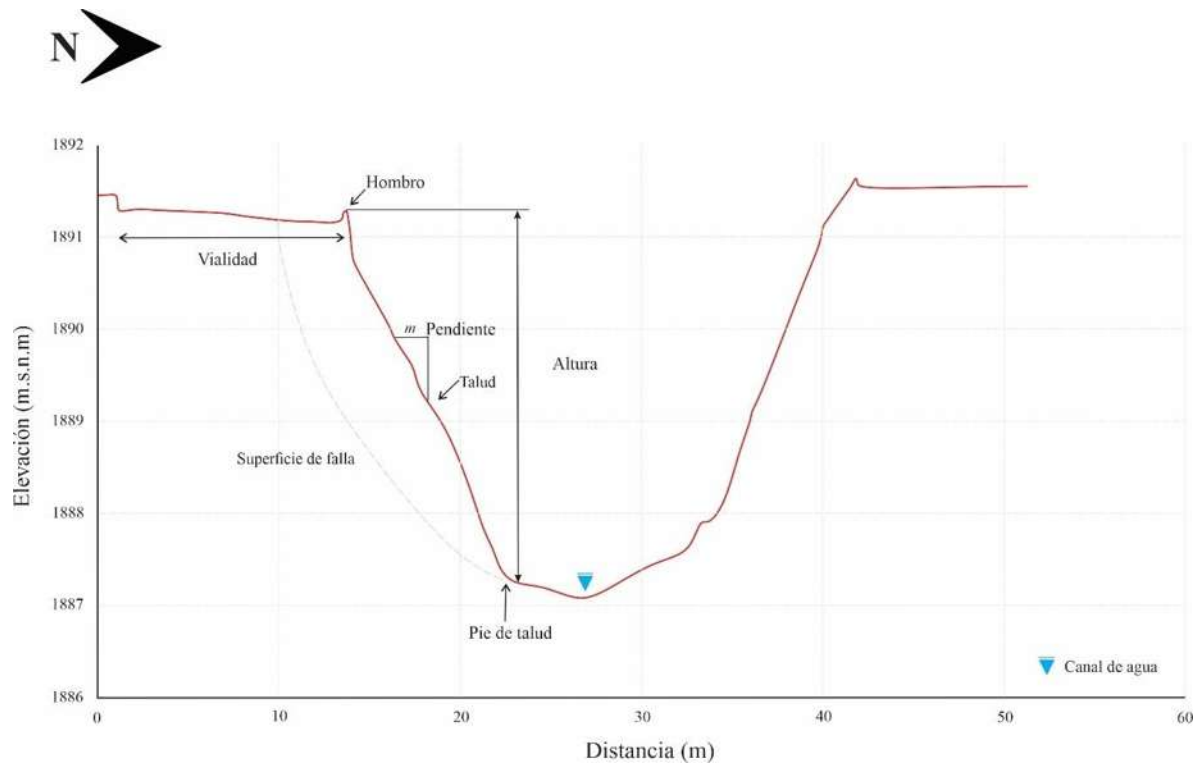


Figura 32. Perfil 1. Descripción geométrica del talud.

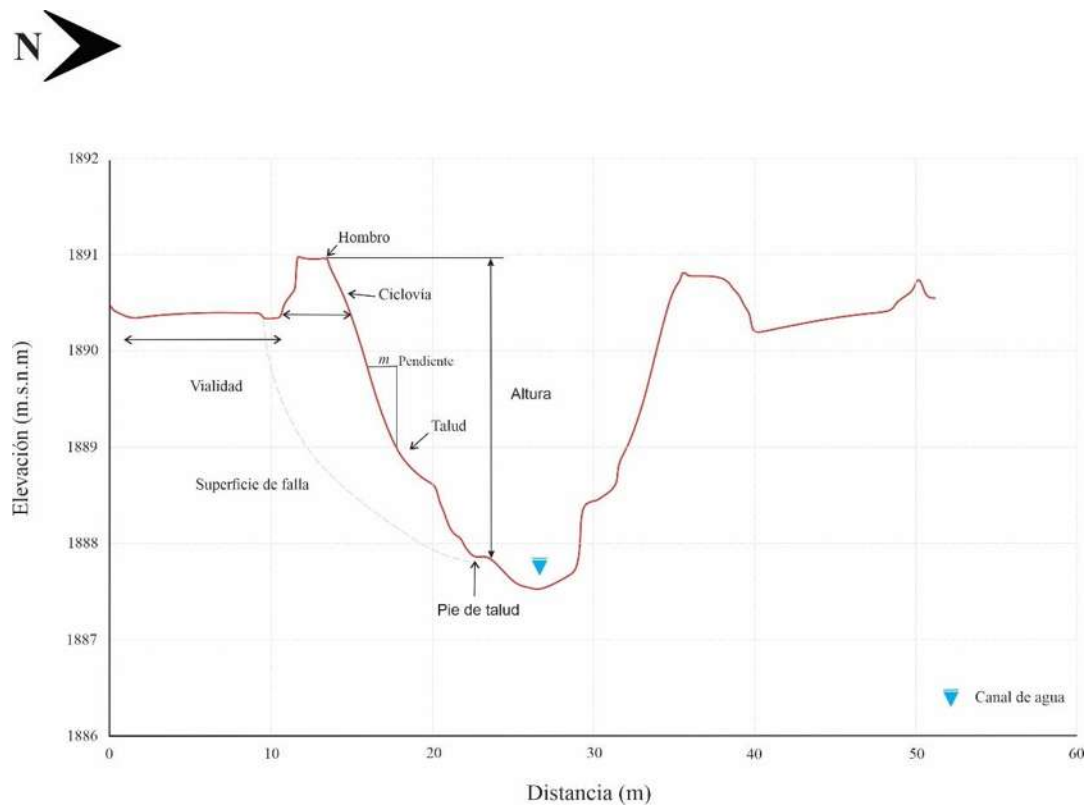


Figura 33. Perfil 2. Descripción geométrica del talud.

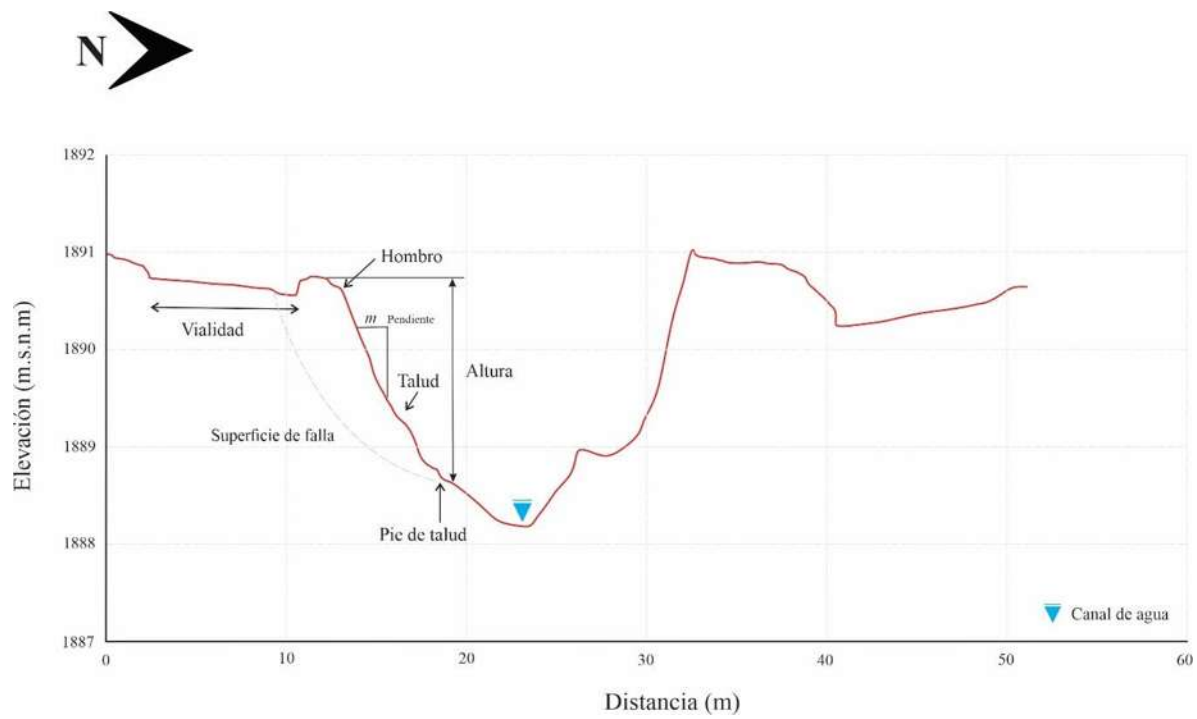


Figura 34. Perfil 3. Descripción geométrica del talud.

6.5 Morfometría de los PRM

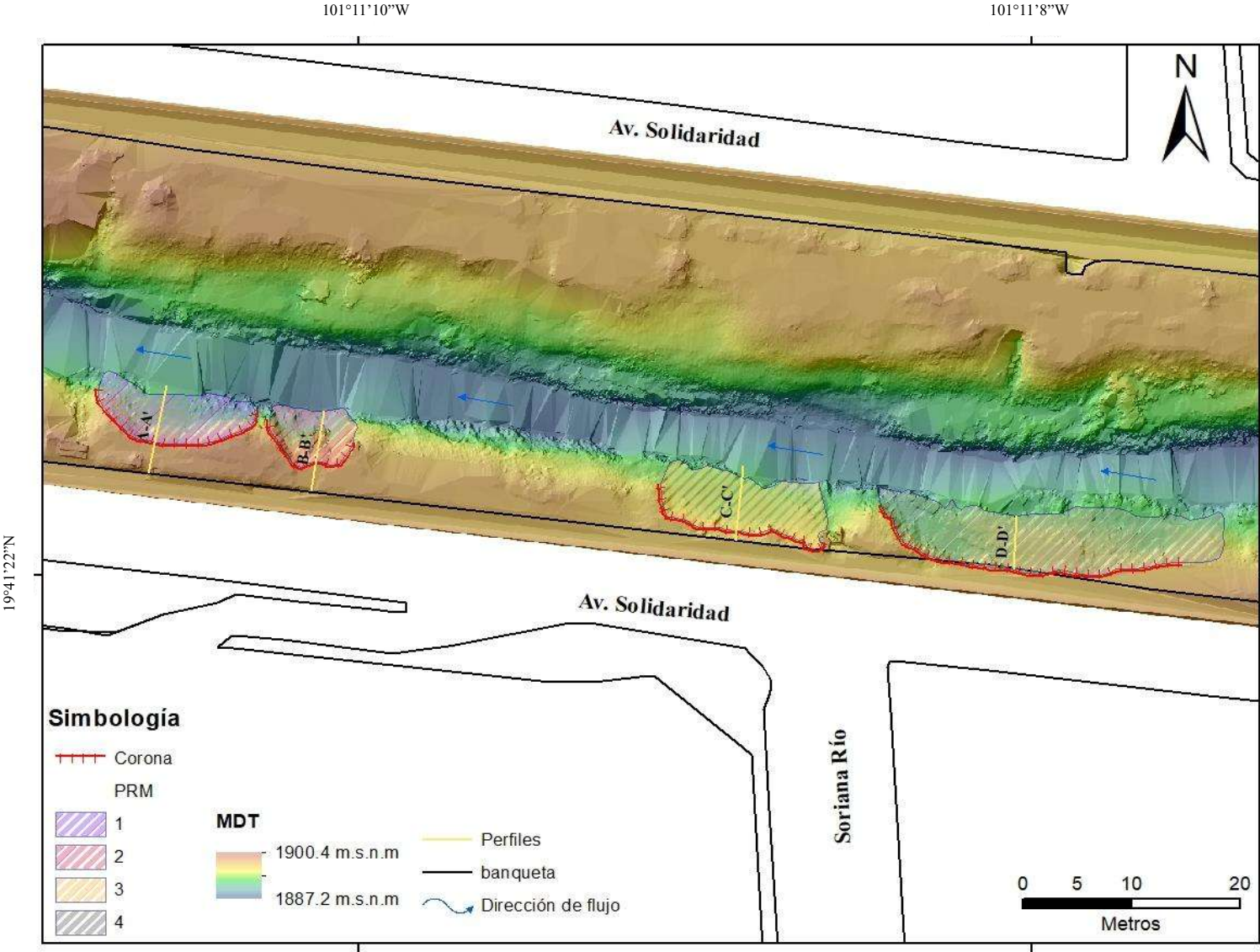


Figura 35. Mapa inventario de deslizamientos.

En el segmento de estudio se identificaron cuatro deslizamientos ubicados entre la c. Soriana Río con el cruce de la Av. Solidaridad. Estos cuerpos fueron delimitados a partir del MDT. Se realizaron perfiles topográficos para cada cuerpo de deslizamiento, lo cual permitió la descripción morfológica de cada uno, como se muestran a continuación:

6.5.1 PRM 1

Con ayuda del MDT se construyó el perfil A-A' (*Fig. 36*), con el cual fue posible definir y delimitar un cuerpo que tiene una longitud de 14.62 m, un ancho de 4.8 m, con un desnivel topográfico de 2.5 m. Además, se infiere el desarrollo de una superficie de desplazamiento a una profundidad de 0.80 m, con un área aproximada de 60 m². A partir de las observaciones en campo en conjunto con el detalle logrado en el MDT, se realizó una interpretación preliminar tomando como punto de partida el escarpe principal. Así mismo, es posible inferir la presencia de escarpes secundarios que estarían representando fallamientos secundarios tanto sintéticos como antitéticos.

Se identificaron elementos característicos en movimientos de masa con geometría rotacional; una superficie curva o en forma de “cuchara”, fracturas en forma de medialuna en la carpeta asfáltica, así como deformación de la guarnición en dirección al movimiento del cuerpo. El tipo de material que lo constituye son sedimentos fluvio-lacustres areno-limoso, así como relleno antropogénico. Este cuerpo presenta pendientes mínimas de 0° a 10° en la parte media del PRM y pendientes máximas de 32° a 54 ° en su escarpe principal.

Por lo anterior, este PRM se clasifica como un deslizamiento rotacional múltiple o conocido como *rotational slide multiple* de acuerdo con la clasificación y descripción de Varnes (1958).

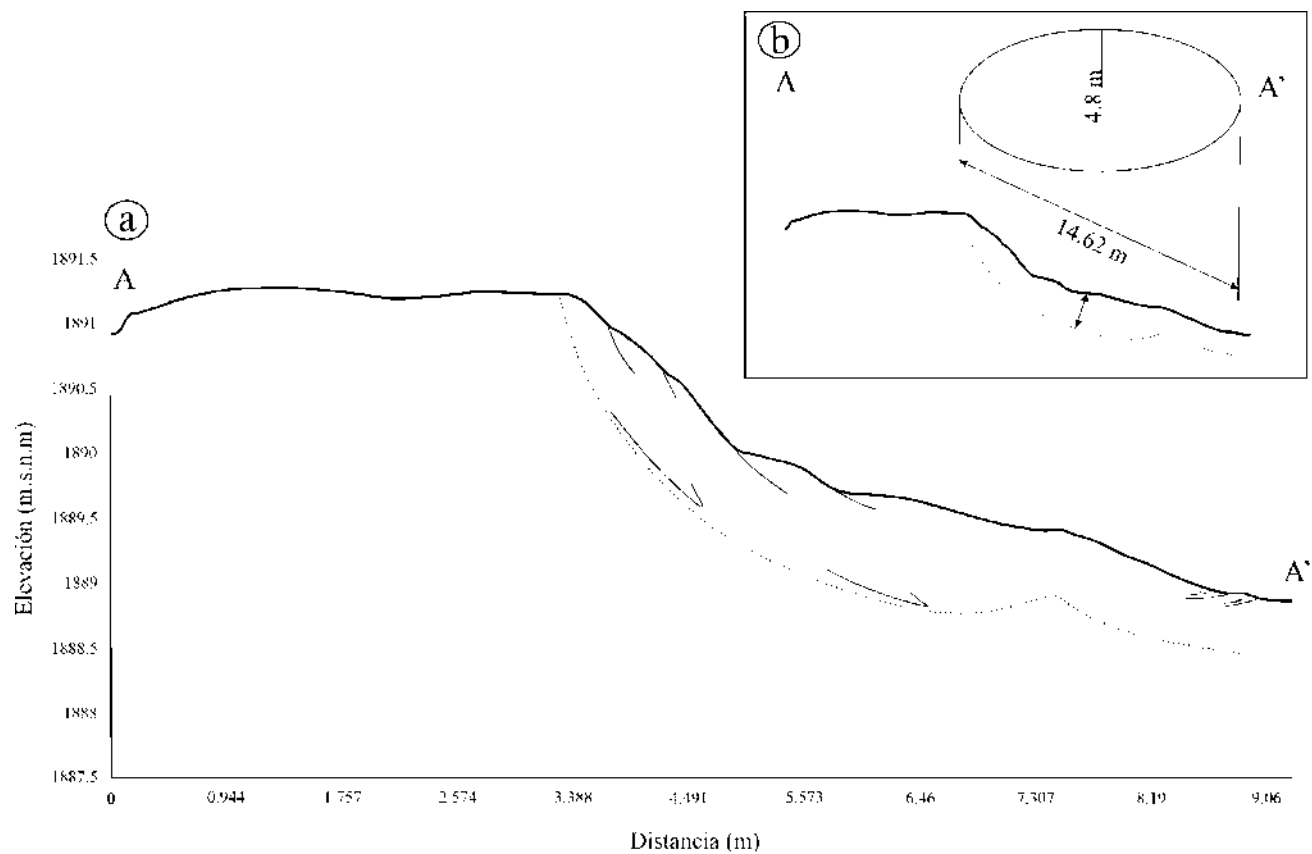


Figura 36. a) Perfil topográfico A-A' del PRM 1, donde se muestran las características de fracturas superficiales inferidas, así como el cuerpo principal del deslizamiento, b) Dimensiones aproximadas del cuerpo de acuerdo con (IAEG Commission on Landslides, 1990).

6.5.2 PRM 2

En el perfil B-B' (*Fig. 37*), fue posible definir y delimitar un cuerpo que tiene una longitud de 8 m, un ancho de 4.8 m, con un desnivel topográfico de 3 m. También se infiere el desarrollo de una superficie de desplazamiento a una profundidad de 1.15 m, con un área aproximada de 33 m². Se realizó una interpretación preliminar tomando como punto de partida el escarpe principal. Así mismo, es posible inferir la presencia de escarpes secundarios que estarían representando fallamientos secundarios sintéticos y antitéticos.

Se identificó una superficie curva o en forma de “cuchara”, su flanco derecho e izquierdo están poco definidos. No se observan fracturas en la carpeta asfáltica relacionadas a este cuerpo, ni deformaciones de las guarniciones.

El tipo de material que lo constituye son sedimentos fluvio-lacustres areno-limoso, así como relleno antropogénico. Este cuerpo presenta pendientes mínimas de 24° a 43° en la parte media del PRM y pendientes máximas de 54° a 67° en su escarpe principal.

Por lo anterior, este PRM se clasifica como un deslizamiento rotacional múltiple o conocido como *rotational slide multiple* de acuerdo con la clasificación y descripción de Varnes (1958).

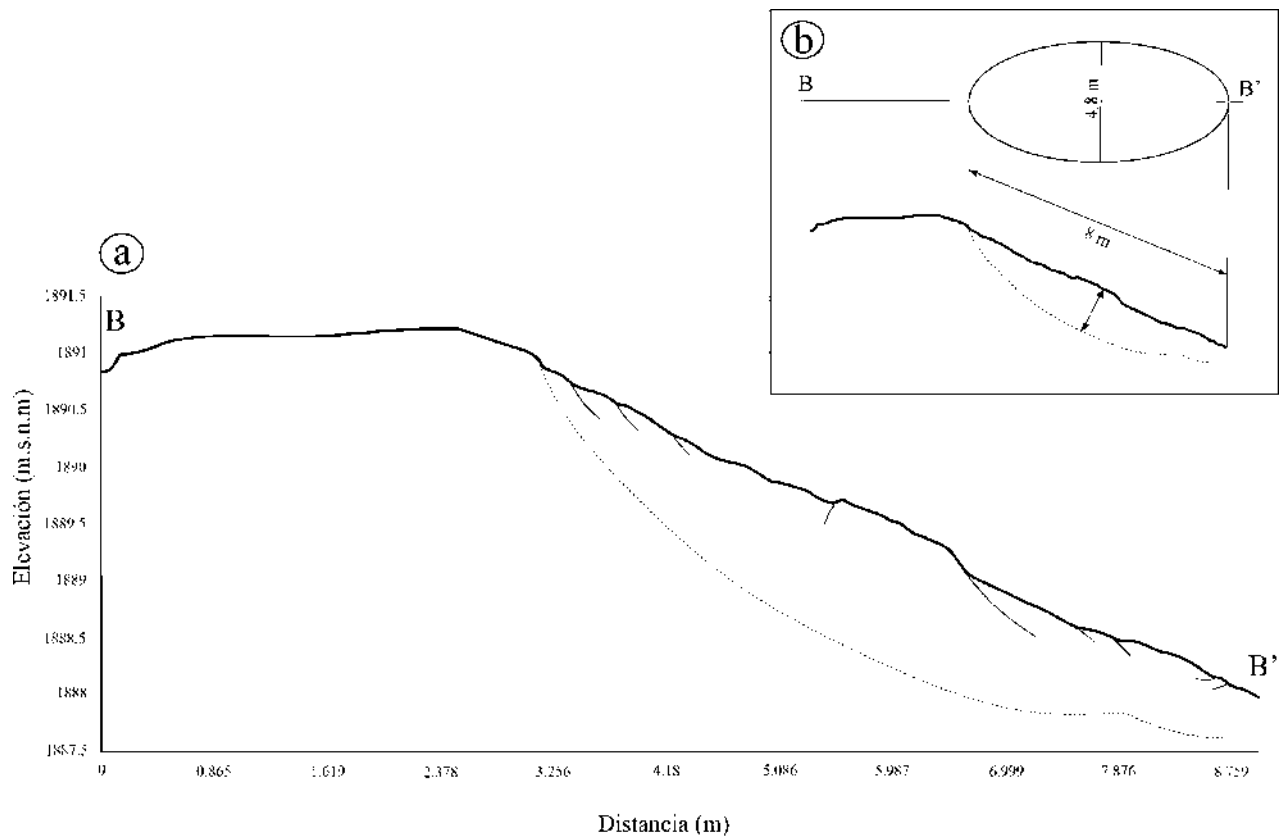


Figura 37. a) Perfil topográfico B-B' del PRM 2, donde se muestran las características de fracturas superficiales inferidas, así como el cuerpo principal del deslizamiento, b) Dimensiones aproximadas del cuerpo de acuerdo con (IAEG Commission on Landslides, 1990).



Figura 38. PRM 2 observado en campo a la altura del estacionamiento de Soriana del Río.

6.5.3 PRM 3

Con el perfil C-C' (*Fig. 39*), fue posible definir y delimitar un cuerpo que tiene una longitud de 15.2 m, un ancho de 5 m, con un desnivel topográfico de 1.5 m. Además, se infiere el desarrollo de una superficie de desplazamiento a una profundidad de 0.62 m, con un área aproximada de 77 m². Se realizó una interpretación preliminar tomando como punto de partida el escarpe principal. Así mismo, es posible inferir la presencia de dos escarpes secundarios que estarían representando fallamientos secundarios tanto sintéticos como antitéticos.

El tipo de material que lo constituye son sedimentos fluvio-lacustres areno-limosos, así como relleno antropogénico. Este cuerpo presenta pendientes mínimas de 0° a 4° en la parte media del PRM y pendientes máximas de 24° a 43° en su escarpe principal.

Por lo anterior, este PRM se clasifica como un deslizamiento rotacional o conocido como *rotational slide* de acuerdo con la clasificación y descripción de (Varnes, 1958).

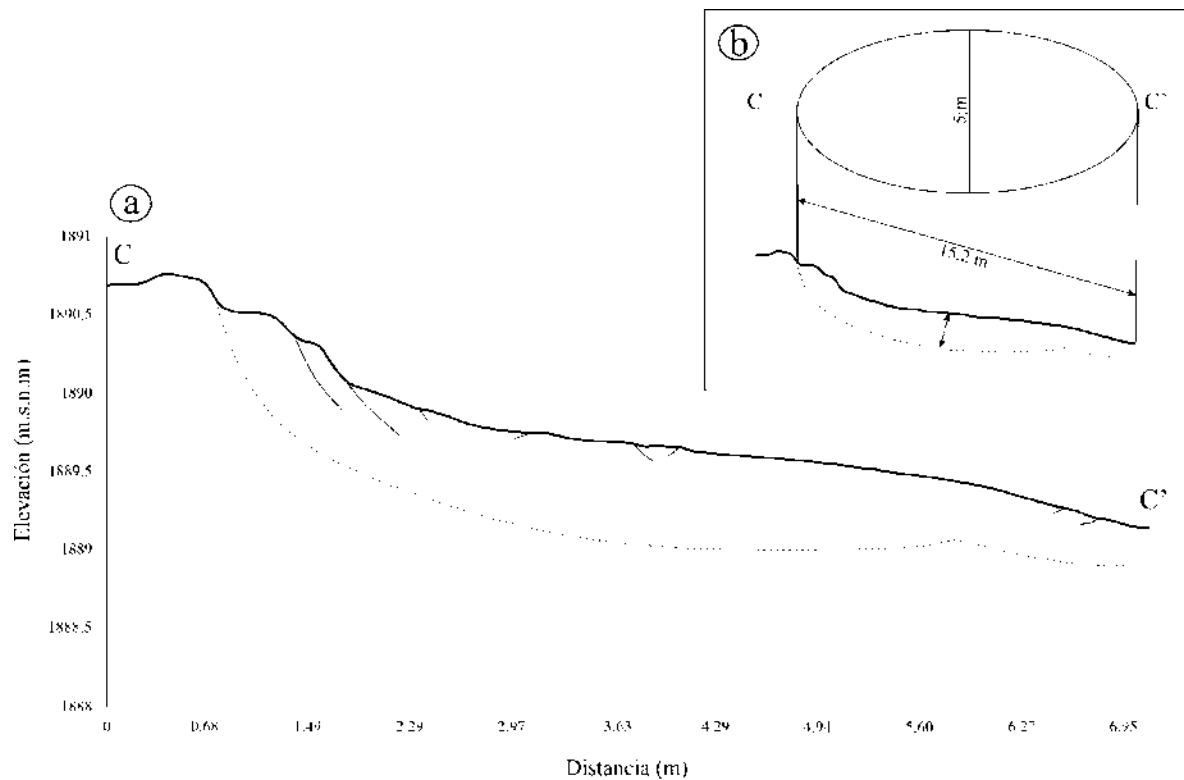


Figura 39. a) Perfil topográfico C-C' del PRM 3, donde se muestran las características de fracturas superficiales inferidas, así como el cuerpo principal del deslizamiento, b) Dimensiones aproximadas del cuerpo de acuerdo con (IAEG Commission on Landslides, 1990).



Figura 40. PRM 3 observado en campo a la altura del estacionamiento de Soriana del Río.

6.5.4 PRM 4

En el perfil D-D' (*Fig. 41*), fue posible definir y delimitar un cuerpo que tiene una longitud de 30.4 m, un ancho de 5.6 m, con un desnivel topográfico de 1.5 m. Se infiere el desarrollo de una superficie de desplazamiento a una profundidad de 1.20 m, con un área aproximada de 161 m², siendo el cuerpo más grande de los cuatro. Se realizó una interpretación preliminar tomando como punto de partida el escarpe principal. Así mismo, es posible inferir la presencia de un escarpe secundario que estarían representando fallamientos secundarios tanto sintéticos como antitéticos. En la parte inferior se observa un lóbulo, siendo este el pie del deslizamiento.

Este cuerpo presenta pendientes mínimas de 0° a 4° en la parte media del PRM y pendientes máximas de 43° a 67° en su escarpe principal. Por lo anterior, este PRM se clasifica como un deslizamiento rotacional o conocido como *rotational slide* de acuerdo con la clasificación y descripción de Varnes (1958).

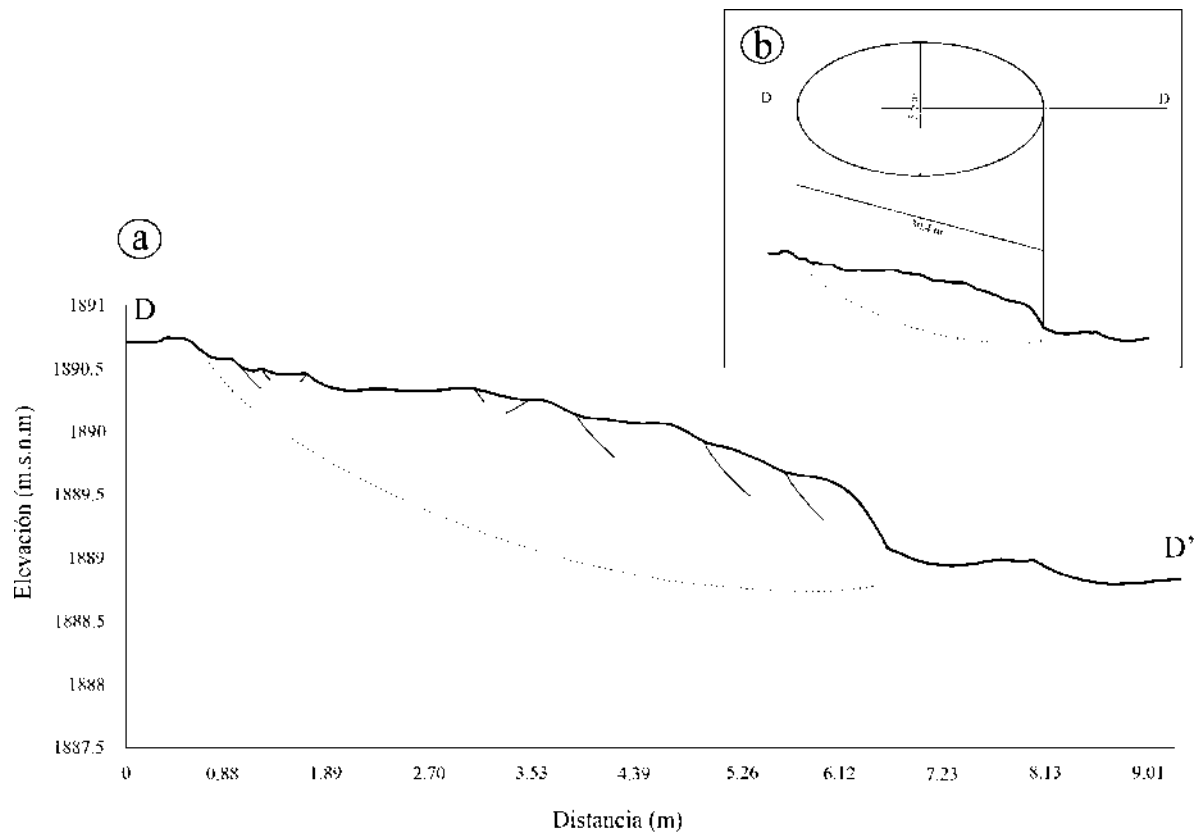


Figura 41. a) Perfil topográfico D-D' del PRM 4, donde se muestran las características de fracturas superficiales inferidas, así como el cuerpo principal del deslizamiento, b) Dimensiones aproximadas del cuerpo de acuerdo con (IAEG Commission on Landslides, 1990).



Figura 42. PRM 4 observado en campo a la altura del estacionamiento de Soriana del Río, se observa la deformación de la guardación, así como el hundimiento de la carpeta asfáltica (Google, 2023).

6.6 Cinemática

La cinemática está condicionada por el desplazamiento y hundimiento de las zonas con más presencia de fracturas, asociadas a los canales de drenaje y/o a los posibles PRM presentes sobre el talud del Río Chiquito.

La comparación de nubes permitió obtener los valores de X, Y y Z. Los resultados de los desplazamientos en X y Y, fueron casi imperceptibles, por lo cual se realizó solo el análisis en la dirección Z.

El primer monitoreo se realizó en mayo de 2021 y el segundo en mayo de 2022. A partir de estos datos obtenidos, se realizó el análisis de las nubes de puntos con una temporalidad de 1 año. Este análisis se centró solo en la parte sur de la Av. Solidaridad, la cual presenta una mayor deformación y fracturas a comparación de su parte norte. Este análisis se realizó de acuerdo con las secciones del MDT (*Figura 28*). Para la primera comparación de nubes, se presentan distancias absolutas en Z que van de -0.039 m a 0.075 m $\pm$ 4 mm. Estos desplazamientos se concentran en la cercanía a los taludes del Río Chiquito, a las zonas de mayor presencia de fracturas y a las zonas de canales de drenaje.

El tercer monitoreo se realizó el 26 de febrero de 2023, con una diferencia de 9 meses y 12 días con respecto al segundo monitoreo y 1 año 9 meses y 17 días con respecto al primer levantamiento. El segundo análisis se realizó comparando el primer monitoreo contra el tercer monitoreo, obteniendo una disminución de desplazamientos en la mayoría de las secciones, presentando distancias absolutas en Z que van de -0.121 m a 0.1 m $\pm$ 4 mm.

Para cada sección se analizaron las zonas con mayor desplazamiento, para lo cual se obtuvo la velocidad promedio en la horizontal y vertical. Comparando las velocidades horizontales, se observa una notable disminución en un intervalo de 1 año 9 meses, exceptuando la zona 4 de la sección 1, la cual tuvo un aumento de 0.12 a 0.20 cm/año. Comparando las velocidades verticales del periodo 2021-2022 y 2021-2023, se observa una disminución considerable, exceptuando la zona 2 de la sección 1, con un aumento de 0.016 a 0.180 cm/año, la zona 1 de la sección 2, de 0.049 a 0.205 cm/año y para la zona 1 de la sección 7 con un aumento de 0.059 a 0.239 cm/año.

Se graficaron las velocidades horizontales (Fig. 43 y 44) y verticales (Figura 45 y 46) de desplazamiento de cada sección en las cuales se observan los valores mínimos y máximos, así como la disminución y aumento de estos.

Sección	2021-2022			
	Velocidad horizontal (cm/año)			
	Zona			
	1	2	3	4
1	0.61	0.77	0.50	0.12
2	0.43			
3	0.74	0.64	1.54	
4	3.15			
5	1.49	0.76	0.68	
6	1.26	0.67		
7	0.54			

Sección	2021-2023			
	Velocidad horizontal (cm/año)			
	Zona			
	1	2	3	4
1	0.12	0.36	0.04	0.20
2	0.21			
3	0.53	0.45	0.96	
4	0.93			
5	1.31	0.61	0.62	
6	0.67	0.29		
7	0.28			

Tabla 6. Velocidades horizontales anuales a partir de las nubes de puntos.

Sección	2021-2022			
	Velocidad vertical (cm/año)			
	Zona			
	1	2	3	4
1	1.504	0.016	0.917	0.138
2	0.049			
3	0.853	1.835	0.607	
4	3.842			
5	1.682	1.845	1.080	
6	0.666	0.557		
7	0.059			

Sección	2021-2023			
	Velocidad vertical (cm/año)			
	Zona			
	1	2	3	4
1	0.022	0.180	0.011	0.003
2	0.205			
3	0.560	0.202	0.660	
4	2.266			
5	1.262	0.907	0.211	
6	0.957	0.280		
7	0.239			

Tabla 5. Velocidades verticales anuales a partir de las nubes de puntos.

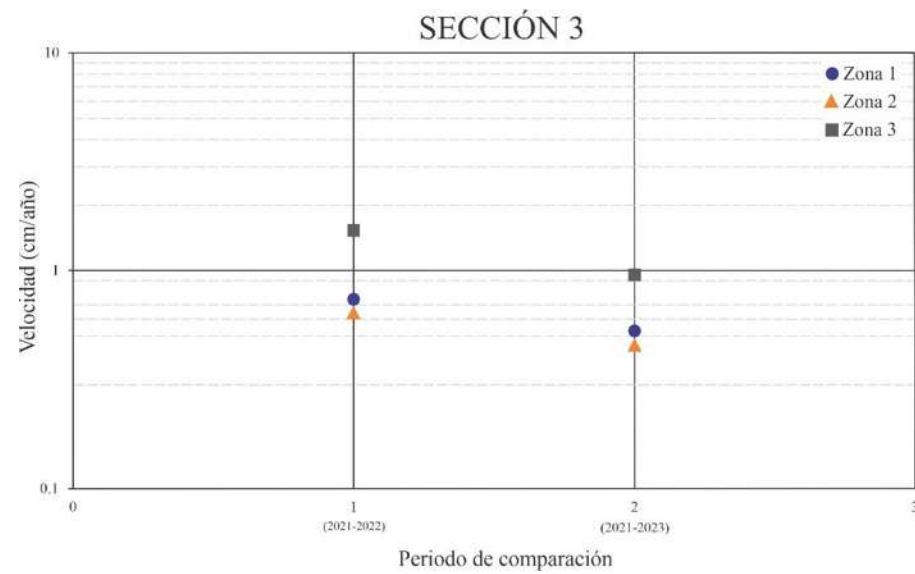
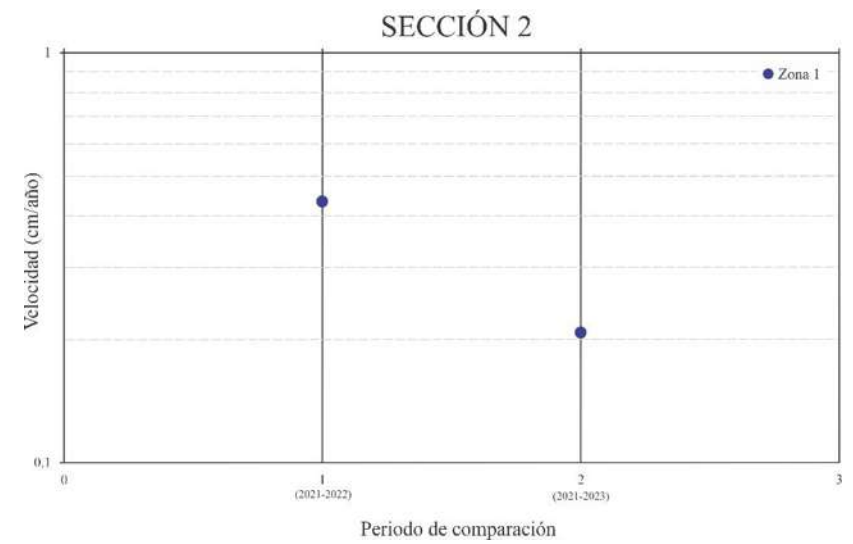
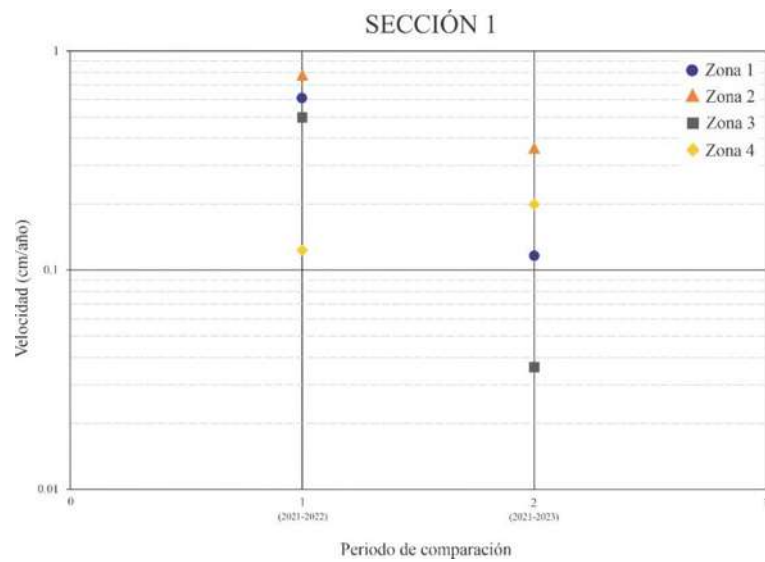


Figura 43. Gráficas de velocidad correspondientes a la sección 1, 2 y 3.

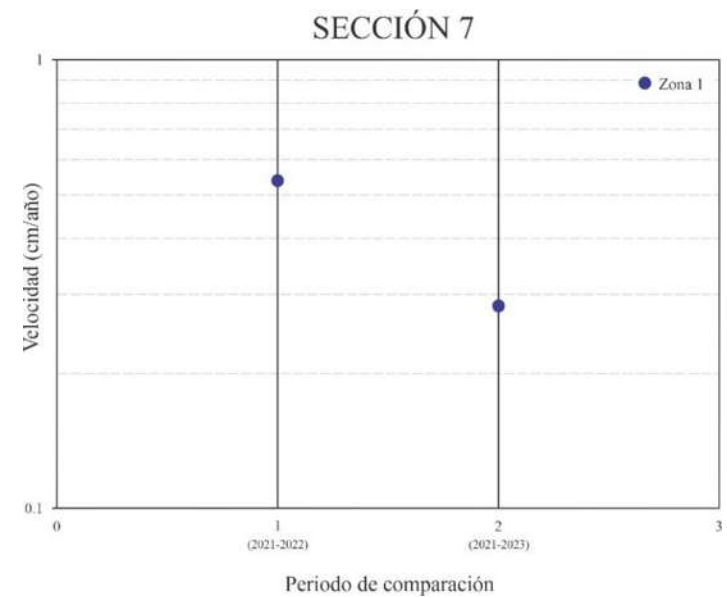
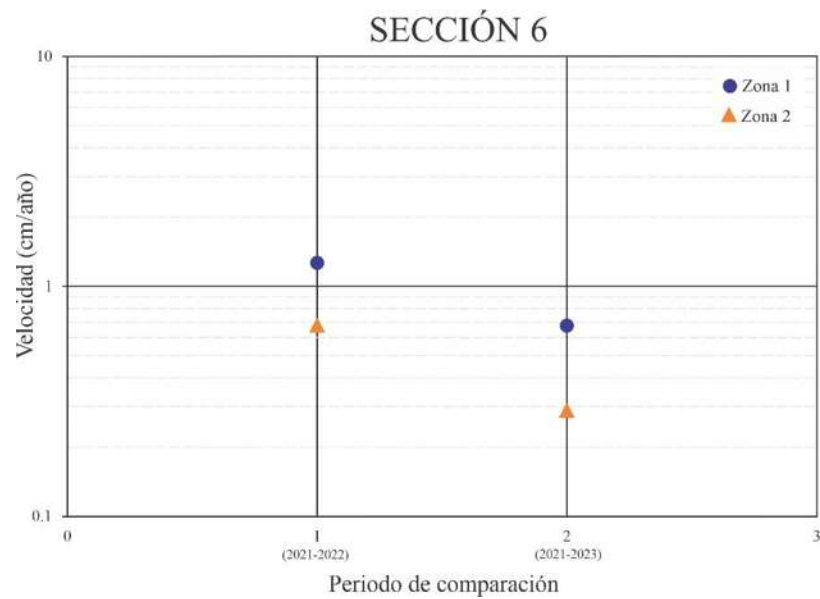
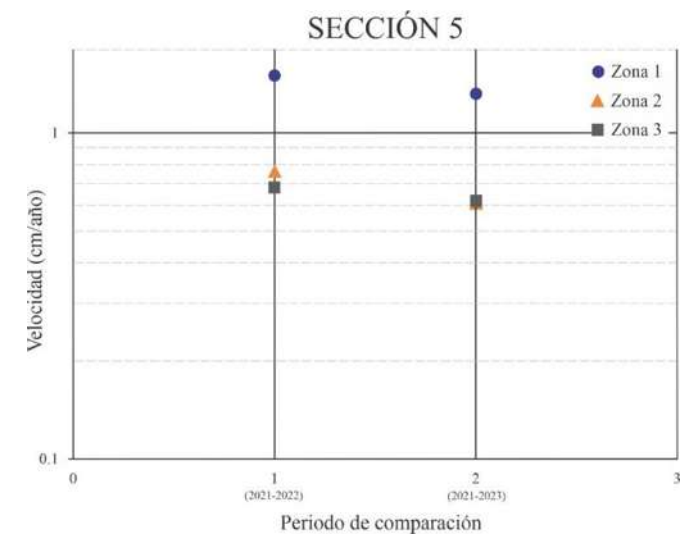
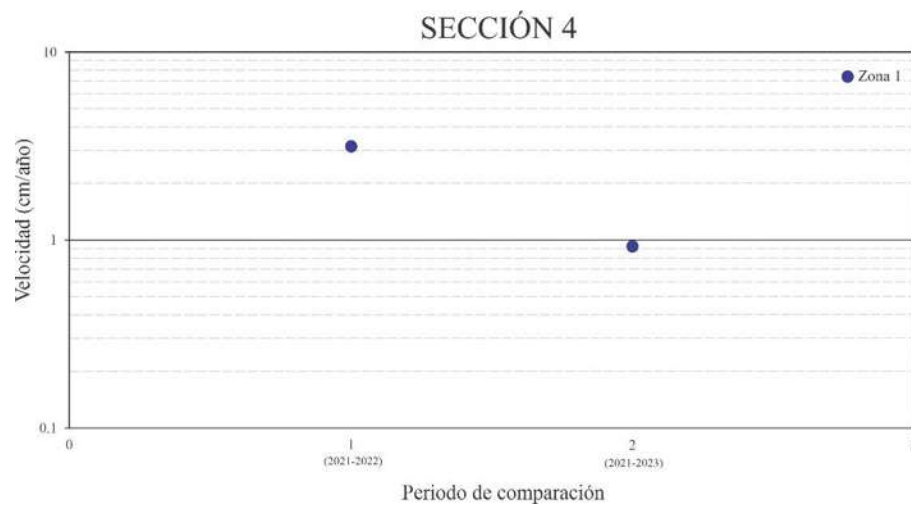


Figura 44. Gráficas de velocidad horizontal correspondientes a la sección 4, 5, 6 y 7.

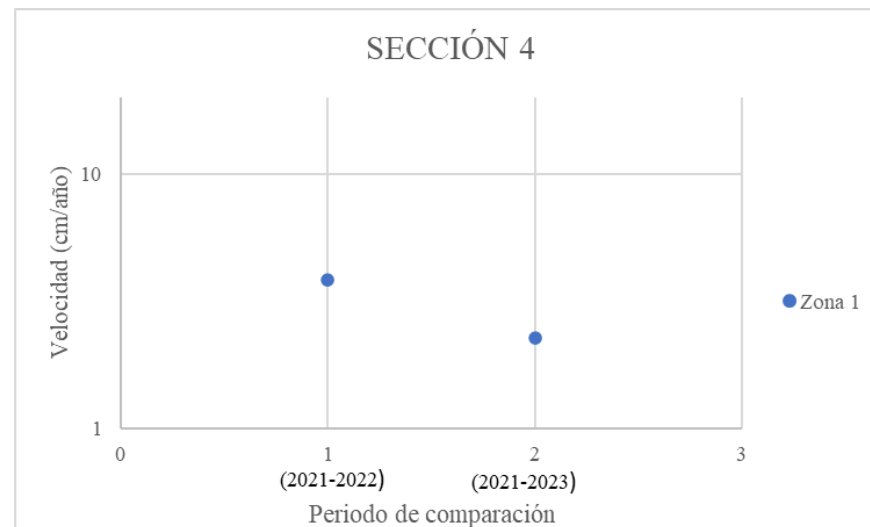
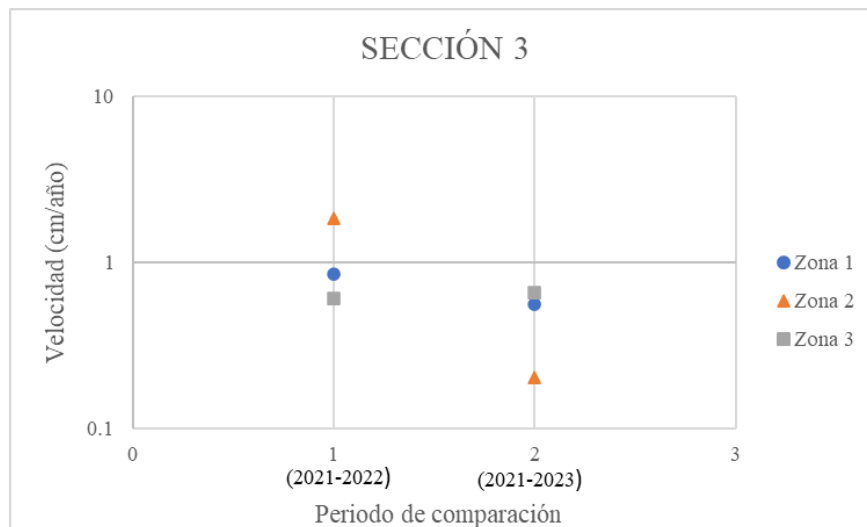
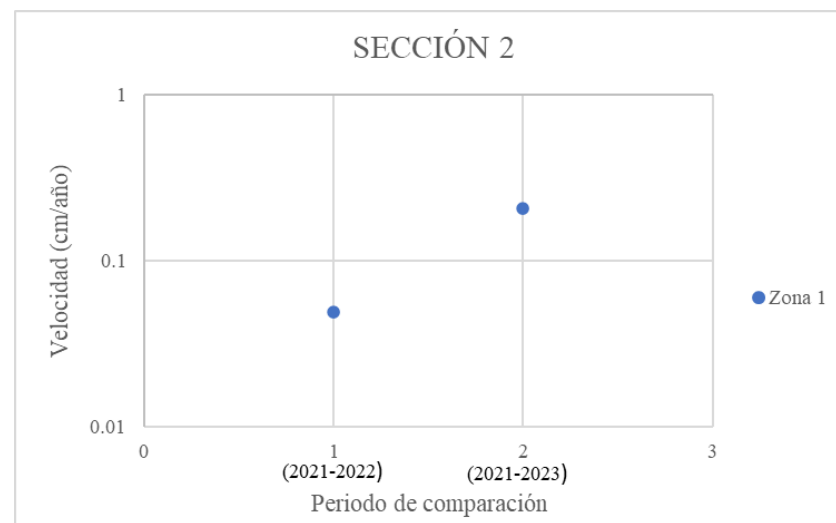
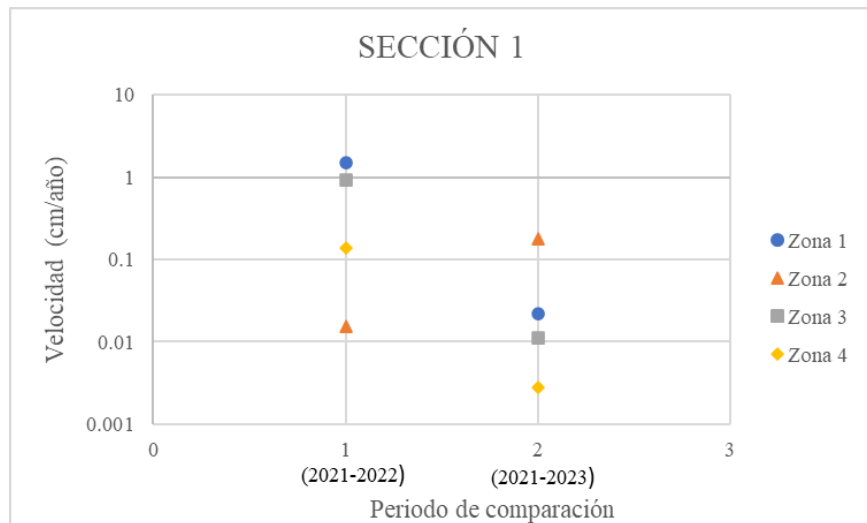


Figura 45. Gráficas de vertical correspondientes a la sección 1,2,3 y 4.

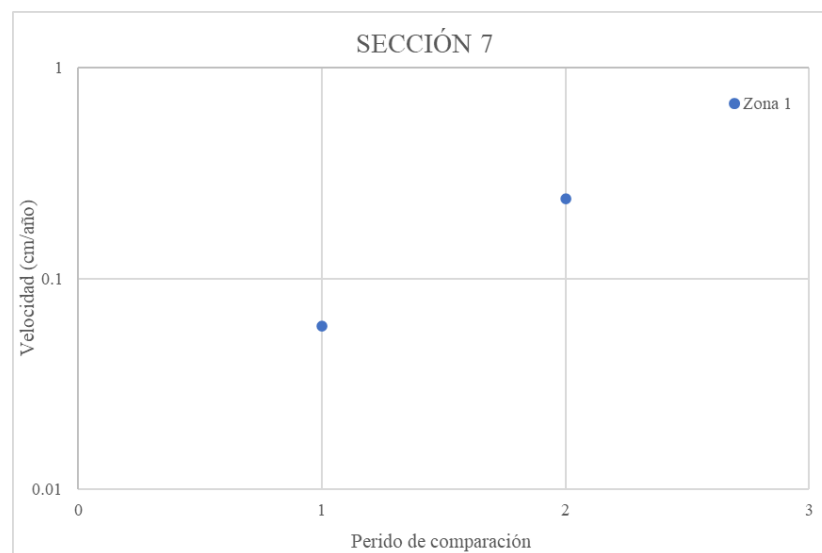
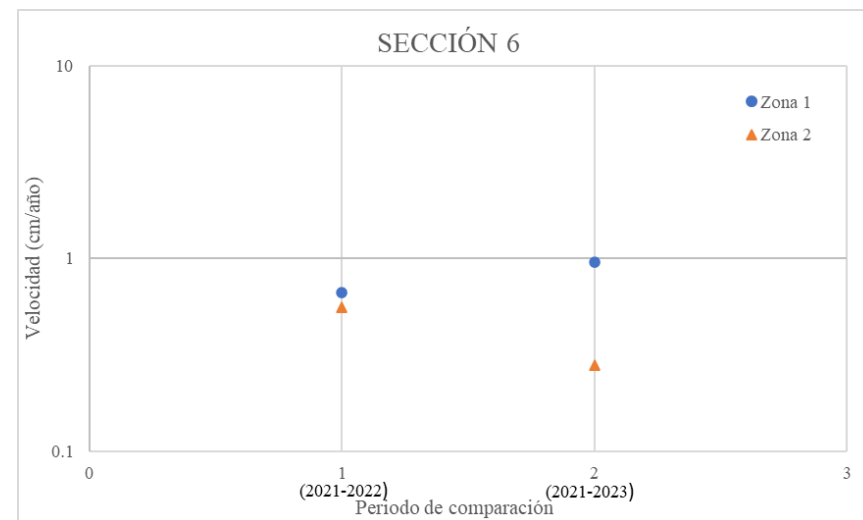
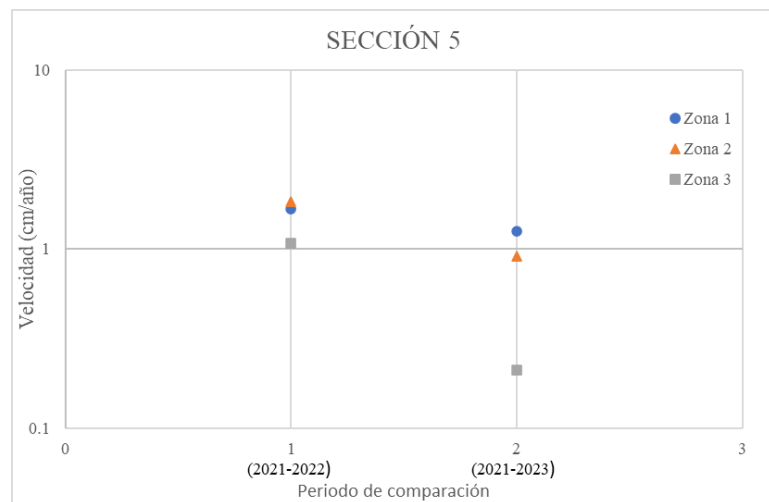


Figura 46. Gráficas de vertical correspondientes a la sección 5, 6 y 7.

A partir de los datos obtenidos anteriormente, se realizó un análisis más detallado de cada sección, tomando en cuenta la topografía obtenida a partir de las nubes de puntos. Se realizaron perfiles topográficos en las zonas con mayor desplazamiento. Estos perfiles nos permitieron observar con mayor detalle el desplazamiento que se ha generado en una temporalidad de 3 años.

6.6.1 Sección 1

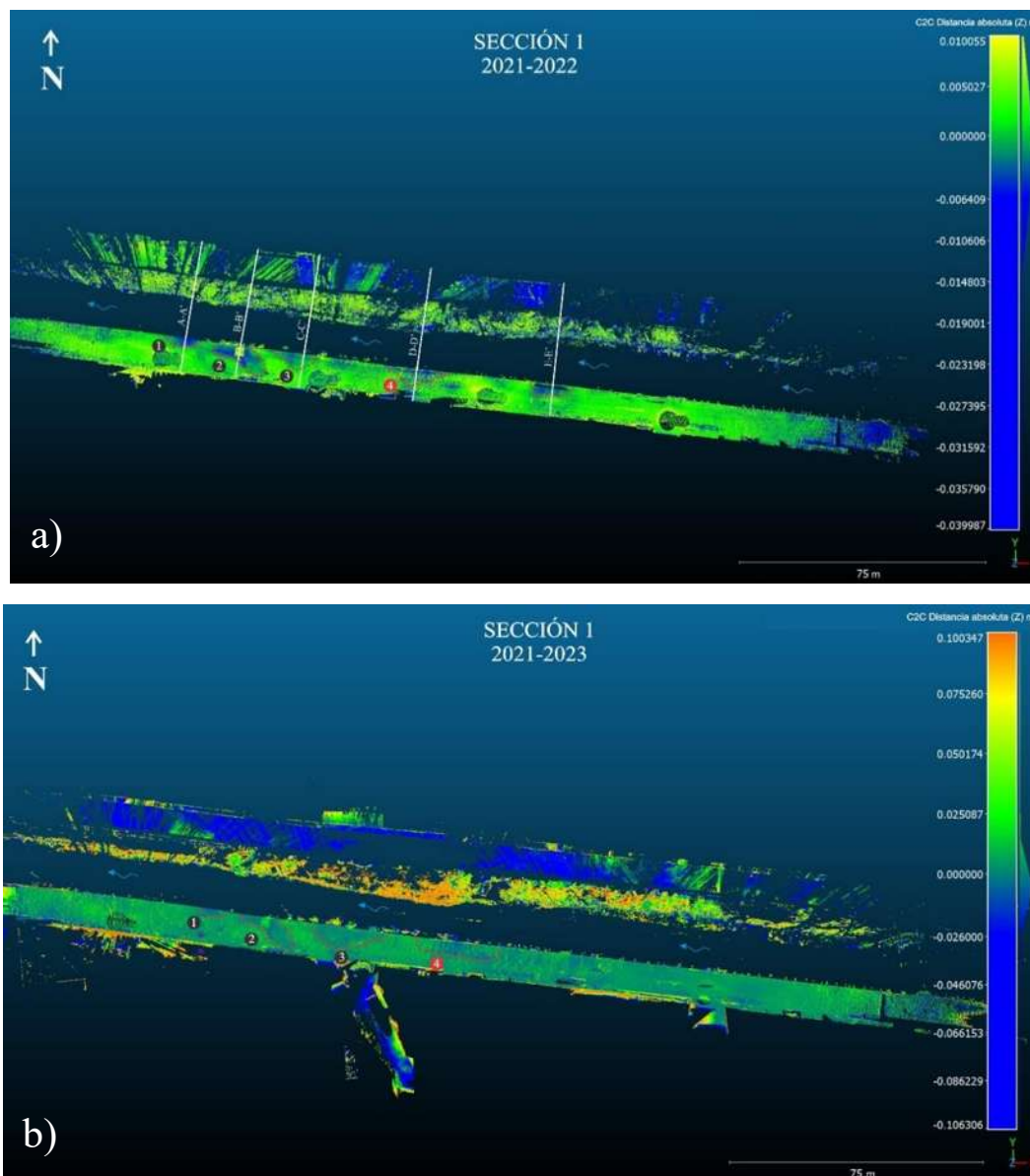


Figura 47. Sección 1. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.

A partir del análisis de la comparación de nubes por el método C2C, se obtuvieron los siguientes resultados de la sección 1:

- La comparación entre los años 2021 y 2022, a partir del método C2C, dio como resultado cinco zonas de mayor desplazamiento ubicadas en las cercanías del talud del Río Chiquito, estos desplazamientos van de los -0.006m hasta -0.039 m.
- La comparación de nubes de los años 2021 y 2023, indican las mismas zonas obtenidas en la comparación de los años 2021-2022, teniendo un crecimiento considerable la zona 3 y 4. Los desplazamientos obtenidos en esta comparación van de -0.026 m hasta -0.106 m, teniendo un aumento en comparación al primer análisis.

Para un análisis más detallado de estos desplazamientos se realizaron cinco perfiles, los cuales se describen a continuación:

- Perfil A-A'.** Este perfil corresponde a la zona 1, con una altura máxima de 1891 m.s.n.m. y una mínima de 1886 m.s.n.m. teniendo un desnivel de 0.50 m. en su parte sur. Se realizó la comparación de los monitoreos 2021, 2022 y 2023, donde se observa un ligero desplazamiento de 2021 a 2023, el cual corresponde a la zona de desplazamiento que se localiza en la proximidad del talud al río, teniendo una longitud aproximada de 2.34 m y un desnivel de 0.21 m.

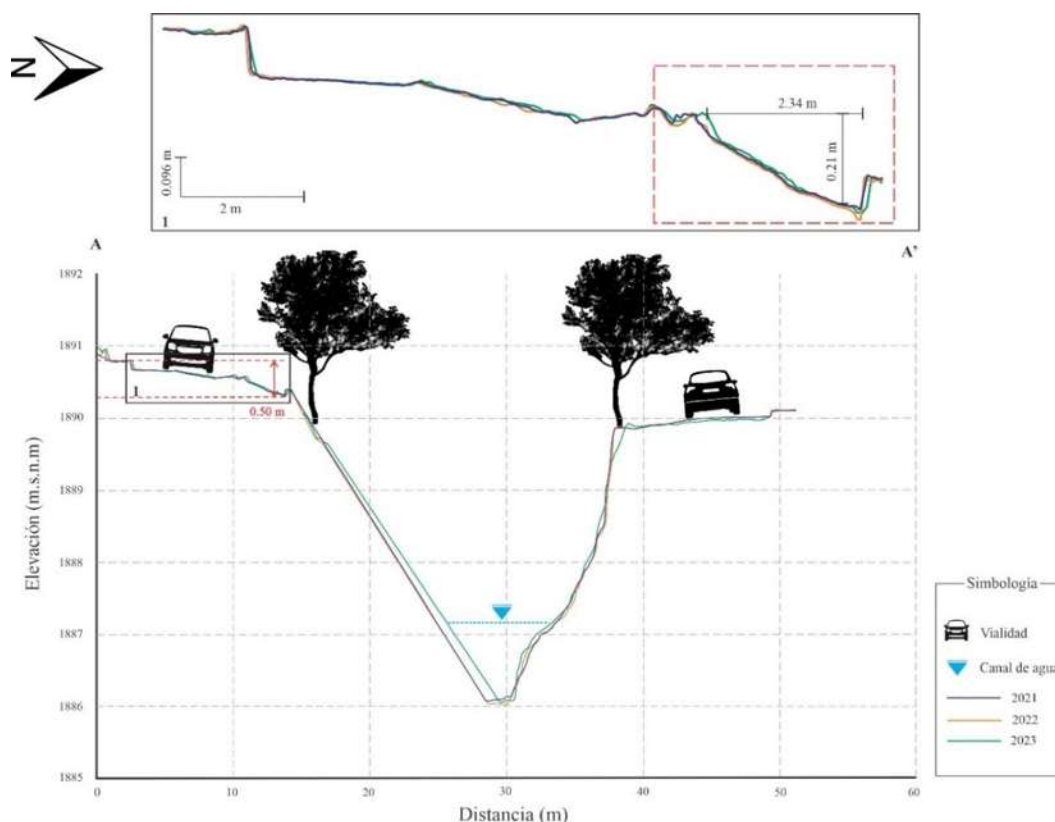


Figura 48. Perfil topográfico A-A', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

- 2) **Perfil B-B'**. Este perfil corresponde a la zona 2, con una altura máxima de 1890.7 m.s.n.m y una mínima de 1886.3 m.s.n.m., teniendo un desnivel en su parte sur de 0.33 m. Se observa una desplazamiento en la vertical (hundimiento), con una longitud aproximada de 4.5 m, el cual no ha presentado un incremento en los tres monitoreos, por lo cual se pueden inferir una estabilidad aparente de la vialidad.

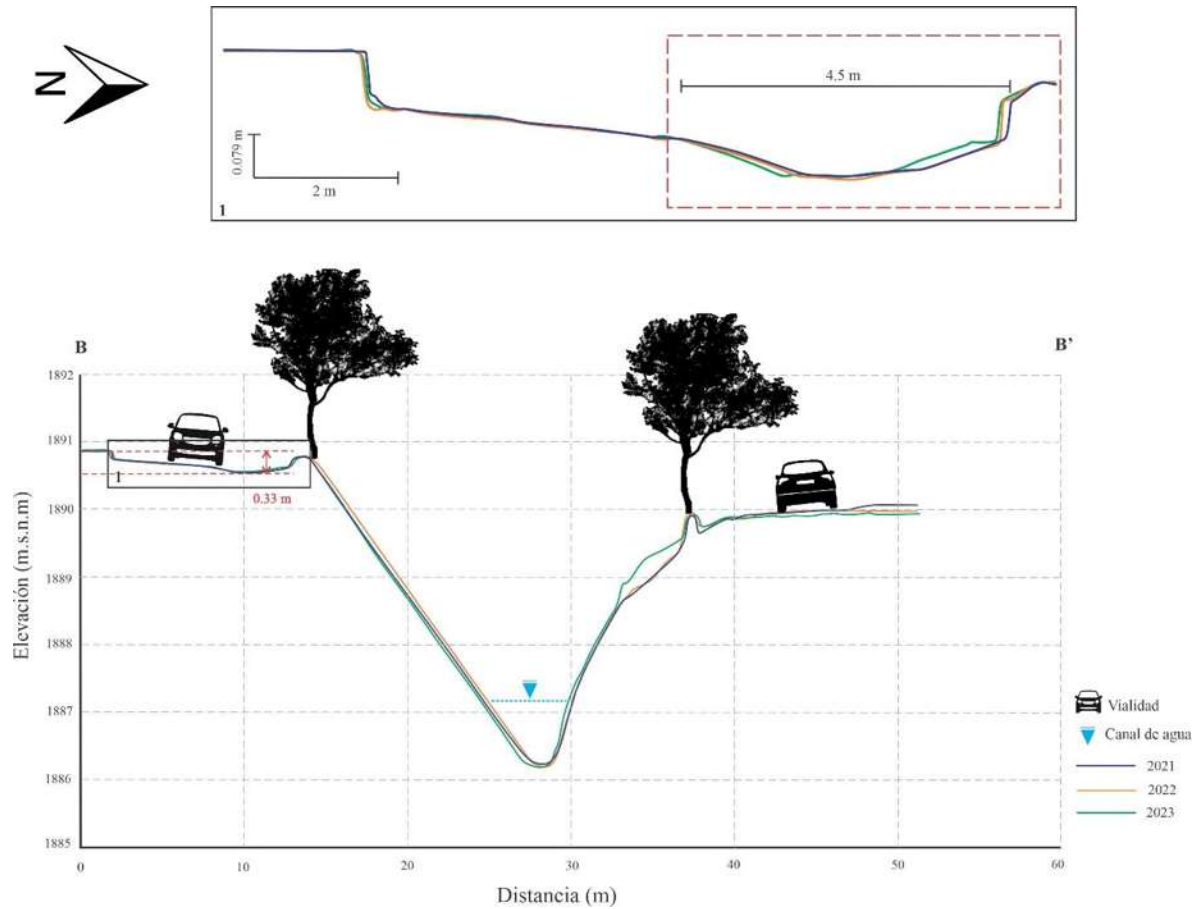


Figura 49. Perfil topográfico B-B', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

- 3) **Perfil C-C'**. Este perfil corresponde a la zona 3, con una altura máxima de 1890.8 m.s.n.m y una mínima de 1886.5 m.s.n.m., el cual presenta un desnivel de 0.24 m. Este presenta una mínima deformación en comparación con los perfiles de la zona 1 y 2. Se observa un desplazamiento significativo en las guarniciones de la vialidad, en dirección al talud.

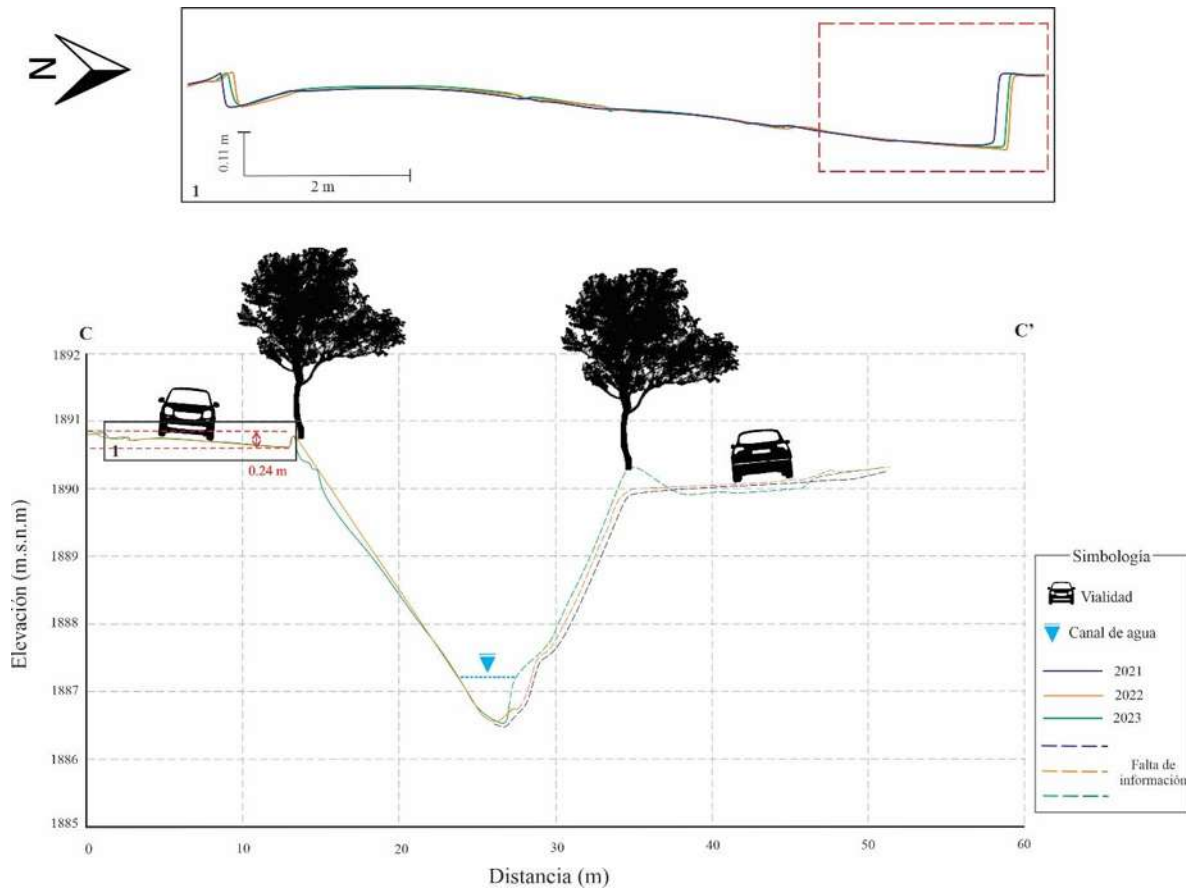


Figura 50. Perfil topográfico C-C', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

- 4) **Perfil D-D'**. Perfil que corresponde a la zona 4, con una altura máxima de 1891 m.s.n.m y una mínima de 1886.6 m.s.n.m., con un desnivel de 0.23. En comparación a los perfiles de la zona 1, 2 y 3., no se observa un desplazamiento de las guarniciones.

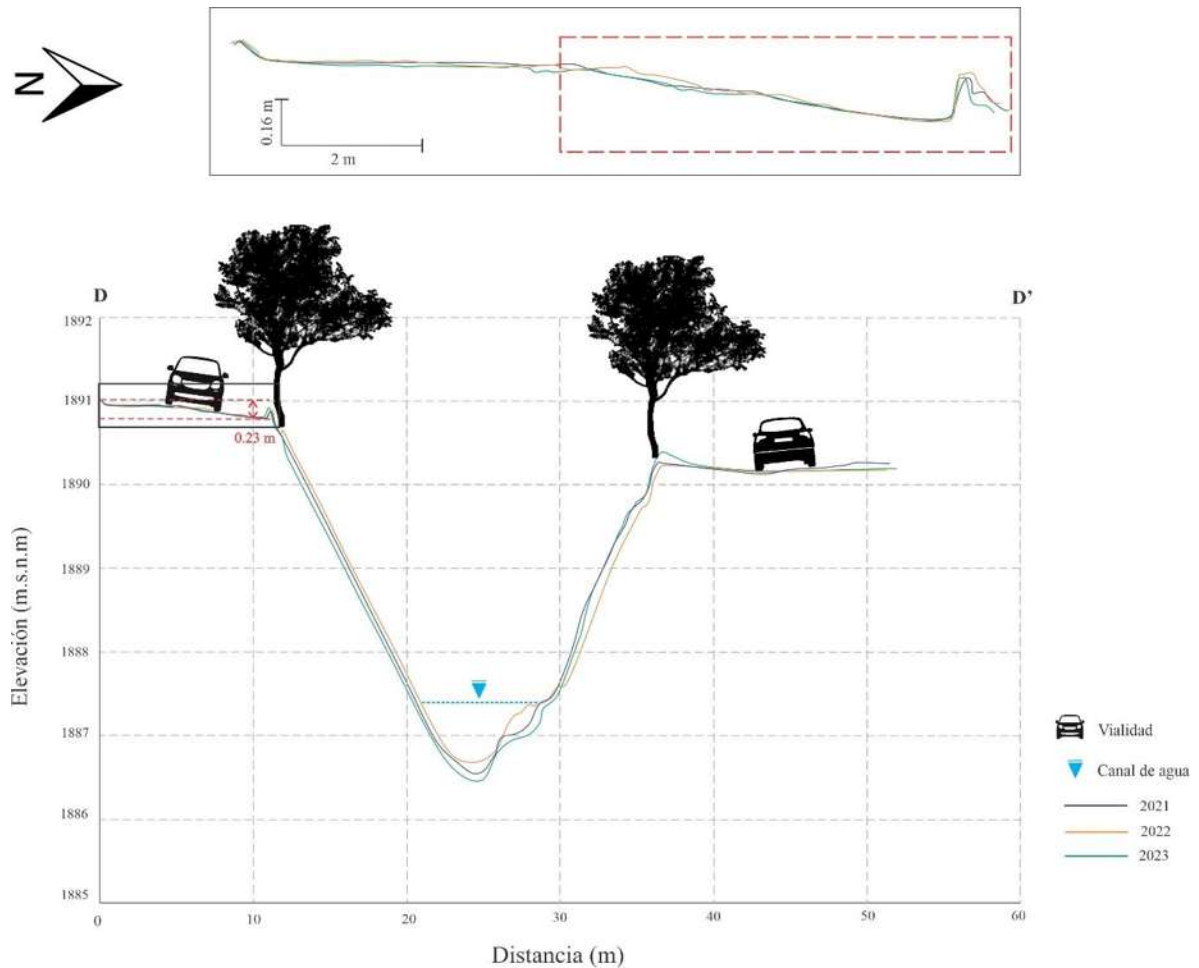


Figura 51. Perfil topográfico D-D', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

- 5) **Perfil E-E'**. Este perfil corresponde a la zona 5 , sección 1, con una altura máxima de 1891. 4 y una mínima de 1886. 5 m.s.n.m, con un desnivel de 0.26 m. En este perfil se observa un hundimiento de aproximadamente 4.07 m de longitud, ubicado en la proximidad de las guarniciones de la vialidad.

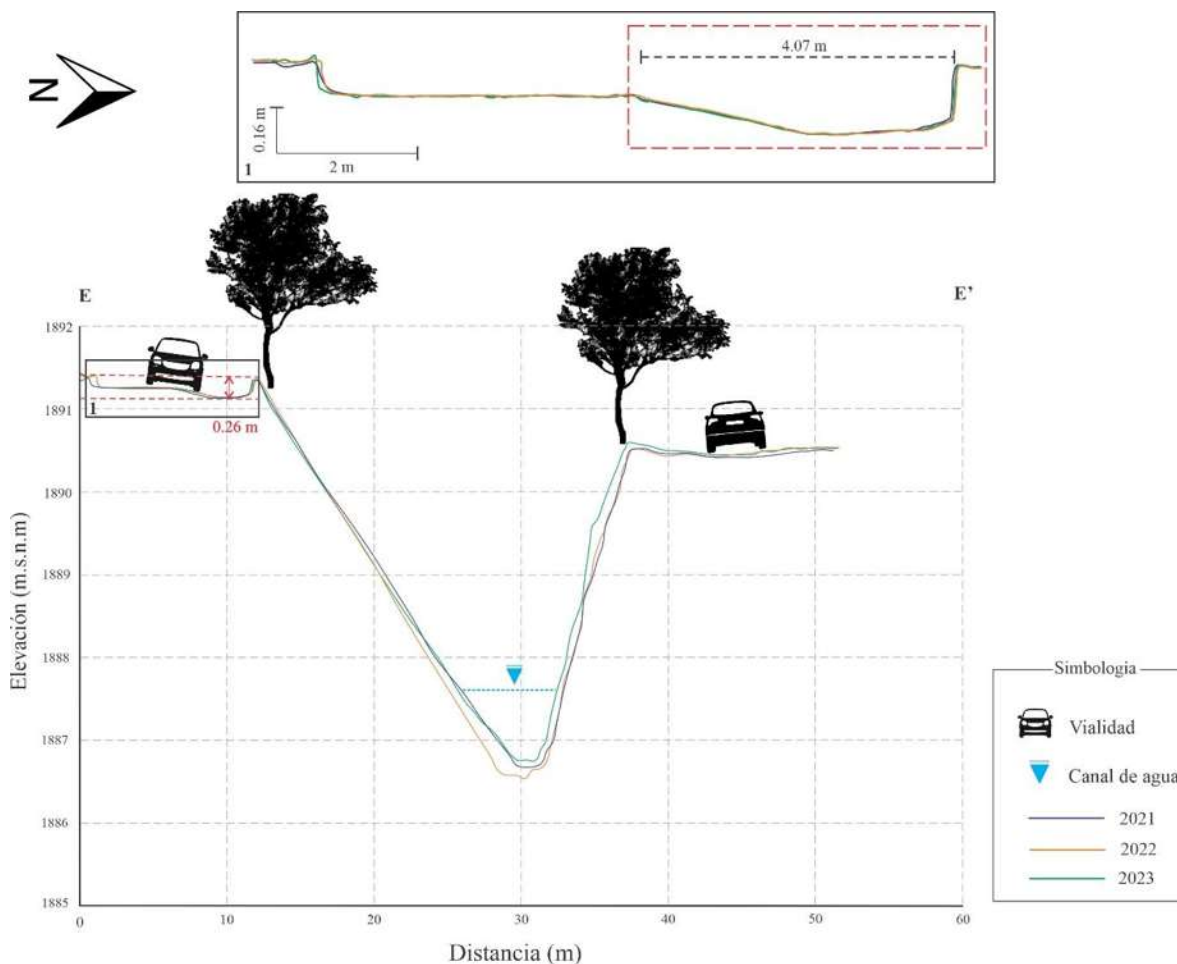


Figura 52. Perfil topográfico E-E', sección 1 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos

6.6.2 Sección 2

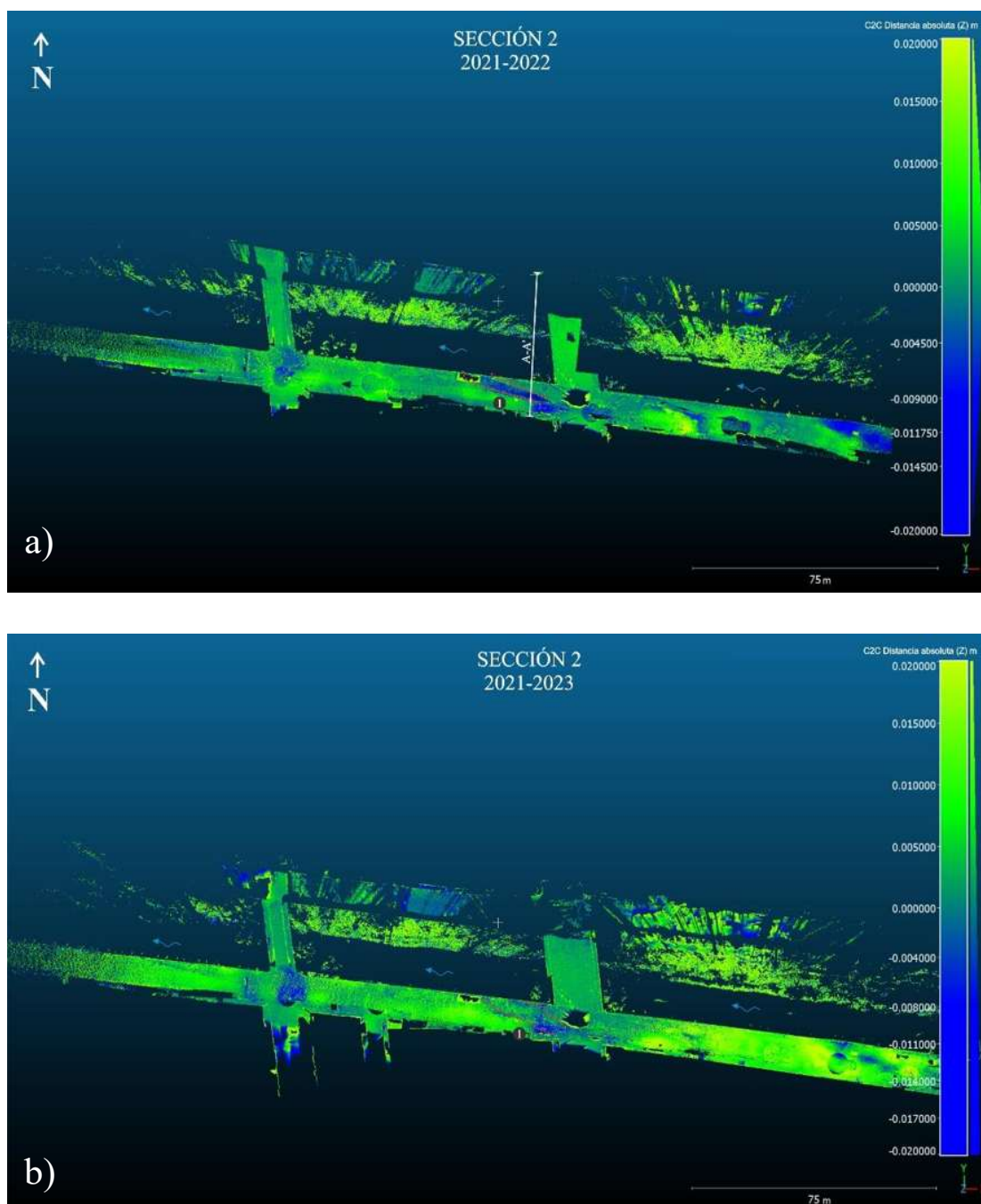


Figura 53. Sección 2. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.

A partir del análisis de la comparación de nubes por el método C2C, se obtuvieron los siguientes resultados de la sección 2:

- La comparación entre los años 2021 y 2022, a partir del método C2C, dio como resultado una zona de mayor desplazamiento, la cual se concentra en la parte media de la vialidad expandiéndose hacia las guarniciones cercanas al talud del río, con una longitud aproximada de 28 m, estos desplazamientos van de los -0.004m hasta -0.020 m.
- La comparación de nubes de los años 2021 y 2023 muestra las mismas zonas que se localizaron en la comparación de los años 2021 y 2022, mostrando una estabilidad aparente, teniendo desplazamientos de 0.004m hasta -0.020 m.

Para un análisis más detallado de este desplazamiento, se realizó un perfil topográfico, el cual se describe a continuación:

- Perfil A-A'.** Perfil que corresponde a la zona 1 de la sección 2, con una altura máxima de 1892.3 m.s.n.m y una mínima de 1887.2 m.s.n.m, con un desnivel de 0.69 m. Se observa una inclinación de la vialidad hacia el sur, con un desplazamiento apreciable en las guarniciones de la vialidad.

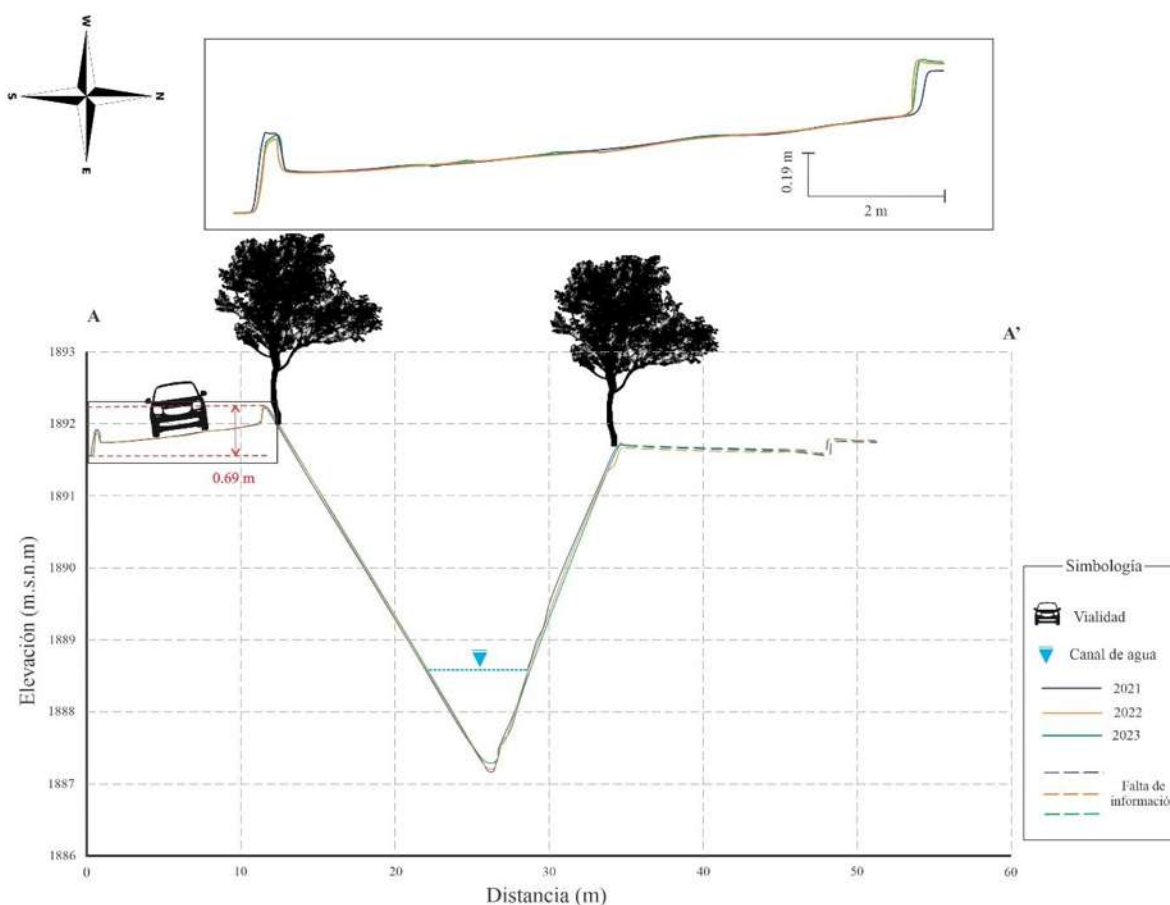


Figura 54. Perfil topográfico A-A', sección 2 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

6.6.3 Sección 3

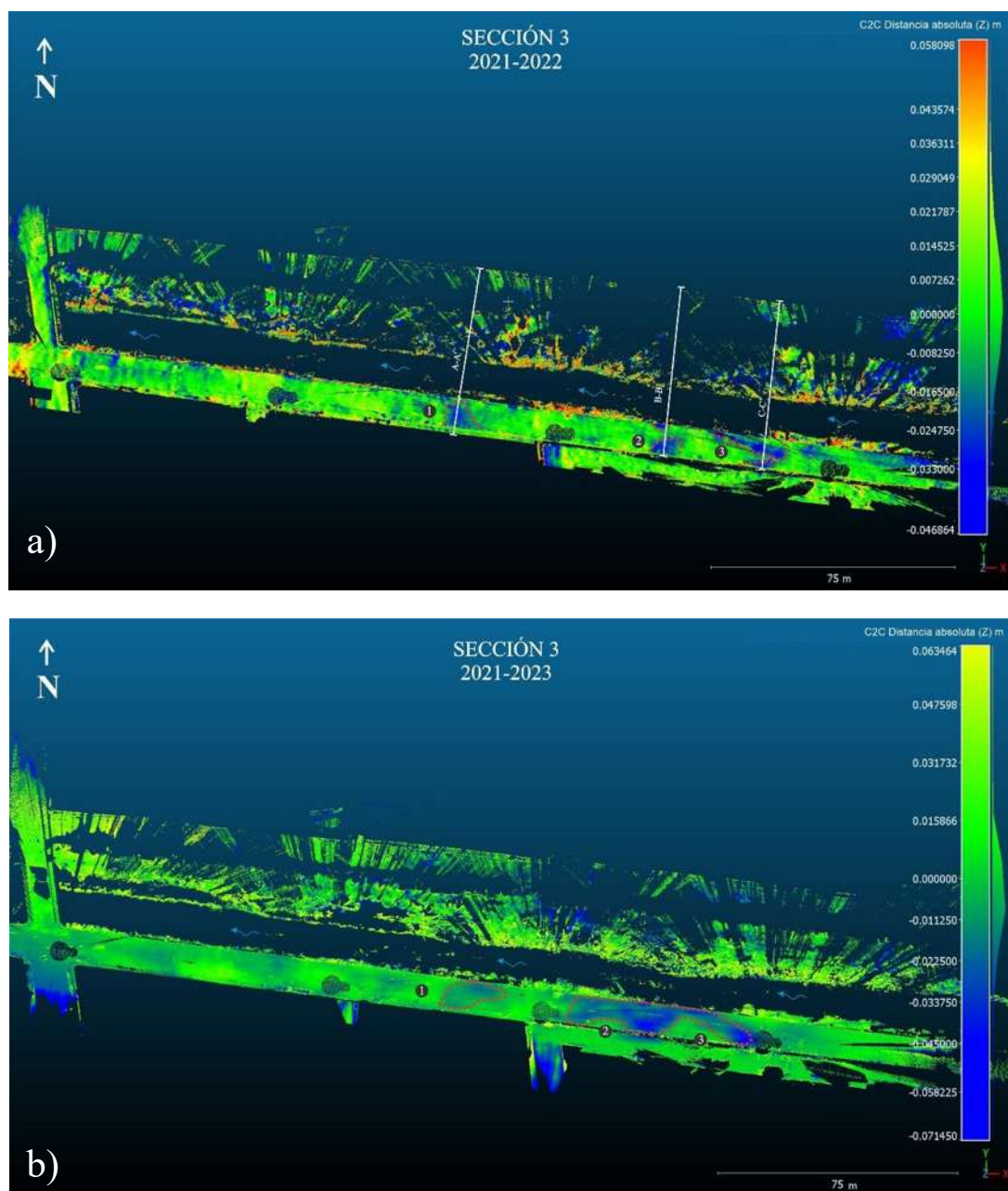


Figura 55. Sección 3. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.

A partir del análisis de la comparación de nubes por el método C2C, se obtuvieron los siguientes resultados de la sección 3:

- a) La comparación entre los años 2021 y 2022, a partir del método C2C, dio como resultado tres zonas de mayor desplazamiento. La zona 1 se extiende de extremo a extremo de la vialidad, la zona 2 se presenta en una parte cercana al talud y la otra cerca de la acera, la zona 3 se extiende desde las guarniciones cercanas al talud hasta el centro de la vialidad, con una longitud aproximada de 27m. Estas zonas presentan desplazamientos de -0.024 m hasta -0.046 m.
- b) La comparación de nubes de los años 2021 y 2023 muestra una expansión de la zona 1. Mientras que las zonas 2 y 3, muestran un aumento considerable en comparación al primer análisis, con una longitud aproximada de 61.5 m. Las zonas mostraron un aumento en el desplazamiento de -0.025 m hasta -0.071 m.

Para un análisis más detallado de este desplazamiento, se realizaron tres perfiles topográficos, los cuales se describen a continuación:

- 1) **Perfil A-A'.** Este perfil corresponde a la zona 1 de la sección 3, con una elevación máxima de 1891.8 m.s.n.m y una mínima de 1888.6, con un desnivel de 0.25 m. Se observa un desplazamiento considerable en la vertical, que corresponde a los datos obtenidos en el análisis de desplazamiento en C2C, y en la horizontal, siendo apreciable en las guarniciones de la vialidad.

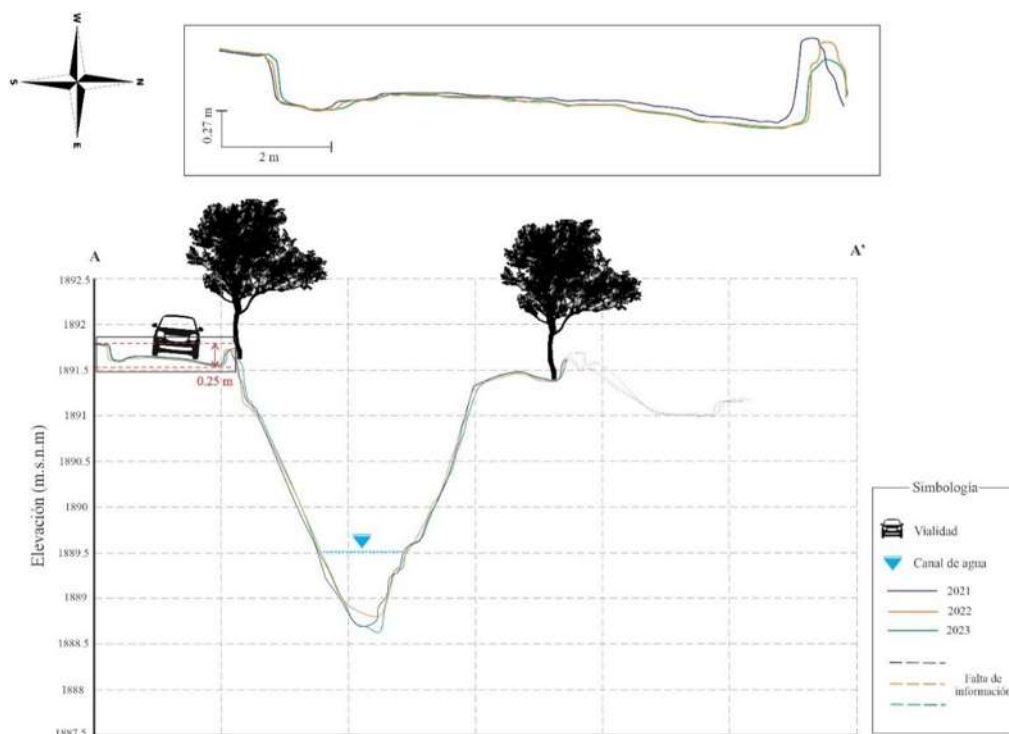


Figura 56. Perfil topográfico A-A', sección 3 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

- 2) **Perfil B-B'**. Este perfil corresponde a la zona 2 de la sección 3, con una elevación máxima de 1891.8 m.s.n.m y una mínima de 1888.4, con un desnivel de 0.48 m. Se observa un desplazamiento considerable en la vertical, que corresponde a los datos obtenidos en el análisis de desplazamiento en C2C, y en la horizontal, siendo apreciable en las guarniciones de la vialidad, con dirección al talud del río.

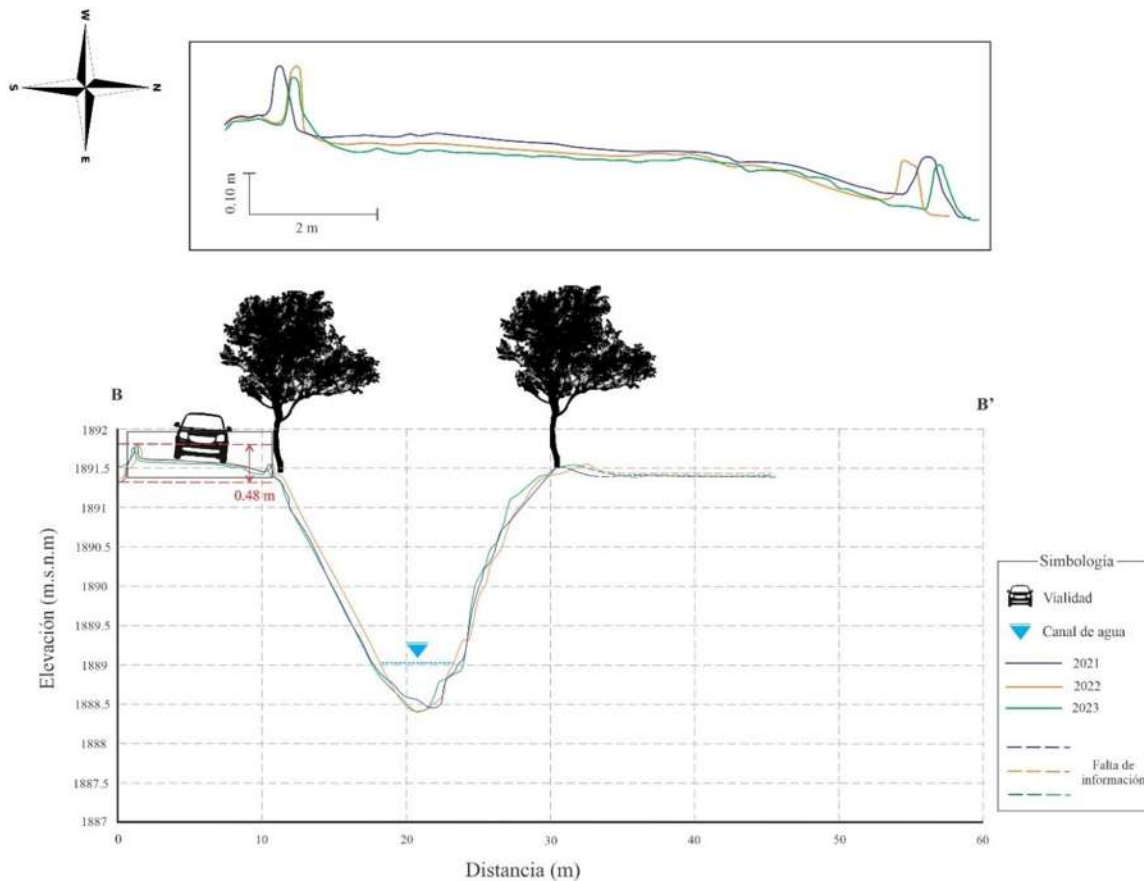


Figura 57. Perfil topográfico B-B', sección 3 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

- 3) **Perfil C-C'**. Este perfil corresponde a la zona 3 de la sección 3, con una elevación máxima de 1891.9 m.s.n.m y una mínima de 1888.5, con un desnivel de 0.47 m. Se observa desplazamientos considerables en la vertical como en la horizontal, siendo apreciable en las guarniciones de la vialidad, con dirección al centro de la vialidad, provocando una deformación considerable en esta.

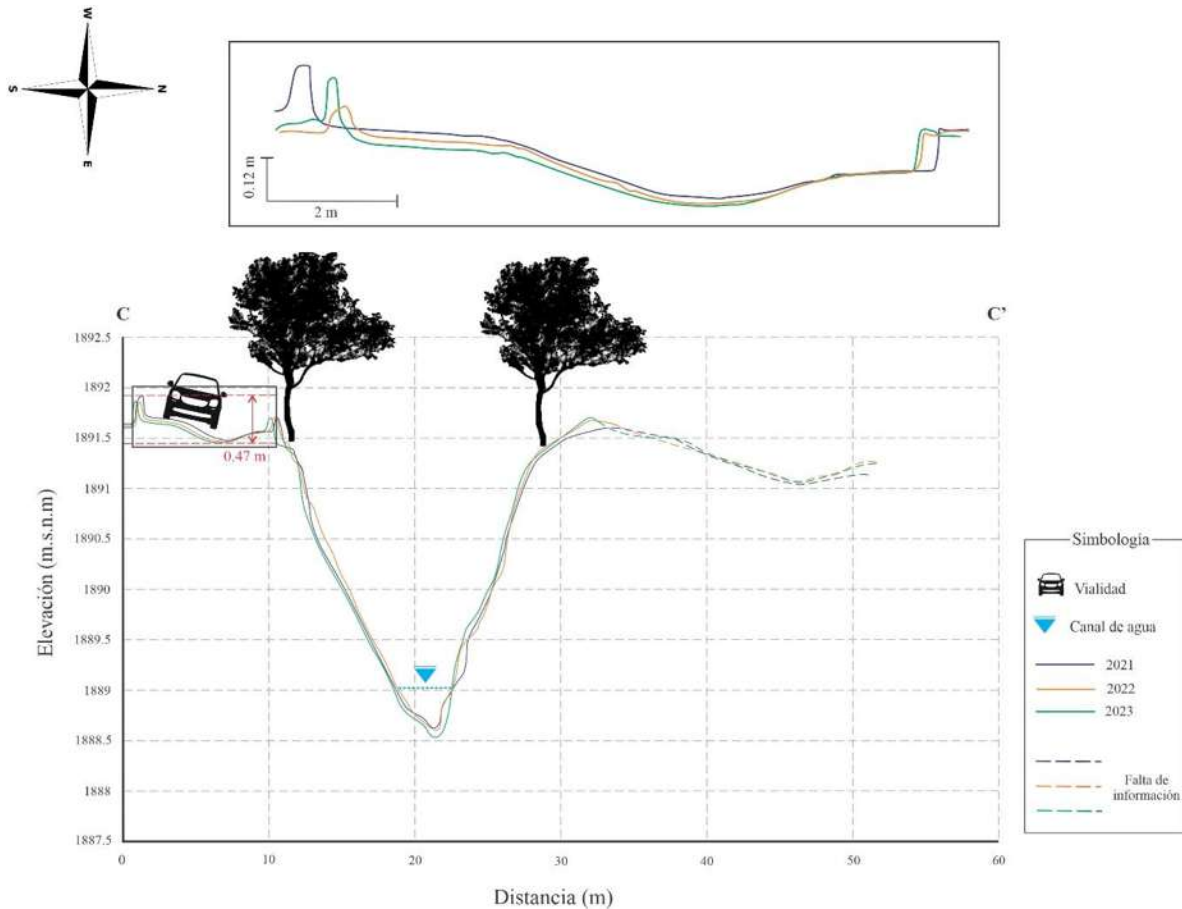


Figura 58. Perfil topográfico C-C', sección 3 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

6.6.4 Sección 4

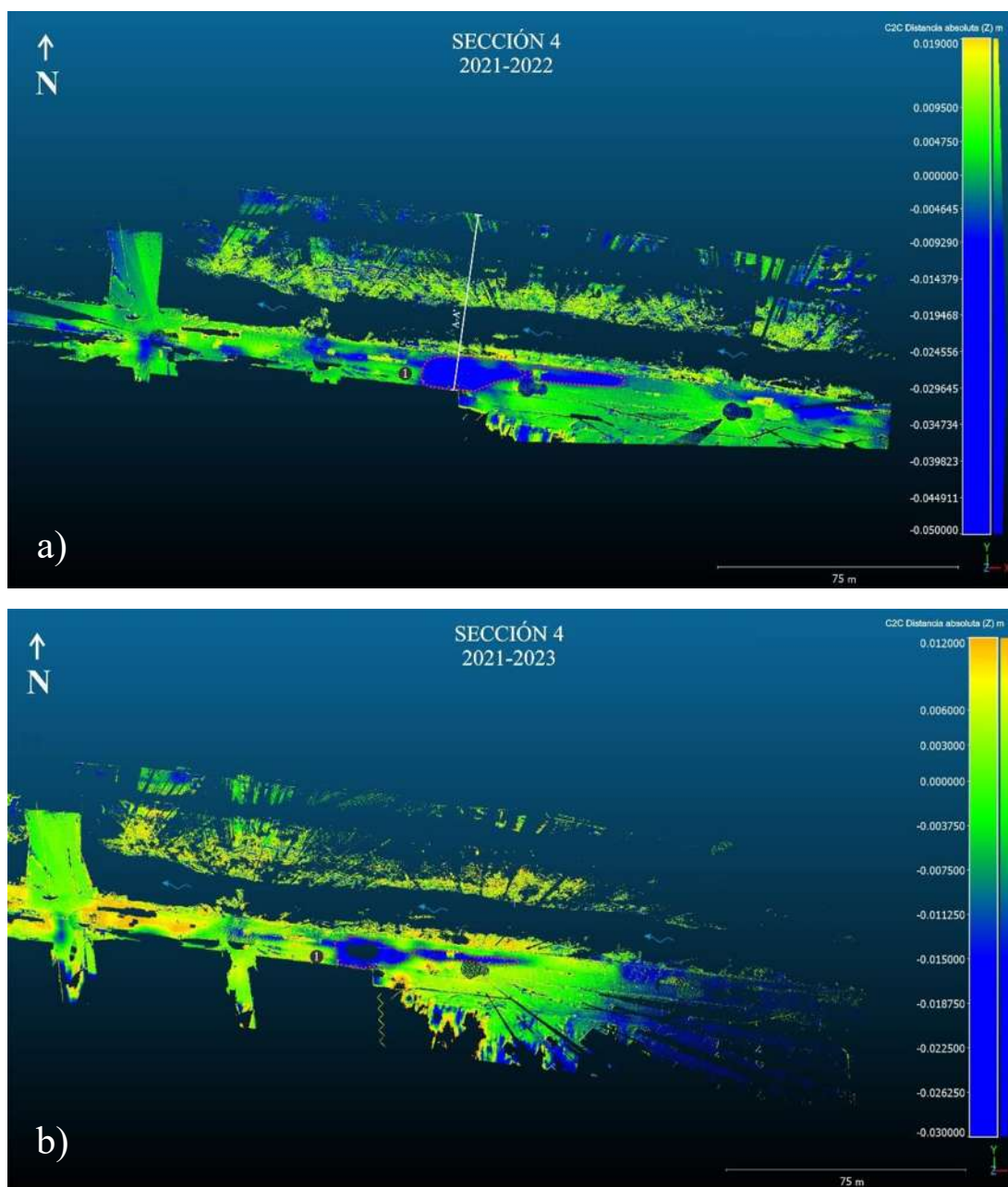


Figura 59. Sección 4. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.

A partir del análisis de la comparación de nubes por el método C2C, se obtuvieron los siguientes resultados de la sección 4:

- La comparación entre los años 2021 y 2022, a partir del método C2C, dio como resultado una zona de mayor desplazamiento, con una longitud aproximada de 64.5 m y 12 m en su parte más ancha. Esta zona presenta desplazamientos de -0.004 m hasta -0.050 m.
- La comparación de nubes de los años 2021 y 2023 muestra la misma zona, que se obtuvo de la comparación entre los años 2021-2022, su desplazamiento presenta un aumento con valores de -0.011 m hasta -0.030 m.

Para un análisis más detallado de este desplazamiento, se realizó un perfil topográfico, el cual se describe a continuación:

- Perfil A-A'. Este perfil corresponde a la zona 1 de la sección 4. Con una altura máxima de 1891.6 m y una mínima de 1890.9 m, con un desnivel de 0.63 m. En este perfil se observa un desplazamiento en la vertical, en la parte central de la vialidad, el cual corresponde a los datos obtenidos en el análisis de C2C 2021-2023.

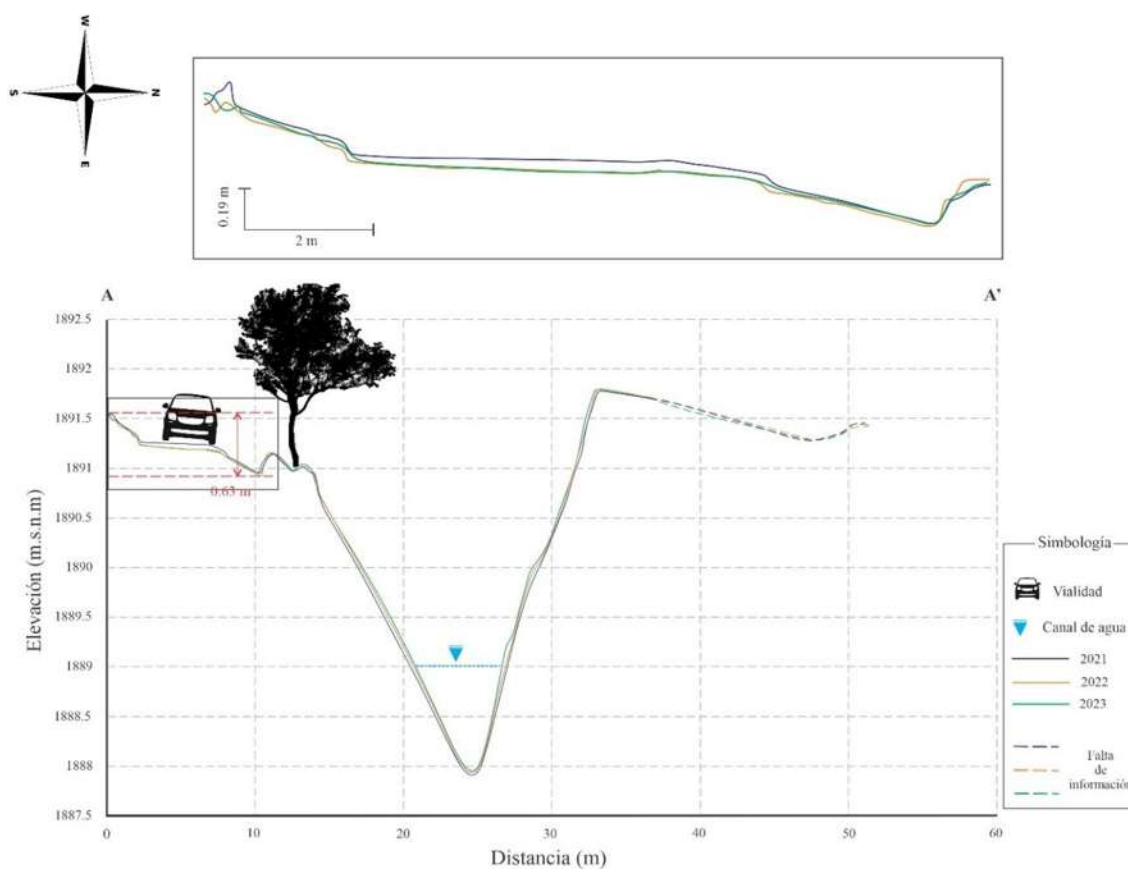


Figura 60. Perfil topográfico A-A', sección 4 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

6.6.5 Sección 5

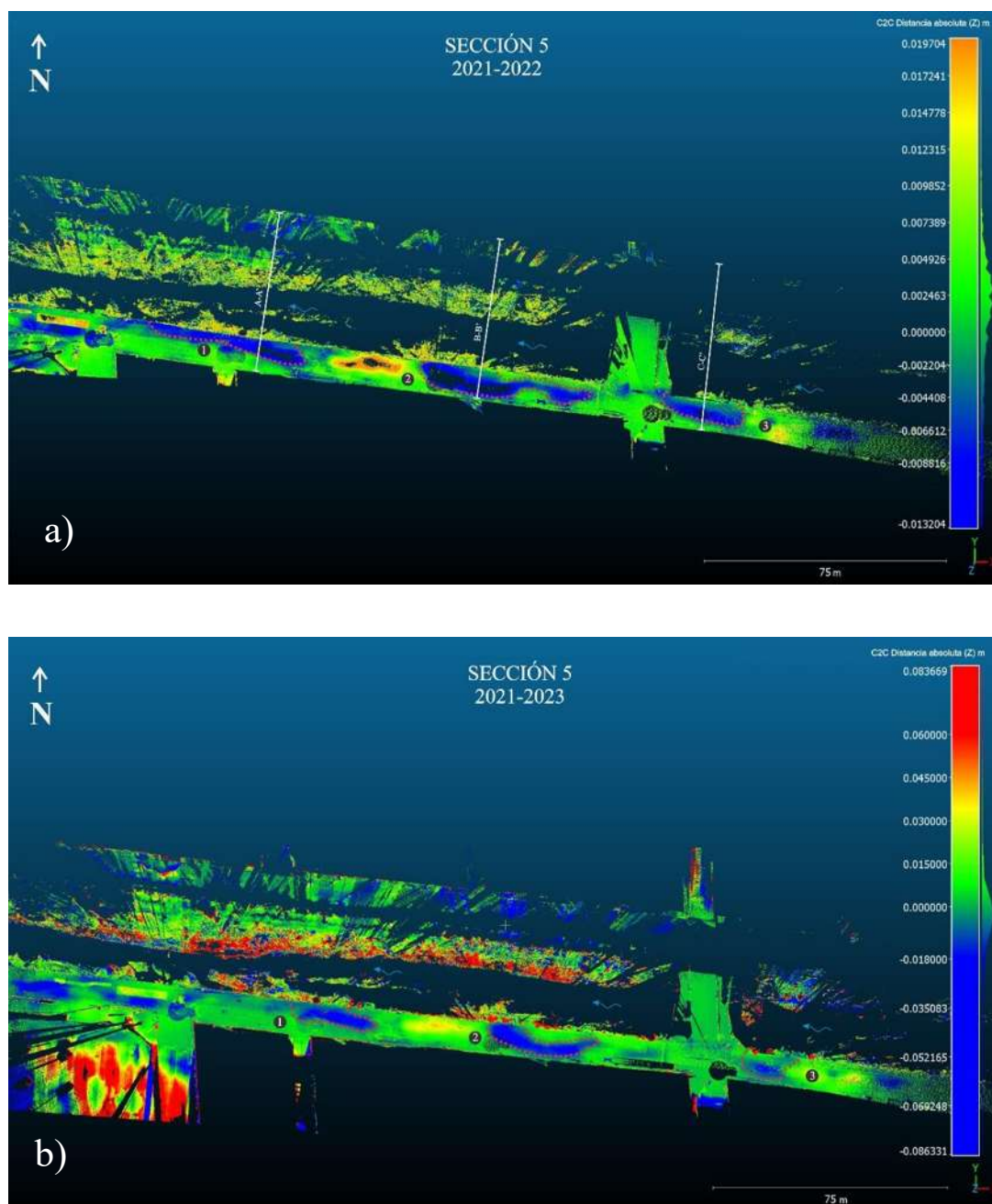


Figura 61. Sección 5. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.

A partir del análisis de la comparación de nubes por el método C2C, se obtuvieron los siguientes resultados de la sección 5:

- La comparación entre los años 2021 y 2022, a partir del método C2C, dio como resultado tres zonas de mayor desplazamiento. La zona 1, con una longitud aproximada de 60 m y un ancho de 6 m. La zona 2, con una longitud aproximada de 55 m y 7 m de ancho. La zona 3, con una longitud aproximada de 26 m y un ancho de 5.7 m. Estas dos zonas están ubicadas en las cercanías del talud, extendiéndose hacia el centro de la vialidad, teniendo desplazamientos de -0.004 m hasta -0.013 m.
- La comparación de nubes de los años 2021 y 2023 muestra las mismas zonas, que se obtuvieron de la comparación entre los años 2021-2022, su desplazamiento presenta un aumento con valores de -0.018 m hasta -0.086 m.

Para un análisis más detallado de este desplazamiento, se realizaron dos perfiles topográficos, los cuales se describen a continuación:

- Perfil A-A'.** Este perfil corresponde a la zona 1, sección 5, con una altura máxima de 1891.4 m.s.n.m. y una mínima de 1887.7 m.s.n.m., con un desnivel de 0.32. Se observa un desplazamiento muy marcado para el año 2023, en las guarniciones de la vialidad.

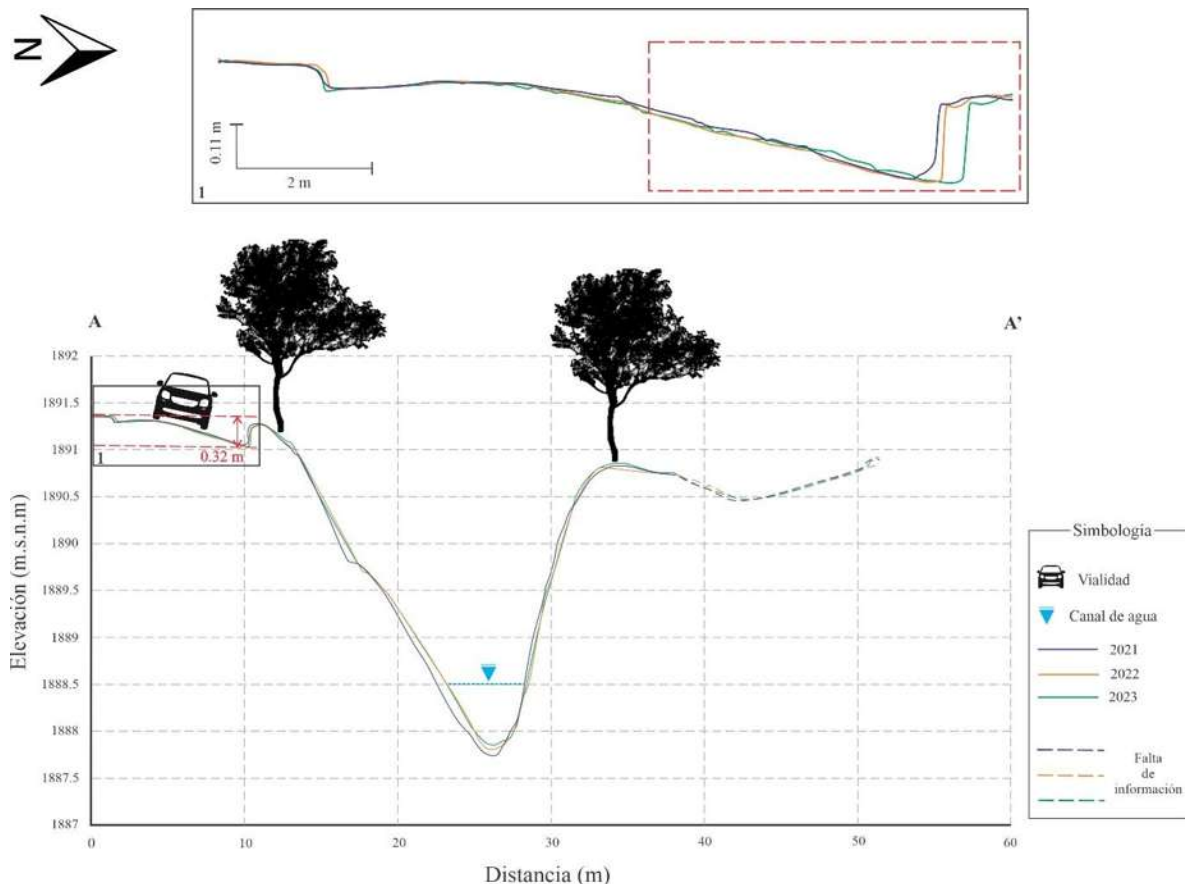


Figura 62. Perfil topográfico A-A', sección 5 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

- 2) **Perfil B-B'**. Perfil que corresponde a la zona 2, sección 5, con una altura máxima de 1891.5 y una mínima de 1888.3 m.s.n.m., con un desnivel de 0.52. En este perfil se observa desplazamientos evidentes en las guarniciones de la vialidad, además de una ligera inclinación en dirección hacia el talud del río.

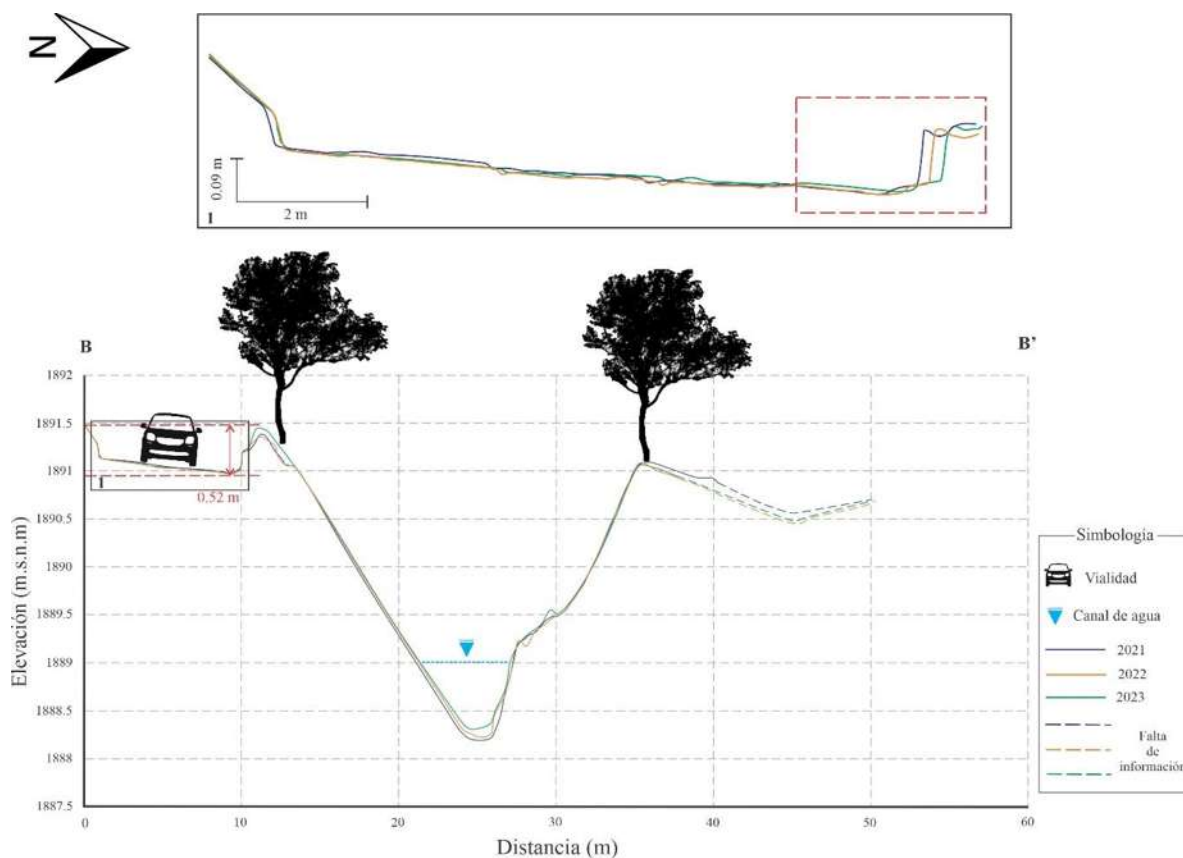


Figura 63. Perfil topográfico B-B', sección 5 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

- 3) **Perfil C-C'**. Este perfil corresponde a la zona 3, sección 5, con una altura máxima de 1891.2 m.s.n.m. y una mínima de 1888.5 m.s.n.m., con un desnivel en su parte sur de 0.23 m. En este perfil se observa un hundimiento en la parte central de la vialidad, al igual que un desplazamiento de aproximadamente 0.86 m de longitud, en dirección al talud del río.

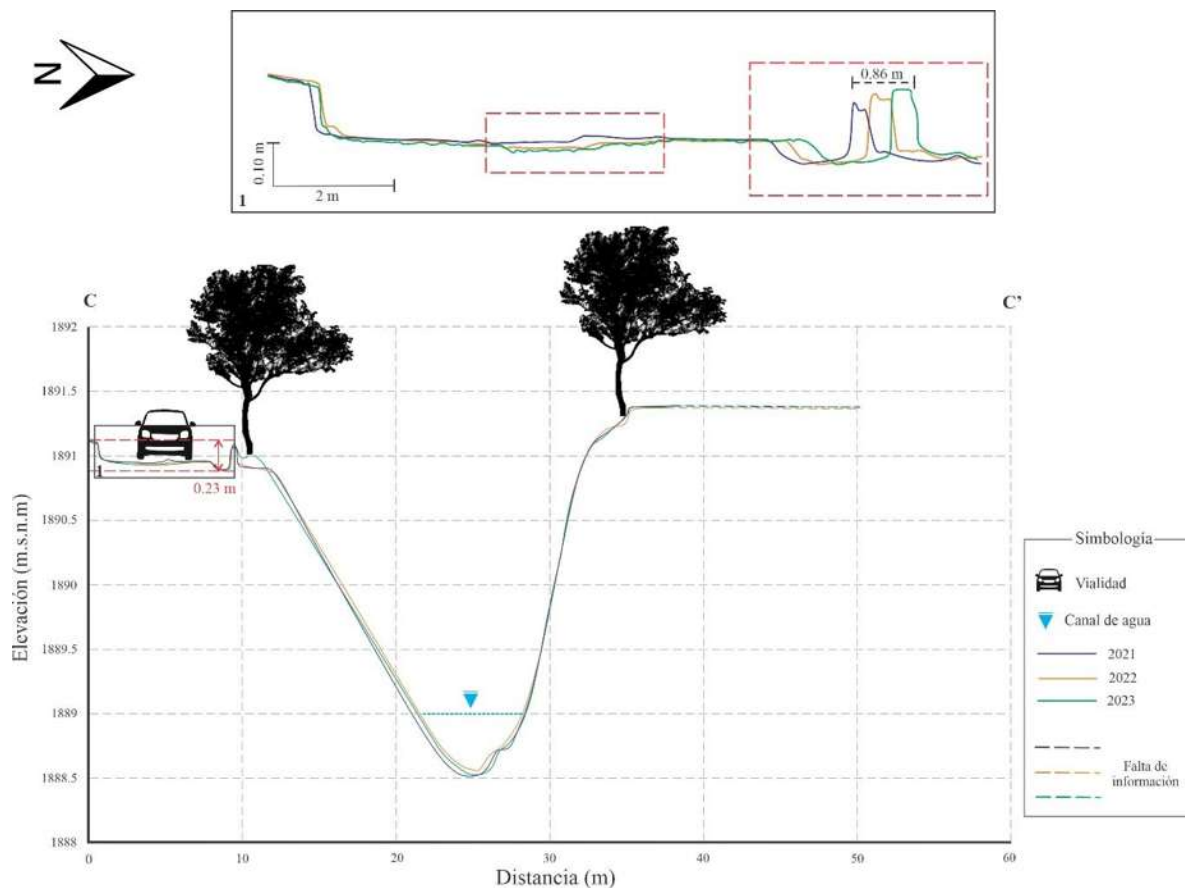


Figura 64. Perfil topográfico C-C', sección 5 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

6.6.6 Sección 6

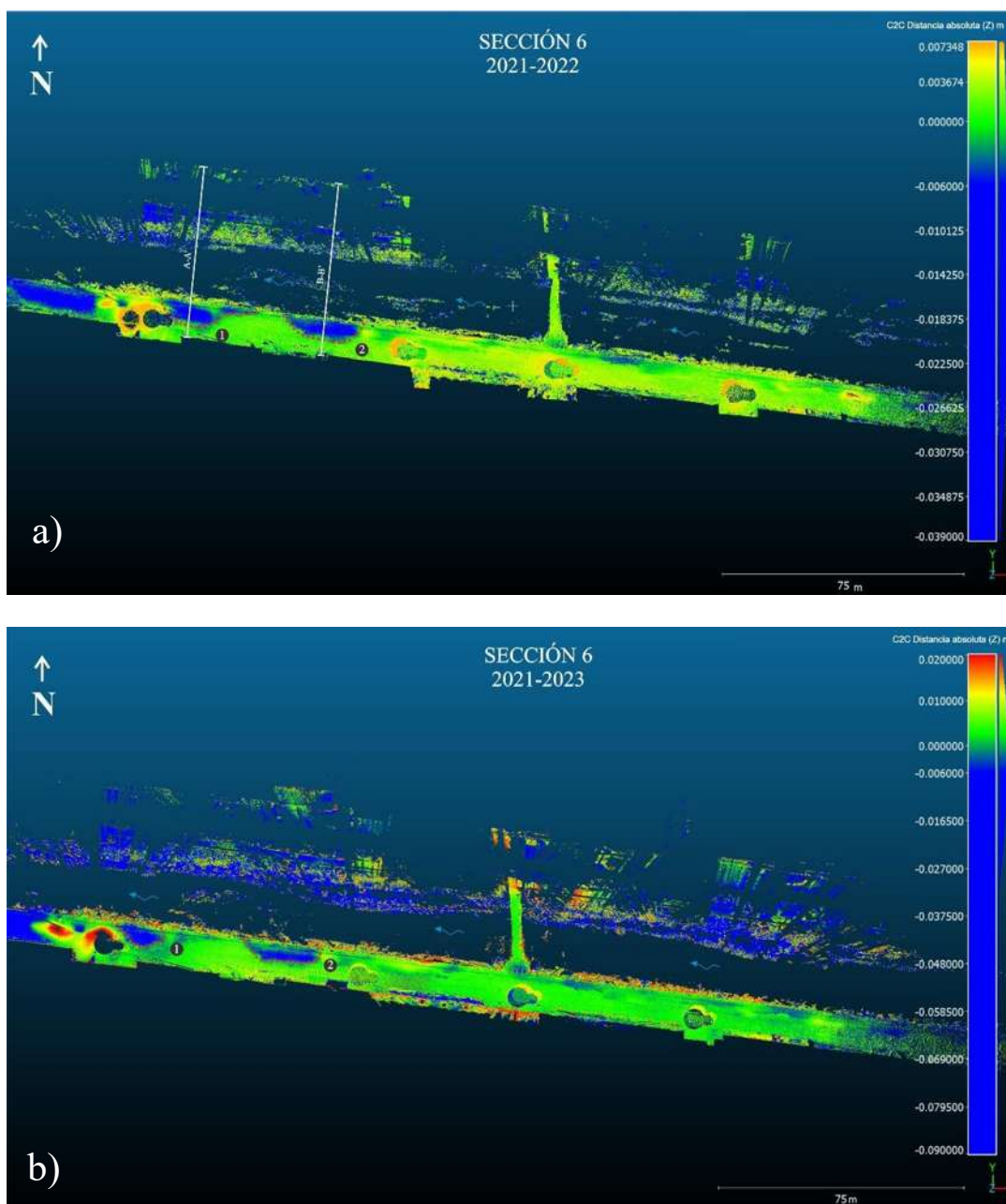


Figura 65. Sección 6. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023.

A partir del análisis de la comparación de nubes por el método C2C, se obtuvieron los siguientes resultados de la sección 6:

- c) La comparación entre los años 2021 y 2022, a partir del método C2C, dio como resultado dos zonas de mayor desplazamiento. La zona 1, con una longitud aproximada de 25 m y un ancho de 6.8 m. La zona 2, con una longitud aproximada de 21 m y 5.9 m de ancho. Estas dos zonas están ubicadas en las cercanías del talud, teniendo desplazamientos de -0.006 m hasta -0.039 m.
- d) La comparación de nubes de los años 2021 y 2023 muestra las mismas zona, que se obtuvieron de la comparación entre los años 2021-2022, su desplazamiento presenta un aumento con valores de -0.006 m hasta -0.09 m.

Para un análisis más detallado de este desplazamiento, se realizaron dos perfiles topográficos, los cuales se describen a continuación:

- 1) **Perfil A-A'.** Este perfil corresponde a la zona 1, sección 6, con una altura máxima de 1890.9 m.s.n.m y una mínima de 1887.6 m.s.n.m, con un desnivel de 0.32 m. Se observa un hundimiento de 1.86 m de longitud y desplazamientos en las guarniciones de la vialidad, en la proximidad del talud.

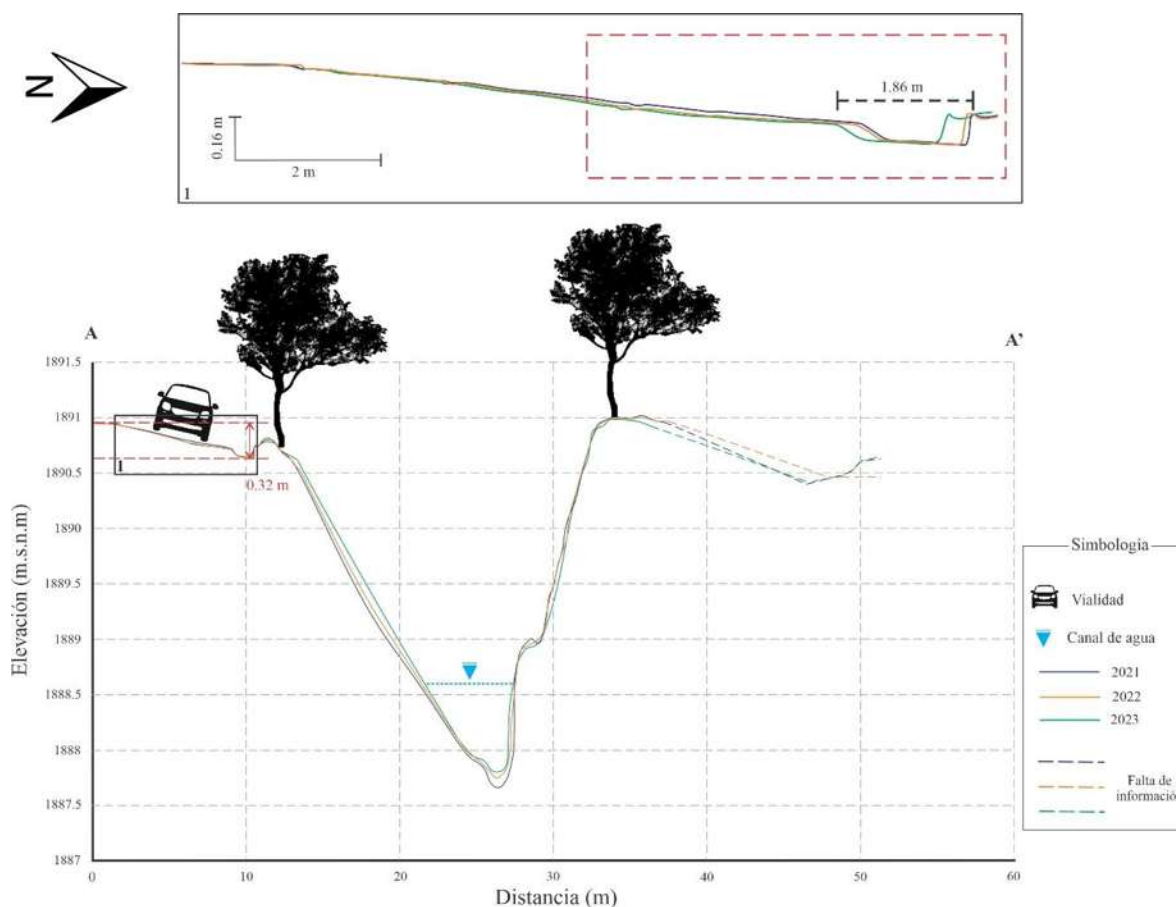


Figura 66. Perfil topográfico A-A', sección 6 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

- 2) **Perfil B-B'**. Este perfil corresponde a la zona 2, sección 6, con una altura máxima de 1890.9 m.s.n.m. y una mínima de 1887.6 m.s.n.m., con un desnivel de 0.45 m. En este perfil se observa un hundimiento de 1.69 m de longitud y desplazamientos en las guarniciones de la vialidad, con proximidad al talud.

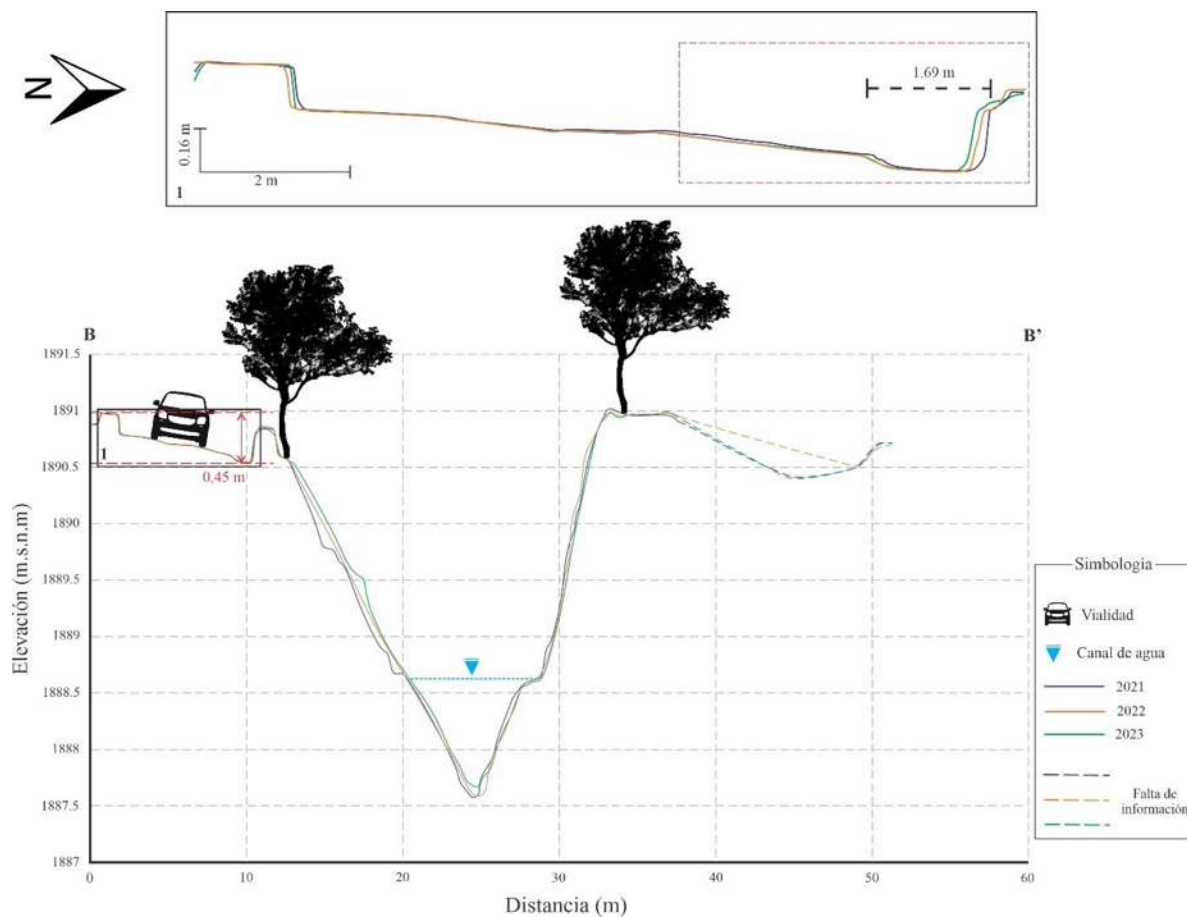


Figura 67. Perfil topográfico B-B', sección 6 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

6.6.7 Sección 7

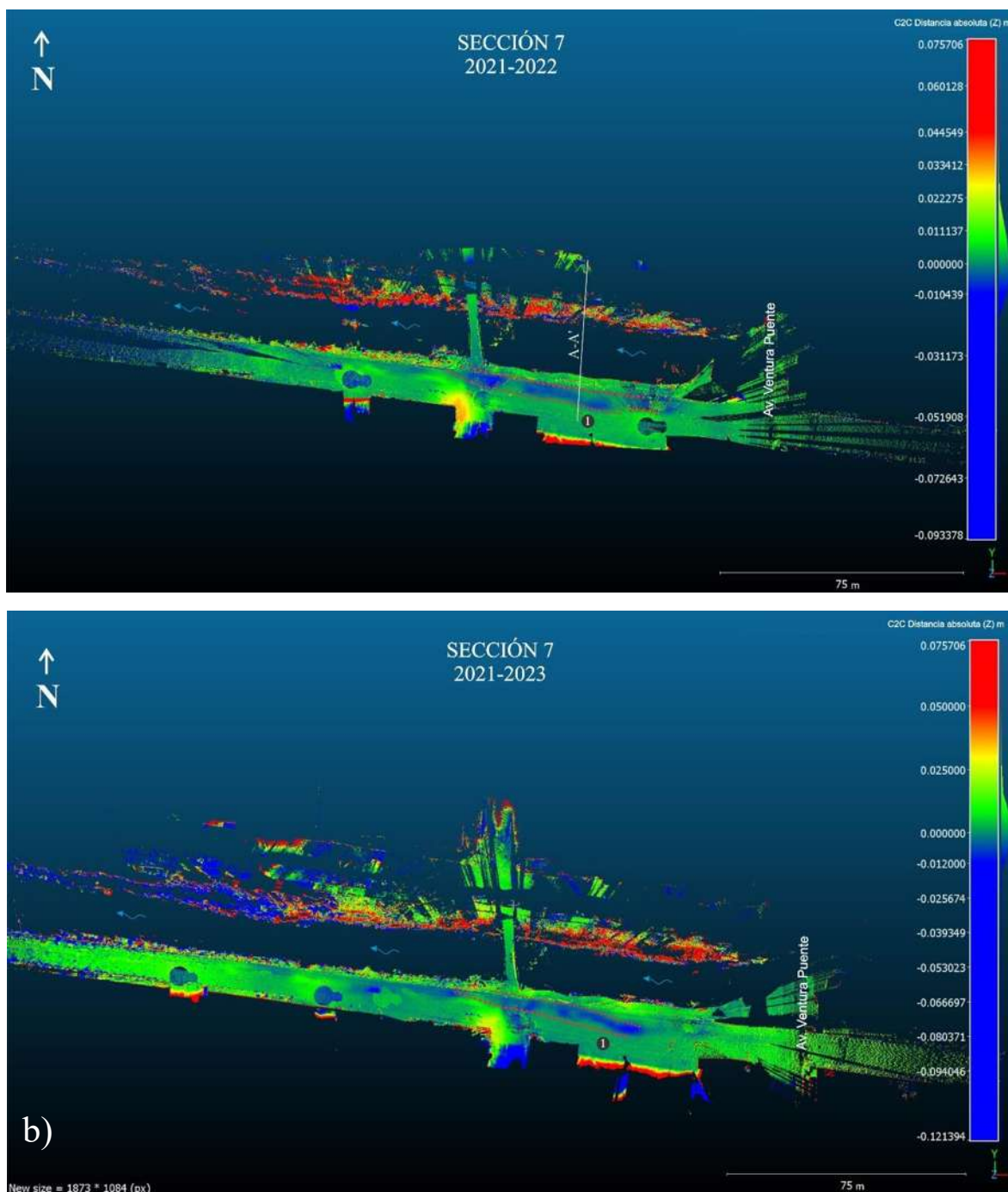


Figura 68. Sección 7. a) Análisis de distancia absoluta en Z a partir del método C2C, entre los años 2021 y 2022. Los colores azules indican un mayor desplazamiento, el color verde las zonas estables. Las líneas blancas indican los perfiles realizados y la línea roja limita las zonas de mayor hundimiento. b) Análisis de distancia absoluta en Z, entre los años 2021 y 2023

A partir del análisis de la comparación de nubes por el método C2C, se obtuvieron los siguientes resultados de la sección 7:

- a) La comparación entre los años 2021 y 2022, a partir del método C2C, dio como resultado una zona de mayor desplazamiento, con una longitud aproximada de 53.2 m. Esta zona presenta desplazamientos de -0.010 m hasta -0.093 m.
- b) La comparación de nubes de los años 2021 y 2023 muestra la misma zona, que se obtuvo de la comparación entre los años 2021-2022, su desplazamiento presenta un aumento con valores de -0.012 m hasta -0.121 m.
- c)

Para un análisis más detallado de este desplazamiento, se realizó un perfil topográfico, el cual se describen a continuación:

Perfil A-A'. Este perfil corresponde a la zona 1, sección 7, con una altura máxima de 1891 m.s.n.m y una mínima de 1888 m.s.n.m. No se observa una alta deformación de la vialidad ni de las guarniciones.

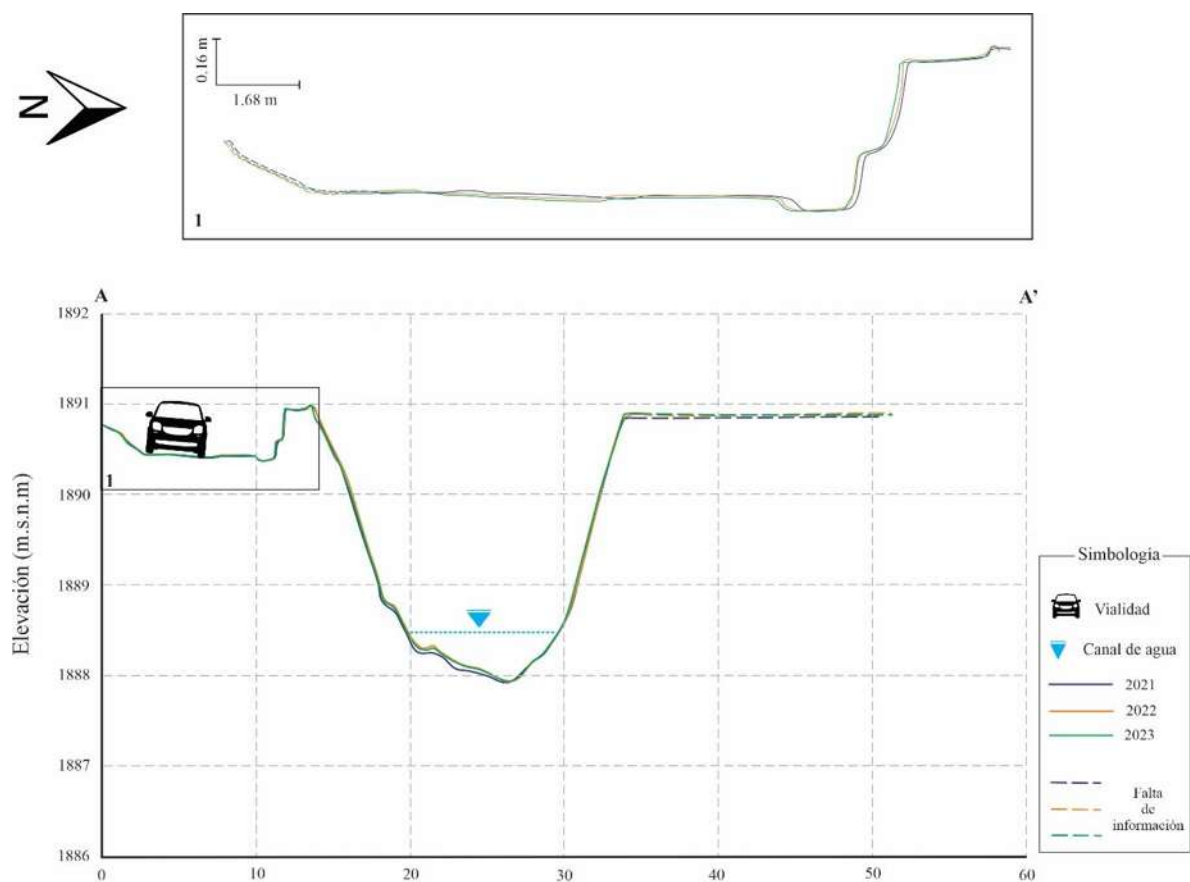


Figura 69. Perfil topográfico A-A', sección 7 a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

Para visualizar y resumir la tasa de desplazamiento de cada sección, se realizó una tabla con los valores máximos y mínimos, así como la comparación de cada temporalidad (*Tabla 7*)

S1			S2		
	2021-2022	2021-2023		2021-2022	2021-2023
mín	-0.0064	-0.026	mín	-0.0045	-0.004
máx	-0.039	-0.106	máx	-0.02	-0.02

S3			S4		
	2021-2022	2021-2023		2021-2022	2021-2023
mín	-0.016	-0.022	mín	-0.0046	-0.011
máx	-0.046	-0.071	máx	-0.05	-0.03

S5			S6		
	2021-2022	2021-2023		2021-2022	2021-2023
mín	-0.0044	-0.018	mín	-0.006	-0.006
máx	-0.013	-0.086	máx	-0.039	-0.09

S7		
	2021-2022	2021-2023
mín	-0.01	-0.012
máx	-0.093	-0.12

Tabla 7. Valores de desplazamiento para cada temporalidad.

7. Análisis y discusión de resultados

Las nubes de puntos obtenidas a partir del monitoreo realizado en el año 2021, permitió obtener un Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolución (0.026 x 0.026 m), dicha resolución está condicionada por la densidad de puntos. El MDT permitió delimitar las características del terreno como, fracturas, cuerpos inestables, escarpes, zonas de hundimiento y abultamiento; lo cual permitió generar un aporte de información al área de estudio.

El uso de esta técnica en comparación a otras (InSAR, GPS), presenta ventajas en la precisión y distribución de los puntos, obteniendo un mayor detalle. En los casos relacionados a zonas de estudio como las de este trabajo, donde la escala es muy pequeña y el ruido externo es muy grande (vegetación e infraestructura), permite obtener un mayor detalle, ya que se obtiene una gran cantidad de información en el orden de millones de puntos. En contraparte, una desventaja de dicha técnica es el tiempo empleado en el procesamiento de los datos.

Con los monitoreos realizados y obtenidos en los años 2022 y 2023, se logró obtener la cinemática de las deformaciones de la vialidad estudiada, a partir de la comparación de nubes de puntos. Desde esta comparación, se discriminó el hundimiento diferencial y su respectiva tasa de velocidad de la carpeta asfáltica, sobre la zona sur de la Av. Solidaridad.

Para la sección 1, los datos obtenidos a partir de la comparación de nubes muestran un aumento en el rango de desplazamiento, para la temporalidad 2021-2022 se obtuvo -0.0064 a $-0.039 \text{ m} \pm 4.3 \text{ mm}$, mientras que para la temporalidad de 2021-2023 se obtuvo -0.026 a $-0.106 \text{ m} \pm 4.3$. Asimismo, una disminución en la velocidad vertical en la zona 1, 3 y 4 y un aumento en la zona 2 de 0.016 cm/año a 0.180 cm/año , de igual manera se muestra una disminución en la velocidad horizontal en la zona 1, 2 y 3, teniendo un aumento en la zona 4 de 0.12 cm/año a 0.20 cm/año .

La sección 2, presentó una aparente estabilidad, al comparar el rango de hundimiento de 2021-2022 de -0.0045 a -0.02 m con 2021-2023 de -0.004 a $-0.02 \text{ m} \pm 4.3 \text{ mm}$. La velocidad en la horizontal al igual que el desplazamiento, tuvo una disminución de 0.43 cm/año a 0.21

cm/año, mientras que en la velocidad vertical tuvo un aumento de 0.049 cm/año a 0.205 cm/año. Por lo que se infiere que esta zona sigue desplazándose a velocidades muy lentas.

La sección 3, presentó un aumento en el rango de desplazamiento, para 2021-2022 se obtuvo - 0.0016 a -0.046 m $\pm$ 4.3 mm, mientras que para 2021-2023 valores de -0.022 a -0.071 m $\pm$ 4.3 mm, por el contrario, sus velocidades verticales y horizontales mostraron una disminución significativa en sus tres zonas.

La sección 4, presentó una disminución aparente en el rango de desplazamiento de -0.0046 a -0.05 m $\pm$ 4.3 mm para la temporalidad 2021-2022, mientras que para 2021-2023 se obtuvieron valores de -0.011 a -0.03 m $\pm$ 4.3 mm, de igual manera se determinó una disminución en su velocidad vertical de 3.842 cm/año a 2.266 cm/año y 3.15 cm/año a 0.93 cm/año en su velocidad horizontal.

Las sección 5, los datos muestran un mayor desplazamiento, para 2021-2021 su rango fue de -0.0044 m a -0.013 m $\pm$ 4.3 mm, mientras que para 2021-2023 los valores se situaron de -0.018 a -0.086 m $\pm$ 4.3, por el contrario, sus velocidades verticales y horizontales mostraron una disminución significativa en sus tres zonas.

La sección 6, mostró un aumento en su desplazamiento, para 2021-2022 su rango de valores fue de -0.006 a -0.039 m $\pm$ 4.3 mm, mientras que para la temporalidad de 2021-2023 se obtuvo -0.006 a -0.09 m $\pm$ 4.3 mm. Por el contrario, sus velocidades verticales y horizontales tuvieron una disminución importante en sus dos zonas de hundimiento.

La sección 7, presentó un aumento en el desplazamiento, para la temporalidad 2021-2022 se obtuvo un rango de -0.01 m a -0.093 m $\pm$ 4.3 mm, mientras que para 2021-2023 se obtuvo - 0.012 a -0.12 m $\pm$ 4.3 mm, de igual manera tuvo una disminución en su velocidad horizontal de 0.54 cm/año a 0.28 cm/año, por el contrario, la velocidad vertical presento un aumento de 0.059 cm/año a 0.239 cm/año.

La comparación de los tres monitoreos en los perfiles topográficos y la descripción geométrica de los taludes permitió observar que el hundimiento de la carpeta asfáltica se desarrolla sobre el carril izquierdo, próximo al eje del río. Este hundimiento es mayor, en segmentos donde el hombro del talud corresponde a las guarniciones de la vialidad, teniendo un menor soporte. Lo anterior podría ser una de las posibles causas que contribuyen a la

inestabilidad del área estudiada; esto se contrasta en los segmentos donde el hombro del talud se encuentra más retirado de la vialidad. La longitud de afectación sobre la vialidad varía en todo el segmento entre 1.89 m a 4 m, mientras que en ciertas partes de la carpeta asfáltica que corresponden a la cabeza del talud, presenta deformación que incluso llega al centro de la vialidad. De igual manera, se observa la paulatina separación de las guarniciones en dirección al talud.

Las observaciones en campo y los resultados del procesamiento, permiten inferir que los posibles factores condicionantes de la inestabilidad del talud, es la erosión progresiva del río, el cual, aumenta en temporada de lluvias al incrementar el nivel y fuerza de flujo del agua, socavando la parte más baja del talud. Otro factor es el material del talud, el cual está constituido en su mayoría por relleno antropogénico (arcillo-arenoso) y de origen natural sedimentos fluvio-lacustres. La nula o escasa vegetación en ciertos puntos del talud contribuyen a disminuir la resistencia del suelo, aumentando la inestabilidad y el relieve del talud, llegando a formarse pendientes próximas a los 90°.

Como factores detonantes en su mayoría antropogénicos, se encuentra la alta densidad de la red de drenaje de aguas pluviales y residuales, que generan una infiltración sobre las diferentes unidades estratigráficas del medio. De igual manera la infiltración de agua fluvial del Río Chiquito influye en la saturación de los sedimentos del talud cuando incrementa el caudal. Lo anterior se traduce como un proceso de erosión hidráulica correlacionada con el sobrepeso vehicular, el cual, genera una presión que incrementa la succión del agua atrapada en los vacíos (Figueroa-Infante, 2015), factor que suma de manera significativa a la inestabilidad del talud.

Arreygue-Rocha et al, (2012), coincide en que, los principales problemas que presenta el Río Chiquito están relacionados con la inestabilidad de sus márgenes, la fracturación de la carpeta asfáltica, la cual está siendo afectada por numerosos fenómenos de asiento diferencial y que ha ocasionado una importante modificación de la capacidad de evacuación de los caudales del río.

Debido a lo anterior, se han desarrollado diversos deslizamientos, los cuales se cartografiaron a partir del MDT. Con ayuda de las observaciones en campo y con los perfiles transversales a las estructuras, fue posible realizar la descripción geométrica de dichos cuerpos,

identificando el escarpe principal, escarpe secundario, corona, cabeza, flancos, pie, cuerpo y la superficie de falla.

En el PRM 1 y 2, se observó una escasa vegetación, teniendo un nulo soporte de los sedimentos. Otro factor importante fue la pendiente teniendo valores de 60° en el PRM 1 y 85° en el PRM 2. En el PRM 3 y 4, se observó que la corona de estos deslizamientos esta cercana a las guarniciones de la vialidad, debilitando el hombro del talud.

Al estar presentes los PRM en el talud del canal, existe una gran probabilidad de un represamiento. Las afectaciones que este fenómeno podría ocasionar están condicionadas por el caudal del río, si es mayor o menor, así como las dimensiones del PRM que se pudiera generar.

La cartografía de estructuras del tipo fracturas, permitió determinar su porcentaje y dirección preferencial, siendo el 65% paralela al eje del cauce, es decir, en dirección ONO-ESE, un 25% es perpendicular y el 10% restante es oblicuo. El fracturamiento paralelo está relacionado con la inestabilidad de la cabeza del talud, mientras que las fracturas perpendiculares tienen mayor relación con las juntas de las losas del concreto hidráulico. En tanto que las estructuras oblicuas podrían estar correlacionado a las tuberías de drenaje.

8. Conclusiones

- Esta investigación cumplió con la mayoría de los objetivos, se realizó el levantamiento de tres monitores con temporalidad de un año, efectuando el registro de las nubes de puntos (georreferenciación y alineación), a partir de estos datos se obtuvo el mapa inventario y las velocidades. Para evaluación del desplazamiento en X, Y y Z, solo se evaluó el desplazamiento en Z, al obtener valores estables en las direcciones X e Y.
- El monitoreo mediante el Escáner Laser Terrestre (*TLS*), permitió obtener modelo digital de terreno con alta resolución (2cm x2cm), logrando obtener una cartografía a detalle de fracturas y cuerpos inestables.
- El hundimiento de la zona 2 – sección 1 y la zona 1- sección 2 están relacionadas con la tubería del drenaje para aguas residuales, mientras que el aumento de la velocidad horizontal de la zona 4 - sección 1, este relacionado a un canal de drenaje pluvial.
- El hundimiento de las tres zonas de la sección 5, están relacionadas a la infiltración de agua en las fracturas y al nulo mantenimiento de la carpeta asfáltica para esa sección.
- El hundimiento de la sección 7, está directamente relacionada con el drenaje de aguas residuales.
- A partir de la cartografía, descripción geométrica, la cinemática y la verificación en campo, se puede concluir que el principal factor detonante de la inestabilidad del talud es la actividad antropogénica. Lo anterior se apoya en las evidencias de, sobrepeso vehicular generado en el carril más cercano al talud, la densidad de drenaje pluvial y residual, la calidad de la carpeta asfáltica, la mala planificación que se realizó al no tomar en cuenta el crecimiento urbano y vehicular de la ciudad de Morelia. Sumado a esto, se tienen los factores condicionantes, el material del talud, pendientes que van de los 20° a 80°, la densidad de vegetación, la erosión paulatina del río en el pie del talud y en las zonas más altas cuando el caudal del río es mayor, lo que contribuye a dicha inestabilidad,

- Las velocidades en la horizontal como en la vertical, nos indica que el desplazamiento sigue en movimiento, aumentando la inestabilidad del talud.
- Los perfiles topográficos realizados sobre el MDT fueron una gran herramienta para, observar con mayor detalle las deformaciones interpretadas a partir del análisis de la cinemática de los desplazamientos.
- De acuerdo con el análisis realizado en el segmento sur que va de la Calz. Juárez a la Calz. Ventura Puente y en correlación con el análisis físico en campo, se logró establecer que, en esta zona se concentra una importante y progresiva deformación. Cabe aclarar que, se debe comparar este análisis con el estudio a detalle del segmento norte.
- El análisis mediante la técnica de Escáner Láser Terrestre (*TLS*) es de suma importancia para monitoreos de máximo detalle, en zonas donde los desplazamientos son centímetros o milimétricos, convirtiéndose en una herramienta fundamental para el análisis de peligros y riesgos.
- Las características descritas a partir de las observaciones en campo y perfiles transversales a los cuerpos inestables permitieron cartografiar diferentes deslizamientos, lo cual, deja en evidencia que existe un alto riesgo por represamiento en el canal.

9. Recomendaciones

- Se recomienda el análisis de la sección norte para tener más información de los desplazamientos y poder así correlacionarlos con la sección sur.
- Realizar un monitoreo con mayor detalle en los cuerpos de deslizamiento, para poder tener un seguimiento de su desplazamiento, así como sus velocidades, lo cual ayudaría a evitar un posible represamiento del canal, evitando un riesgo de sanidad por aguas residuales.
- Realizar estudios geotécnicos, hidráulicos, hidrológicos, geológicos y geofísicos, para determinar la mejor alternativa para el tratamiento del talud.
- Saneamiento y rehabilitación del cuerpo de agua, a partir de la construcción de drenajes marginales para su posterior tratamiento, lo cual aumentaría la calidad de vida de los ciudadanos.

10. Bibliografía

- Abbas, M., Lau, L., Setan, H., Majid, Z., Chong, A., Aspuri, A., M Idris, K., & Mohd Ariff, M. F. (2014). Terrestrial Laser Scanners Pre-Processing: Registration and Georeferencing. *Jurnal Teknologi*, 71, 2180–3722. <https://doi.org/10.11113/jt.v71.3833>
- Álaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Orozco-Esquivel, Ma. T., Vassallo, L. F., & Xu, S. (2002). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: Implicaciones en la deformación post-eocénica del centro de México.
- Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Boletín Del Instituto de Geografía*, 41.
- Arreygue, E., Garduño, V. H., Canuti, P., Casaglie, N., Iotti, A., & Chiesa, S. (2002). Análisis geomecánico del escarpe La Paloma, Morelia, Mich. Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(2), 91–106.
- Arreygue-Rocha, E., Pastor-Gómez, N., Chávez-Negrete, C., & Alarcón-Ibarra, J. (2012). Estudio de las inundaciones en la ciudad de Morelia Michoacán, México. *Revista de Geología Aplicada a La Ingeniería y al Ambiente*, 28, 103–110.
- Arreygue-Rocha, Eleazar., Garduño-Monroy, Víctor. H., Canuti, Paolo., Casagli, Nicola., & Iotti, Alberto. (2005). Riesgos geomorfológicos e hidrológicos en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Geotermia*, 18(1).
- Avellán, D. R., Cisneros-Máximo, G., Macías, J. L., Gómez-Vasconcelos, M. G., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., & Robles-Camacho, J. (2020a). Eruptive chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia – Insights into volcano-tectonic interactions in the central-eastern Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México. *Journal of South American Earth Sciences*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102554>
- Bianchini, S., Herrera, G., Mateos, R. M., Notti, D., Garcia, I., Mora, O., & Moretti, S. (2013). Landslide activity maps generation by means of persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing*, 5(12), 6198–6222. <https://doi.org/10.3390/rs5126198>

Blue Marble Geographics. (2017). Global Mapper.

Borja-Baeza, Roberto. Carlos., & Alcántara-Ayala, Irasema. (2010). Susceptibility to mass movement processes in the municipality of Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla. *Investigaciones Geográficas*, 73, 721. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56919175002>

Brunsden, D. (1979). Mass movements. In C. E. Embley & J. B. Thornes (Eds.), *Progress in Geomorphology* (pp. 130–186). Arnold.

Budhu, M. (2007). SLOPE STABILITY. In *SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS* (3rd Edition, pp. 1–781).

Carreón Nieto, M. (2014). Los Ríos de Valladolid-Morelia. Concepciones y usos del agua en los siglos XVIII y XIX. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Casagli, N., & Ermini, L. (1999). Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine. 219-249. <https://flore.unifi.it/handle/2158/206201>.

Céspedes Salamanca, J., & Pérez Castillo, J. N. (2008). LiDAR, una tecnología de última generación, para la planeación y desarrollo urbano. *Ingeniería*, 13(1), 67–76.

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial* (Segunda edición). Ediciones RIALP, S.A.

Clague, J. J., & Evans, S. G. (2000). A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews*, 19(17), 1763–1783. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00090-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00090-1)

Coates, D. R. (1977). *Landslide perspectives (Landslides)*. Geological Society of America.

CONAGUA. (2014). *ATLAS DEL AGUA EN MÉXICO*.

Conner, J. C., & Olsen, M. J. (2014). Automated quantification of distributed landslide movement using circular tree trunks extracted from terrestrial laser scan data. *Computers and Geosciences*, 67, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.02.007>

- Correa-Gómez, J. (2022). Reconstrucción estratigráfica y grado de soldamiento de la secuencia ignimbrítica de la caldera Atécuaro. Tesis. Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Costa, J. E., & Schuster, R. L. (1987). The formation and failure of natural dams. Open-file report/. <https://doi.org/10.3133/ofr87392>.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. Special Report-National Research Council, Transportation Research Board, 247, 36-57.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1993). Landslide types and processes. in landslides: investigation and mitigation (pp. 1–60). Transportation Research Board. <https://www.researchgate.net/publication/269710331>
- Cui, P., Zhu, Y., Han, Y., Chen, X., & Zhuang, J. (2009). The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation. *Landslides*, 6(3), 209–223. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0160-9>
- DDRMA. (1991). Desastres, planificación y desarrollo: manejo de amenazas naturales para reducir los daños. <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea57s/begin.htm#Contents>
- DGM, AB, & RM. (2012). CloudCompare. www.cloudcompare.net
- Domínguez-Sánchez, C., Sánchez-Quispe, S. T., Urbina-Lucas, O., & Torres Martínez, J. A. (2014). Evaluación de la rectificación del Río Chiquito de Morelia en modelo físico para un proyecto sustentable.
- Eker, R., & Aydın, A. (2021). Long-term retrospective investigation of a large, deep-seated, and slow-moving landslide using InSAR time series, historical aerial photographs, and UAV data: The case of Devrek landslide (NW Turkey). *Catena*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104895>
- EPOCH. (1993). Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community (Vol. 3).

- ESRI. (2016). ArcGis for Desktop. Environmental Systems Research Institute.
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm>
- Felícísimo, Á. M. (1994). Modelos Digitales del Terreno. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>
- Figueroa-Infante, A. S. (2015). Investigación sobre el efecto del agua en el asfalto y su impacto en la mezcla asfáltica. Pontificia Universidad Javeriana.
- García, C., & Jiménez, S. (1993). Estudio florístico de la cuenca del Río Chiquito de Morelia, Michoacán, México.
- Garduño, V. H., Arreygue, E., Israde, I., & Rodríguez, Gerardo. M. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* , 18(1), 37–54.
- Garduño-Monroy, V., Ávila-Olivera, J., Hernández-Madrigal, V., & Díaz-Salmerón, J. (n.d.). Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta Planificación del Territorio.
- Geoinnova. (2022). Formatos LAS y LAZ en LiDAR. Como usar LASzip para convertir uno en otro. <https://geoinnova.org/blog-territorio/formatos-las-y-laz-en-lidar-y-como-usar-laszip/>
- Godínez, R. (2007). Evaluación socioeconómica del saneamiento de aguas residuales de Morelia, Mich. .
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. W., & Benowitz, J. A. (2015). The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 128–147.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.005>
- González de Vallejo, L. I. (2004). Deslizamientos y otros movimientos de terreno. In L. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, & C. Oteo (Eds.), *Ingeniería Geológica* . PEARSON.

- Güiza, F., Mendoza E. Manuel, & Urquijo S. Pedro. (2020). Los ríos de Morelia, ejes articuladores de la ciudad. In *Antecedentes urbanos de la canalización del Río Chiquito en Morelia, siglos XIX y XX* (pp. 84–101).
- Hasenaka, T., & Carmichael, I. S. E. (1985). The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 105–124.
- Hermanns, R. L. (2013). Landslide dam. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_213
- Hermanns, R. L., Hewitt, K., Strom, A., Evans, S. G., Dunning, S. A., & Scarascia-Mugnozza, G. (2011). The Classification of Rockslide Dams. In S. G. Evans, R. L. Hermanns, A. Strom, & G. Scarascia-Mugnozza (Eds.), *Natural and Artificial Rockslide Dams* (pp. 581–593). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04764-0_24
- Hernández Madrigal, V., Garduño Monroy, V., & Ávila Olivera, J. (2011). *ATLAS DE Peligros geológicos de la ciudad de Morelia, Mich: Estandarización del documento, actualización cartográfica de fallas geológicas de la zona urbana, y evaluación de tasas de hundimiento* (Departamento de geología y mineralogía Ed.).
- Ibáñez-Hernández, D. (2008). *Regeneración del río chiquito de morelia*. U.M.S.N.H.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017* (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Ed.). www.inegi.org.mx
- INEGI. (2021). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?t=186&esc=1>
- Jaboyedoff, M., & Derron, M. H. (2020). Landslide analysis using laser scanners. In *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 23, pp. 207–230). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00007-2>

- Jafari, B. M. (2016). DEFLECTION MEASUREMENT THROUGH 3D POINT CLOUD ANALYSIS. Thesis, Master of Science Civil and Infrastructure Engineering. George Mason University.
- Jin, J., Chen, G., Meng, X., Zhang, Y., Shi, W., Li, Y., Yang, Y., & Jiang, W. (2022). Prediction of river damming susceptibility by landslides based on a logistic regression model and InSAR techniques: A case study of the Bailong River Basin, China. *Engineering Geology*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106562>
- Korup, O. (2005). Geomorphic hazard assessment of landslide dams in South Westland, New Zealand: fundamental problems and approaches. *Geomorphology*, 66(1), 167–188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.013>
- La Jornada. (2010). Se desborda el canal La Compañía en Valle de Chalco; en minutos inunda la México-Puebla. <https://www.jornada.com.mx/2010/02/06/estados/023n1est>
- Lavell, A. (2003). La Gestión Local del Riesgo; Nociones y Precisiones en torno al Concepto y la Práctica. CEPREDENAC.
- Maza-Villalobos, S., Santana-Macedo, F., Velázquez-Rodríguez, J., Oyama, K., & Martínez-Ramos, M. (2014). Variación de la estructura y composición de comunidades de árboles y arbustos entre tipos de vegetación en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán. *ECOLOGÍA Botanical Sciences*, 92(2), 243–258.
- Mendoza, M., Bocco, G., Granados, E. L., & Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán (Vol. 49).
- Mendoza Vargas, H., & Lois, Carla. (2009). Historias de la cartografía de Iberoamérica : nuevos caminos, viejos problemas (Primera edición). Instituto de Geografía, UNAM.
- Mora-Ortiz, R. S., & Rojas-González, E. (2012). Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 13(1), 55–68.
- Navarro-Cerrillo, R. M., Sanchez de la Orden, M., García-Ferrer, A., Hernandez-Clemente, R., & Lanjeri, S. (2010). Aplicación de imágenes LIDAR para la estimación del índice

- de superficie foliar (LAI) en encinas [*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf) Samp.]. *Forest Systems*, 19(1), 61–69. www.inia.es/forestsystems
- Niraj, K. C., Gupta, S. K., & Shukla, D. P. (2021). Kotrupi landslide deformation study in non-urban area using DInSAR and MTInSAR techniques on Sentinel-1 SAR data. *Advances in Space Research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.042>
- NMas. (2023). Canal Se Desborda en Cuauhtémoc y Provoca Inundación. <https://www.nmas.com.mx/foro-tv/programas/las-noticias-1800/videos/canal-se-desborda-cuauhtemoc-provoca-inundacion/>
- Oppikofer, T., Hermanns, R. L., Jakobsen, V. U., Böhme, M., Nicolet, P., & Penna, I. (2020). Semi-empirical prediction of dam height and stability of dams formed by rock slope failures in Norway. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(11), 3179–3196. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-3179-2020>
- Ortiz-Giraldo, L., Botero, B. A., & Vega, J. (2023). An integral assessment of landslide dams generated by the occurrence of rainfall-induced landslide and debris flow hazard chain. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1157881>
- Oseguera-Medina, María. C. (2014). Las inundaciones en la ciudad de Morelia. Tesis, Maestría en Historia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Palacios-Gómez, D. (2019). Aplicación de la interferometría SAR satelital para la detección y monitoreo de los deslizamientos en la carretera escénica Tijuana-Ensenada, BC. CICESE.
- Pancino, María. C. (2017). La ciencia geomática presente y futuro. *Revista Argentina de Ingeniería*.
- Porras, H., Cáceres, J. J., & Gallo, E. O. (2014). Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre. 134(41), 134–153.
- Quadratin. (2017). Morelia: se desborda el Río Chiquito. <https://www.quadratin.com.mx/principal/morelia-se-desborda-rio-chiquito/>
- RIEGL Laser Measurement Systems. (2016). RiSCAN PRO.

- RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. (2017). RIEGL VZ-1000. In 2017.
- RÍODOCE. (2023). Inundaciones por desbordamiento de río y canales pluviales dejan lluvias en concordia. <https://riodoce.mx/2023/10/23/inundaciones-por-desbordamiento-de-río-y-canales-pluviales-dejan-lluvias-en-concordia/>
- Rivero, Á. (2018). Activan Plan DN-III por lluvia e inundación en Morelia, Michoacán. Noticias Televisa. <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/clima-michoacan-hoy-22-octubre-2018-lluvias-causan-inundacion-morelia/>
- Sánchez-Sepúlveda, Héctor. U., & Urquijo-Torres, Pedro. S. (2014). La expansión urbana en el suroriente de Morelia. Una revisión históricoambiental 1885-2010 (A. Vieyra & A. Larrazabal, Eds.). Urbanización, Sociedad y Ambiente. Experiencias en ciudades medias.
- Sassa, K., Tsuchiya, S., Fukuoka, H., Mikos, M., & Doan, L. (2015). Landslides: review of achievements in the second 5-year period (2009–2013). *Landslides*, 12(2), 213–223. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0567-4>
- Schuster, R., & Costa, J. (1986). Perspective on landslide dams. *asce (Geotechnical Special Publication 3)*.
- Sharma, M., Garg, R. D., Badenko, V., Fedotov, A., Min, L., & Yao, A. (2021). Potential of airborne LiDAR data for terrain parameters extraction. *Quaternary International*, 575–576, 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.07.039>
- Sharpe, C. (1938). Landslides and related phenomena: A study of Mass-Movements of soil and rock. *The Geographical Journal*, 92, 276.
- Skempton, A. W., & Hutchinson, J. M. C. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations.
- Soria-Caballero, D. C., Gómez-Calderón, D. A., & Garduño-Monroy, V. H. (2021). Paleoseismological analysis of El Malpaso -El Salto fault, North Michoacán, Mexico. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 73(2), 1–25. <https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n2a181220>

- Suárez-Díaz, J. (1998). DESLIZAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS TROPICALES (Ingeniería de Suelos Ltda., Ed.). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Valladares-Ibarra, P. D. (2015). Estabilidad de taludes con anclas. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vargas-Sánchez, M. (2020). Peligrosidad por caída de rocas en la falla geológica activa de Pajacuarán, Michoacán. Tesis. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Varnes, D. J. (1958). Landslide Types and Processes. In LANDSLIDES AND ENGINEERING PRACTICE (pp. 20–47).
- Vieyra A. y Larrazábal A. (2014). Urbanización, sociedad y ambiente-Experiencias en ciudades medias. In Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA).
- Villegas-Vega, H. (2008). INTRODUCCION A LA PERCEPCION REMOTA Y SUS APLICACIONES GEOLOGICAS. Instituto Colombiano de Geología y Minería.
- WRadio. (2023). Desbordamiento del Canal Lerma deja afectaciones en viviendas de Ixtapaluca.
https://wradio.com.mx/radio/2023/09/01/nacional/1693596387_084661.html
- Yang, J., Shi, Z., Peng, M., Zheng, H., Soares-Frazão, S., Zhou, J., Shen, D., & Zhang, L. (2022). Quantitative risk assessment of two successive landslide dams in 2018 in the Jinsha River, China. Engineering Geology, 304.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106676>
- Zeng, P., Wang, S., Sun, X., Fan, X., Li, T., Wang, D., Feng, B., & Zhu, X. (2022). Probabilistic hazard assessment of landslide-induced river damming. Engineering Geology, 304. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106678>
- Zhao, S., He, Z., Dai, F., Li, H., Deng, J., Gao, Y., & Chen, F. (2022). Giant river-blocking landslide dams with multiple failure sources in the Nu River and the impact on transient landscape evolution in southeastern Tibet. Geomorphology, 108357.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108357>.

Anexo 1

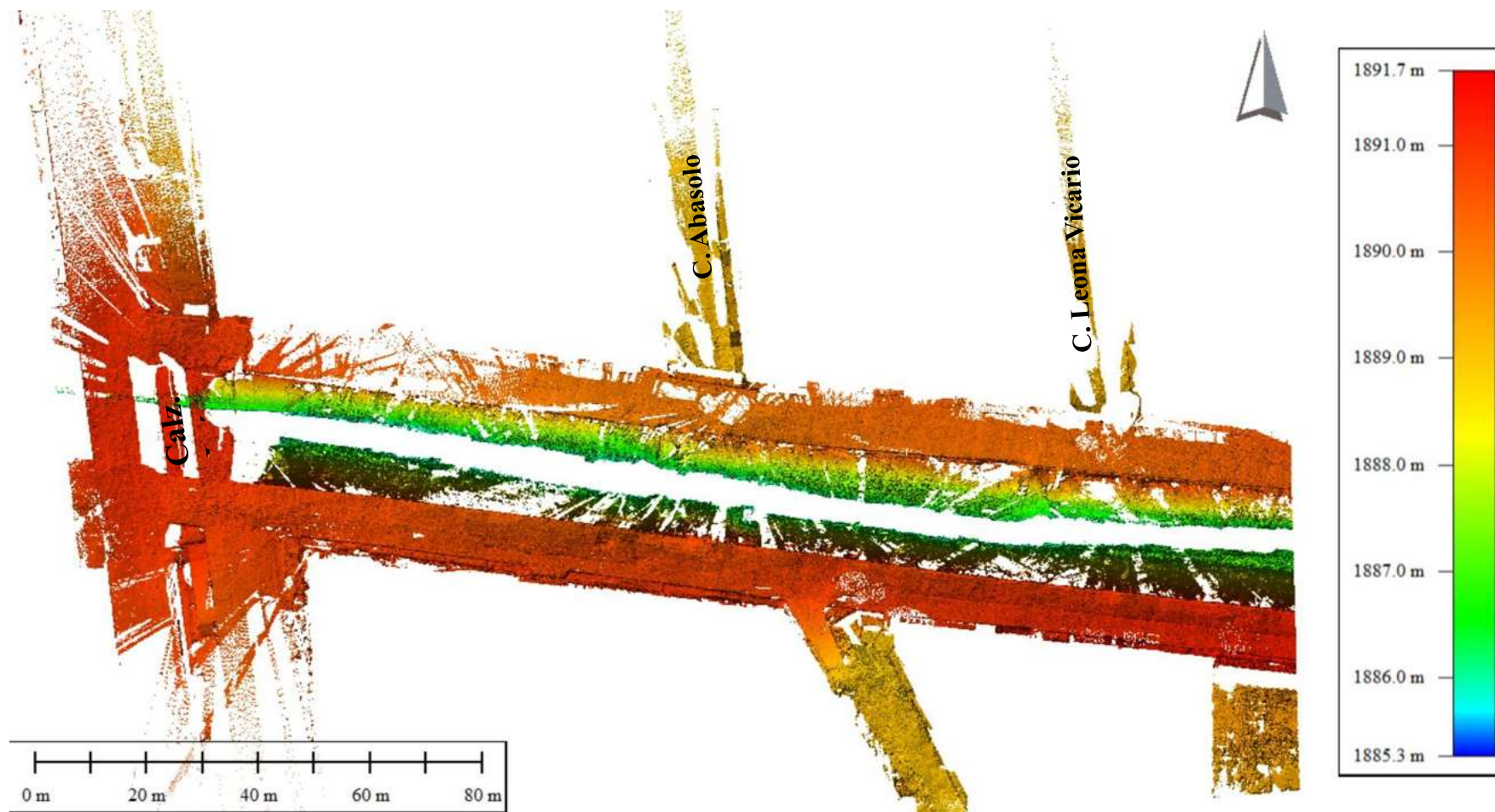


Figura A1. 1 Sección 1. Corresponde al tramo de la Calz. Benito Juárez con la C. Leona Vicario, con una elevación máxima de 1891.7 m.s.n.m y una mínima de 1885.3 m.s.n.m.

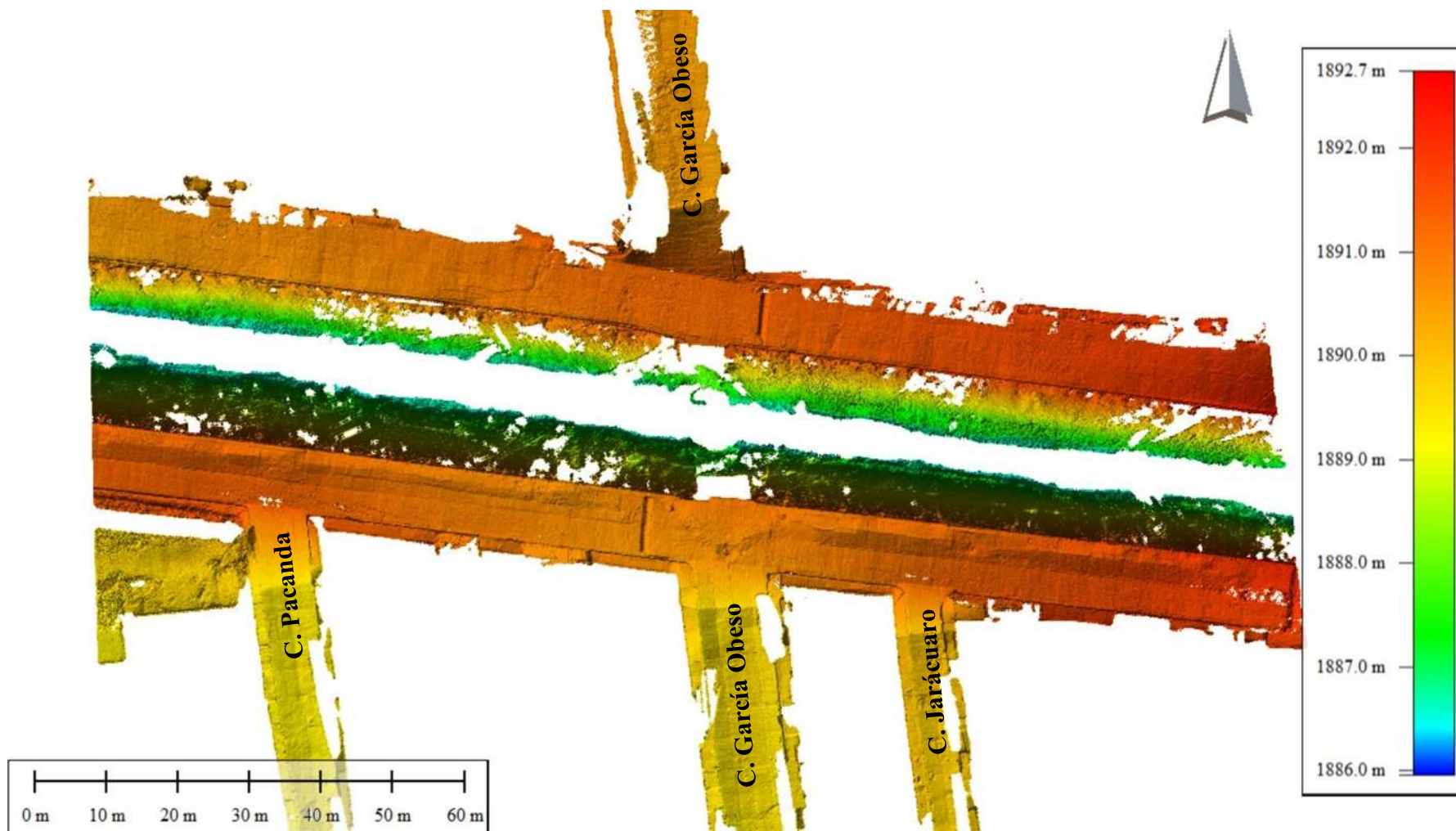


Figura A1. 2 Sección 2. Corresponde al tramo de la C. Pacanda a la C. Jarácuaro, con una elevación máxima de 1892.7 m.s.n.m y una mínima de 1886 m.s.n.m.

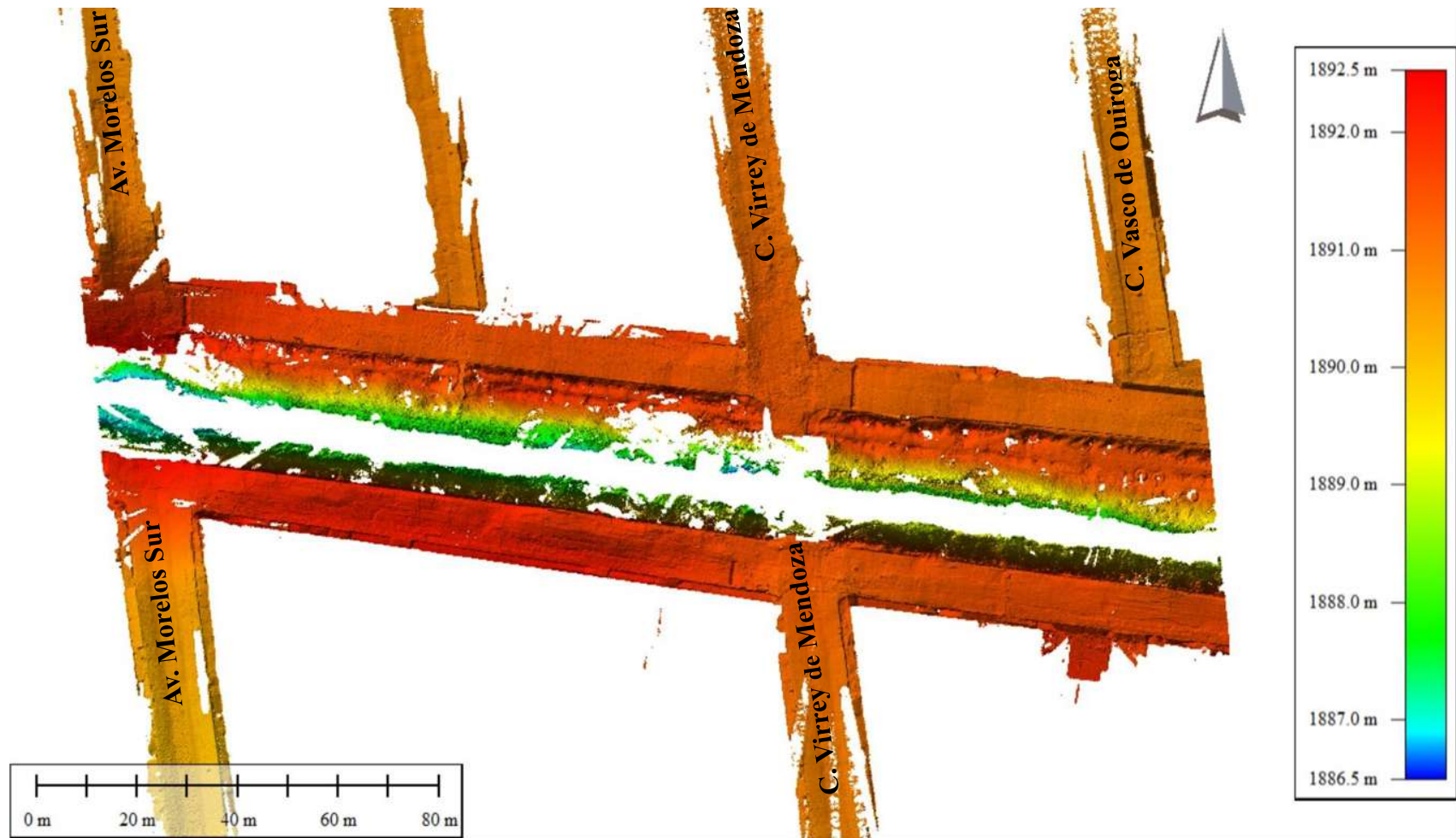


Figura A1. 3 Sección 3. Corresponde al tramo de la Av. Morelos Sur a la C. Vasco de Quiroga, con una elevación máxima de 1892.5 m.s.n.m y una mínima de 1886.5 m.s.n.m.

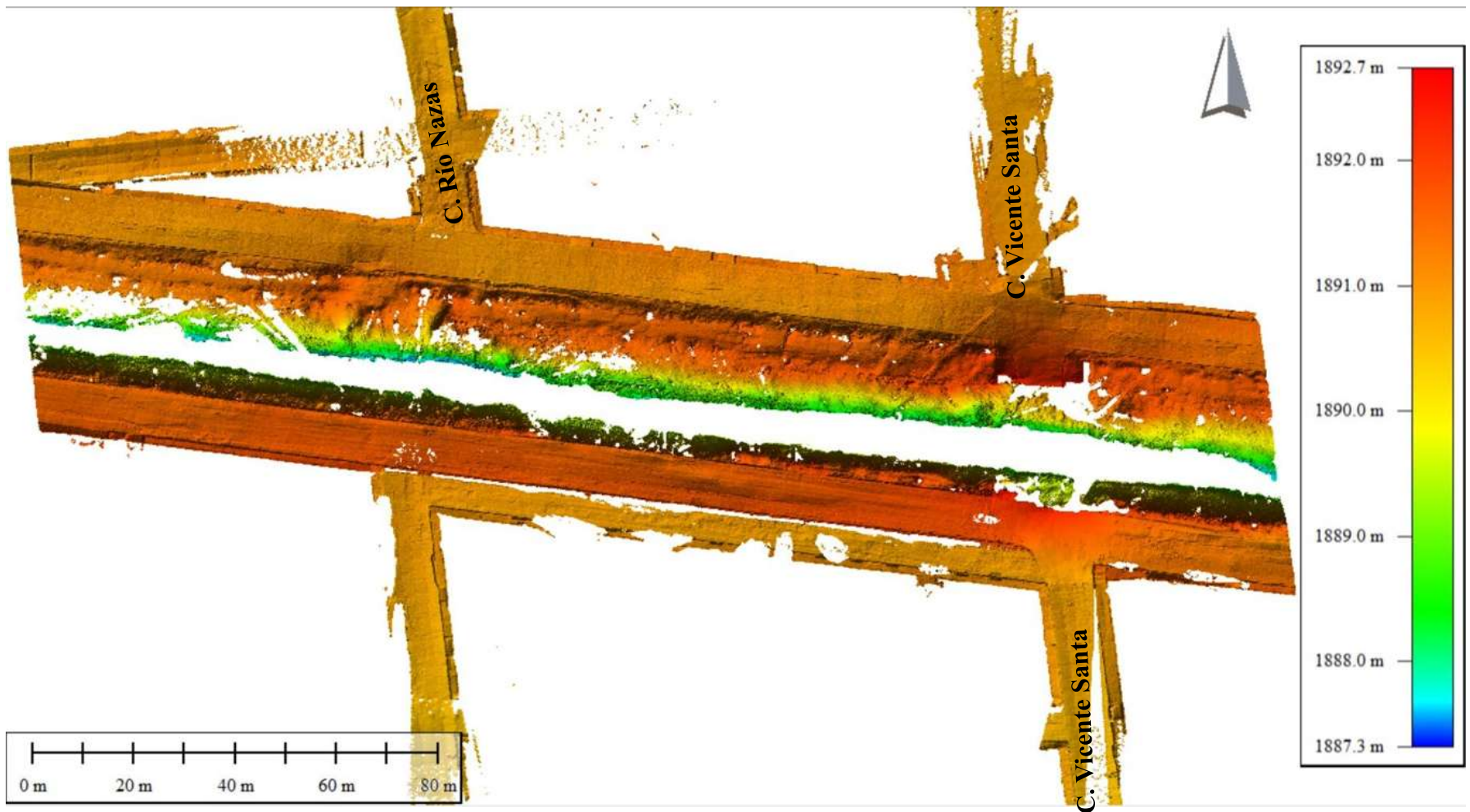


Figura A1. 4 Sección 4. Corresponde al tramo de la C. Río Nazas a la C. Vicente Santa María, con una elevación máxima de 1892.7 m.s.n.m y una mínima de 1887.3 m.s.n.m.

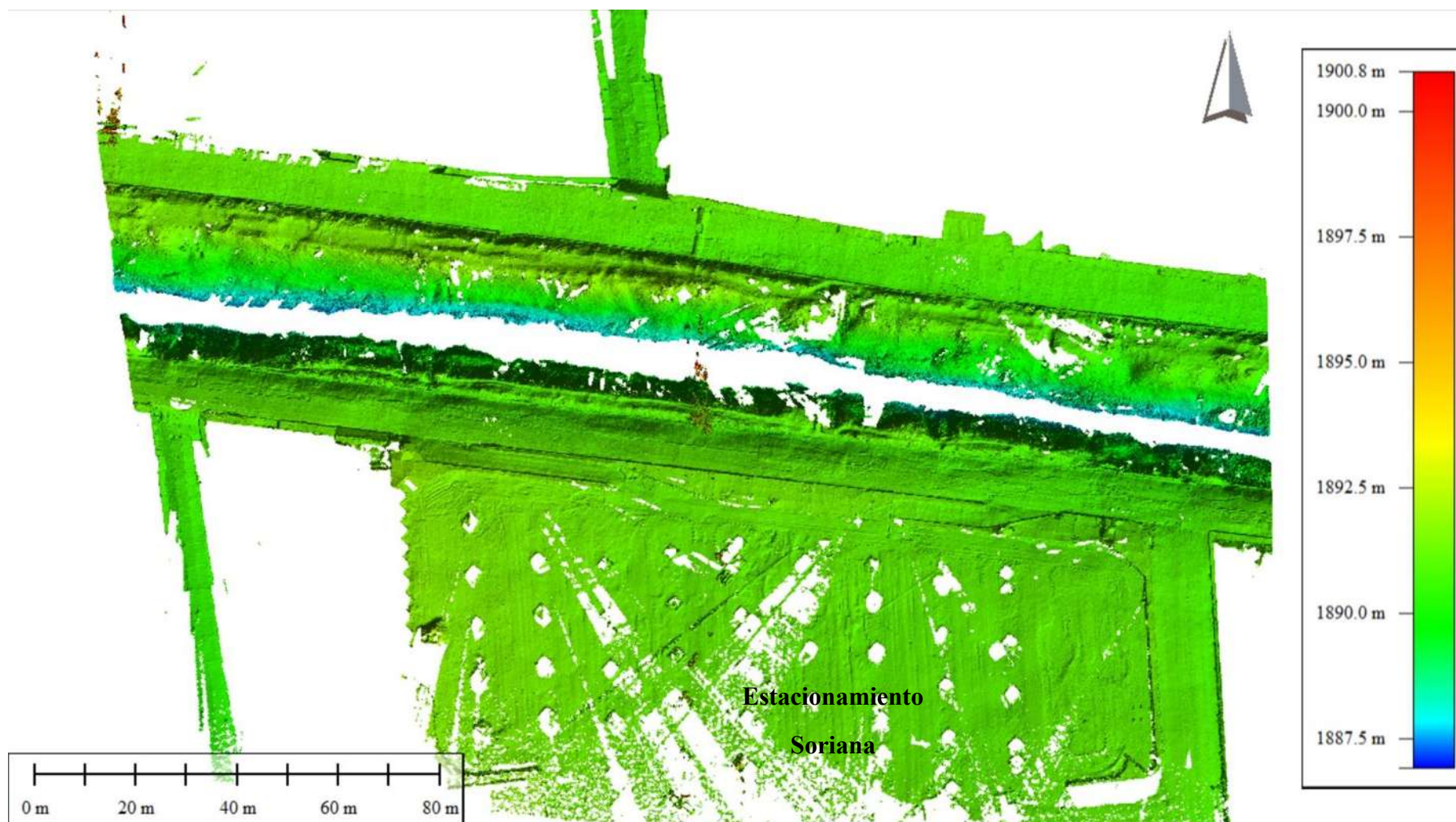


Figura A1. 5 Sección 5. Corresponde al tramo de la P. Francisco Eusebio Kino y el estacionamiento de Soriana, con una elevación máxima de 1900.8 m.s.n.m y una mínima de 1887.5 m.s.n.m.

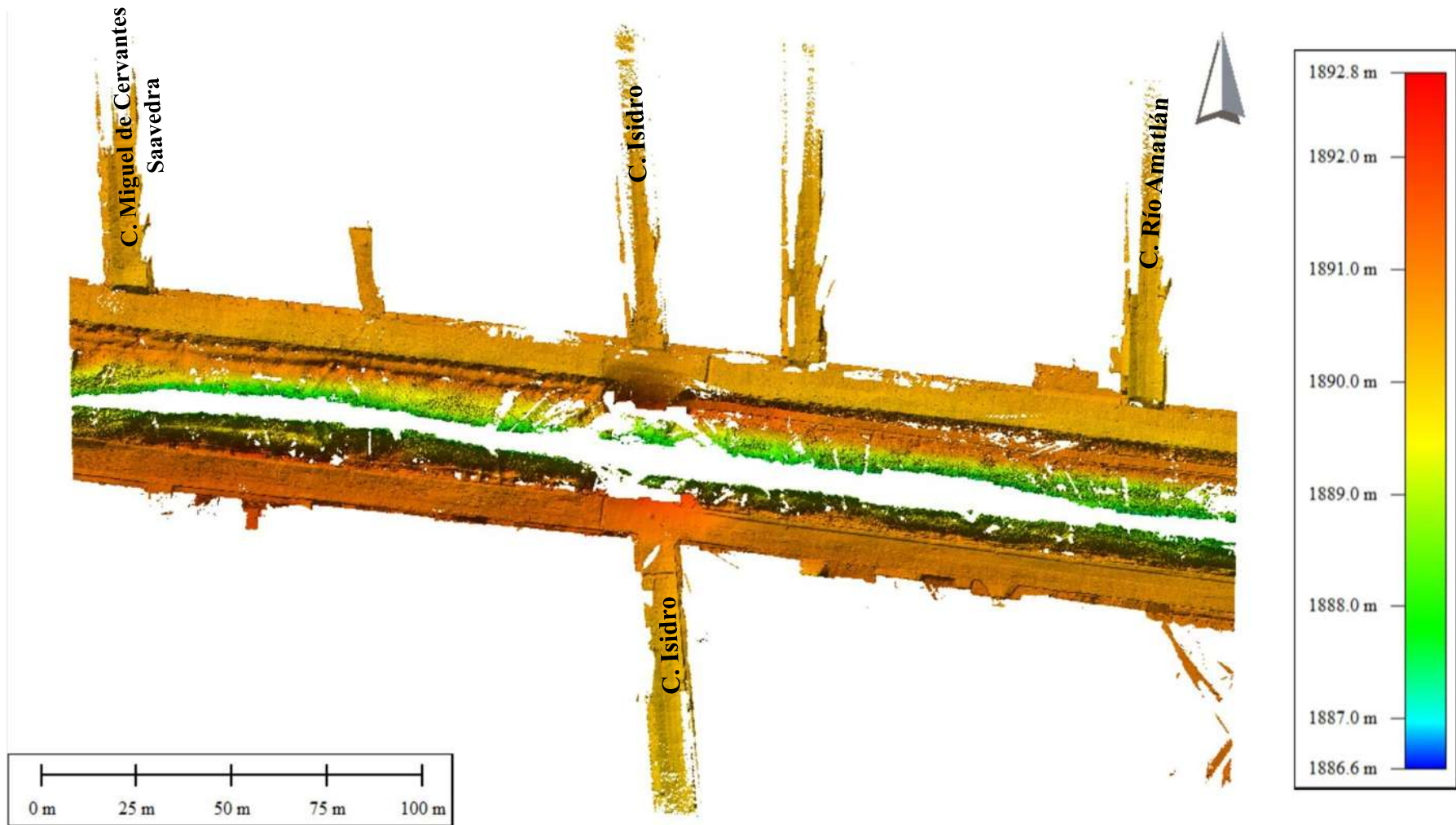


Figura A1. 6 Sección 6. Corresponde al tramo de la C. Miguel de Cervantes Saavedra y la C. Río Amatlán , con una elevación máxima de 1892.8 m.s.n.m y una mínima de 1886.6 m.s.n.m.

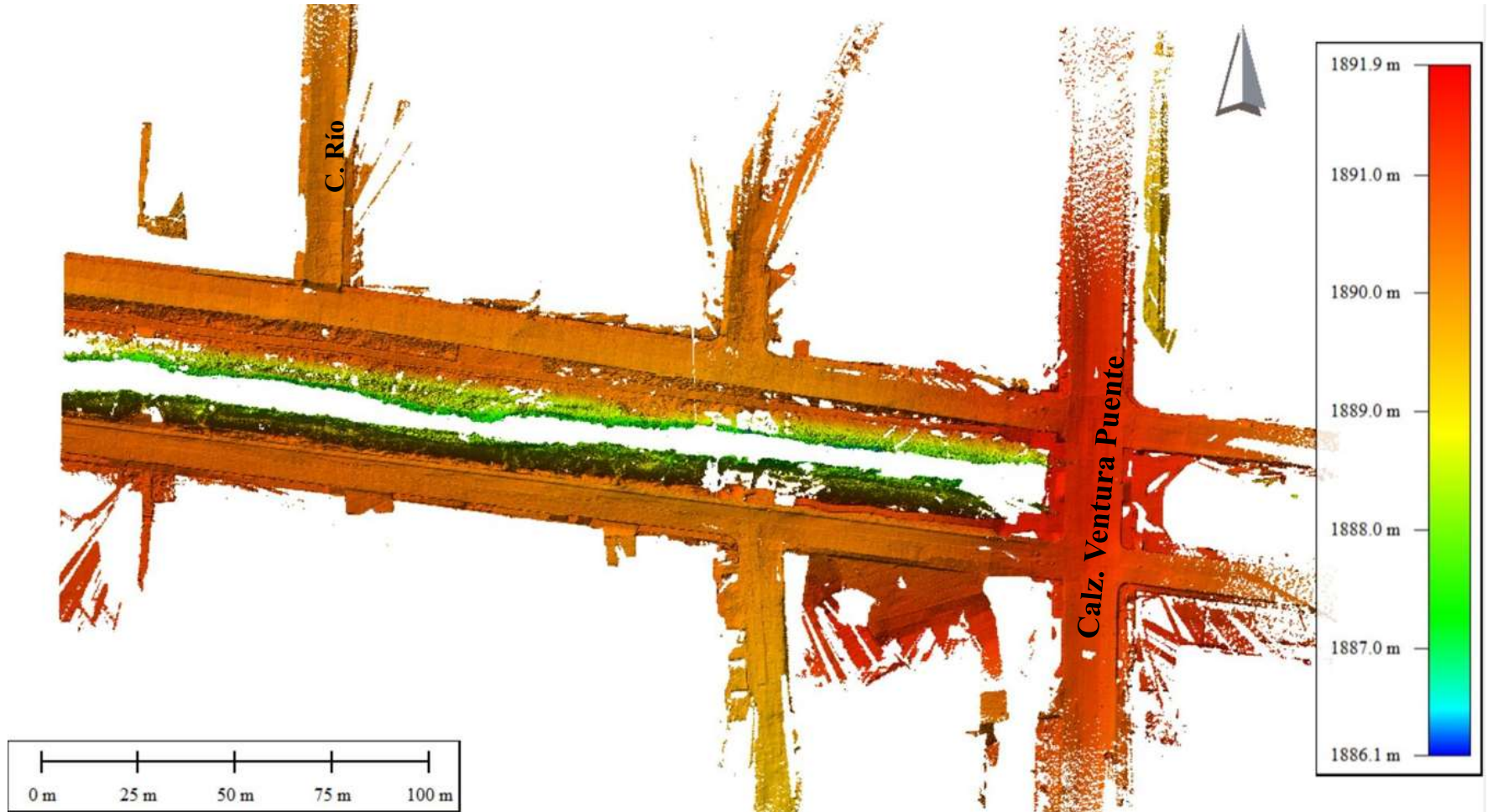


Figura A1. 7 Sección 7. Corresponde al tramo de la C. Río Mayo y la Calz. Ventura Puente , con una elevación máxima de 1891.9 m.s.n.m y una mínima de 1886.1 m.s.n.m.

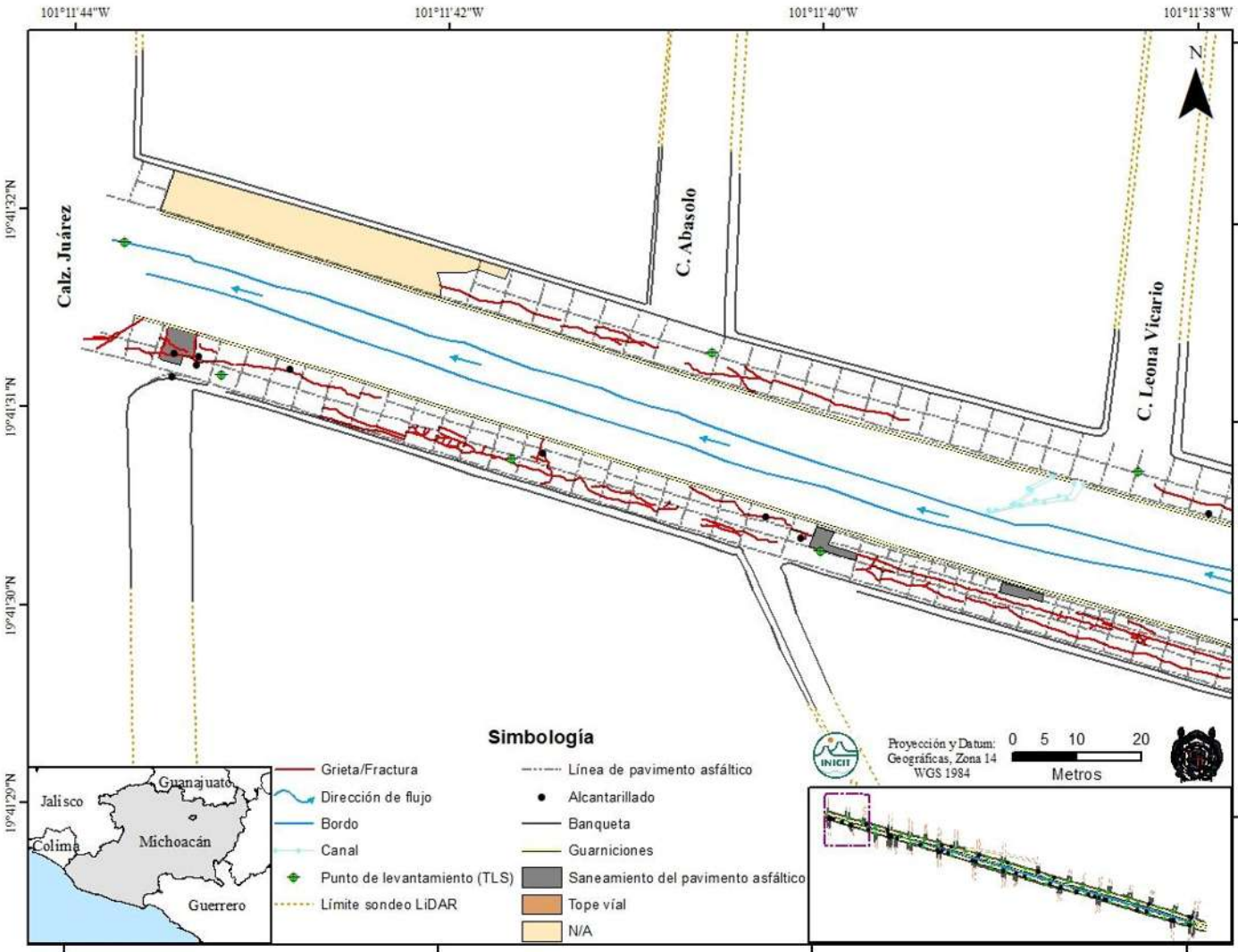


Figura A2. 1 Planimetría con inventario de fracturas, sección 1.

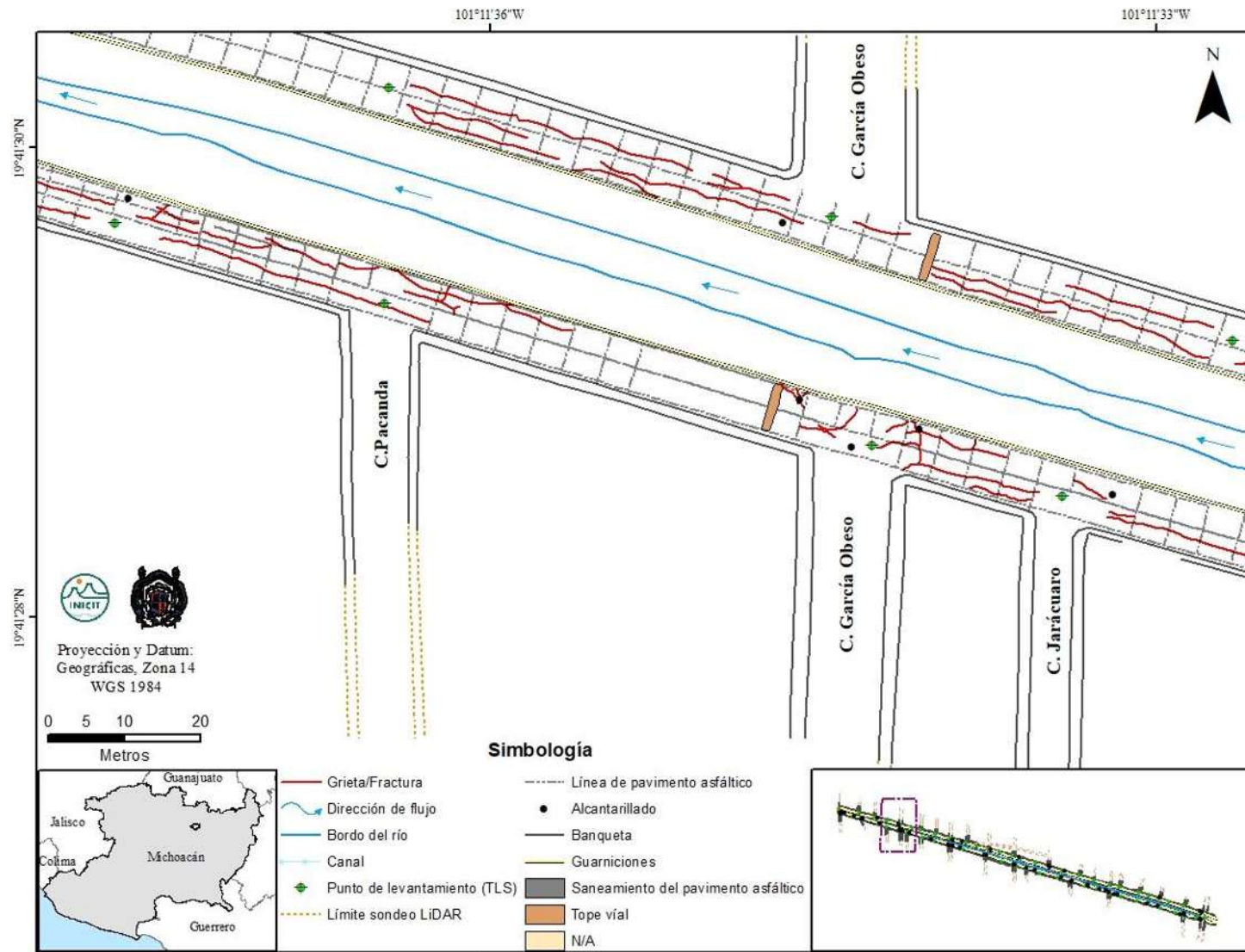


Figura A2. 2 Planimetría con inventario de fracturas, sección 2.

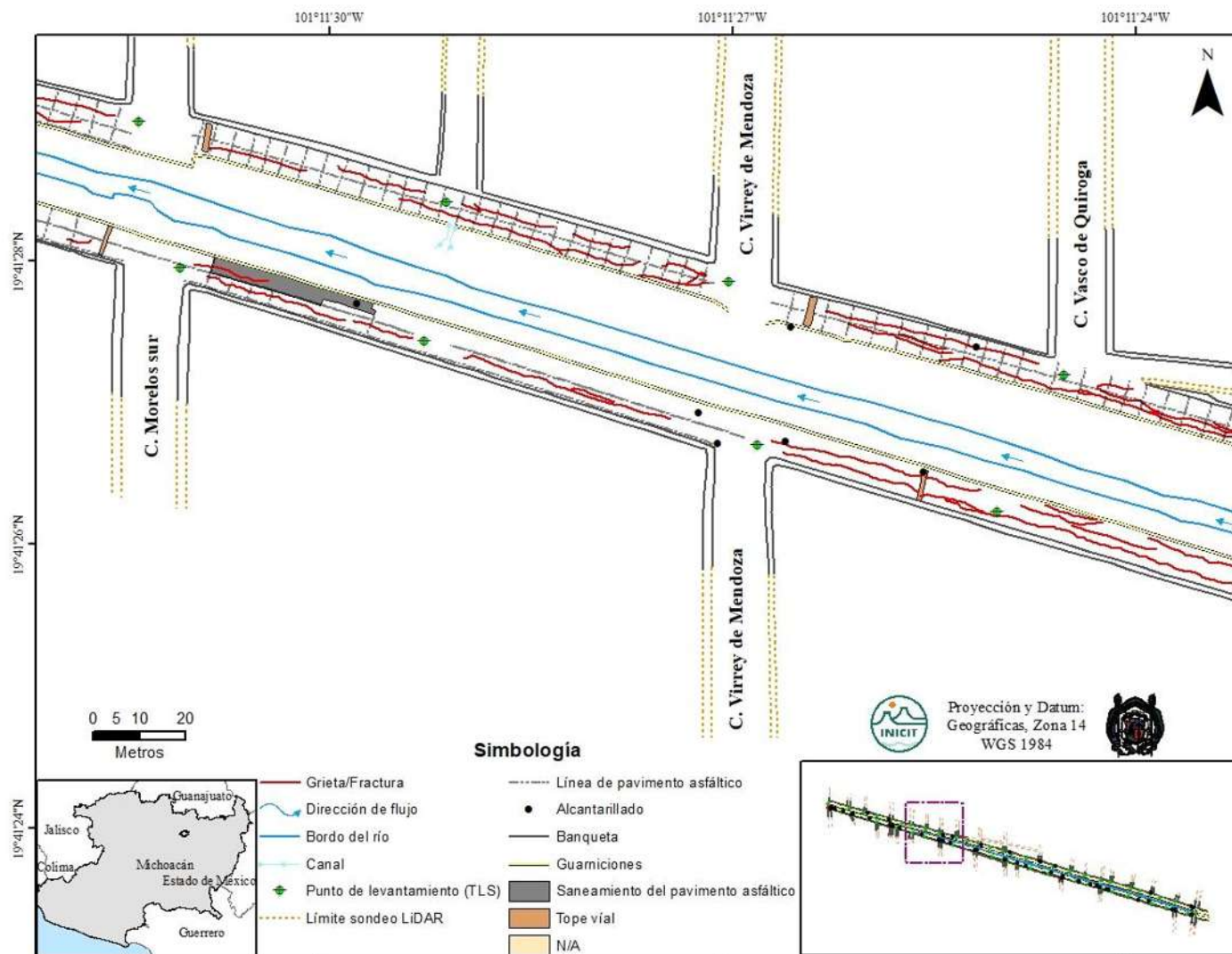


Figura A2. 3 Planimetría con inventario de fracturas, sección 3.

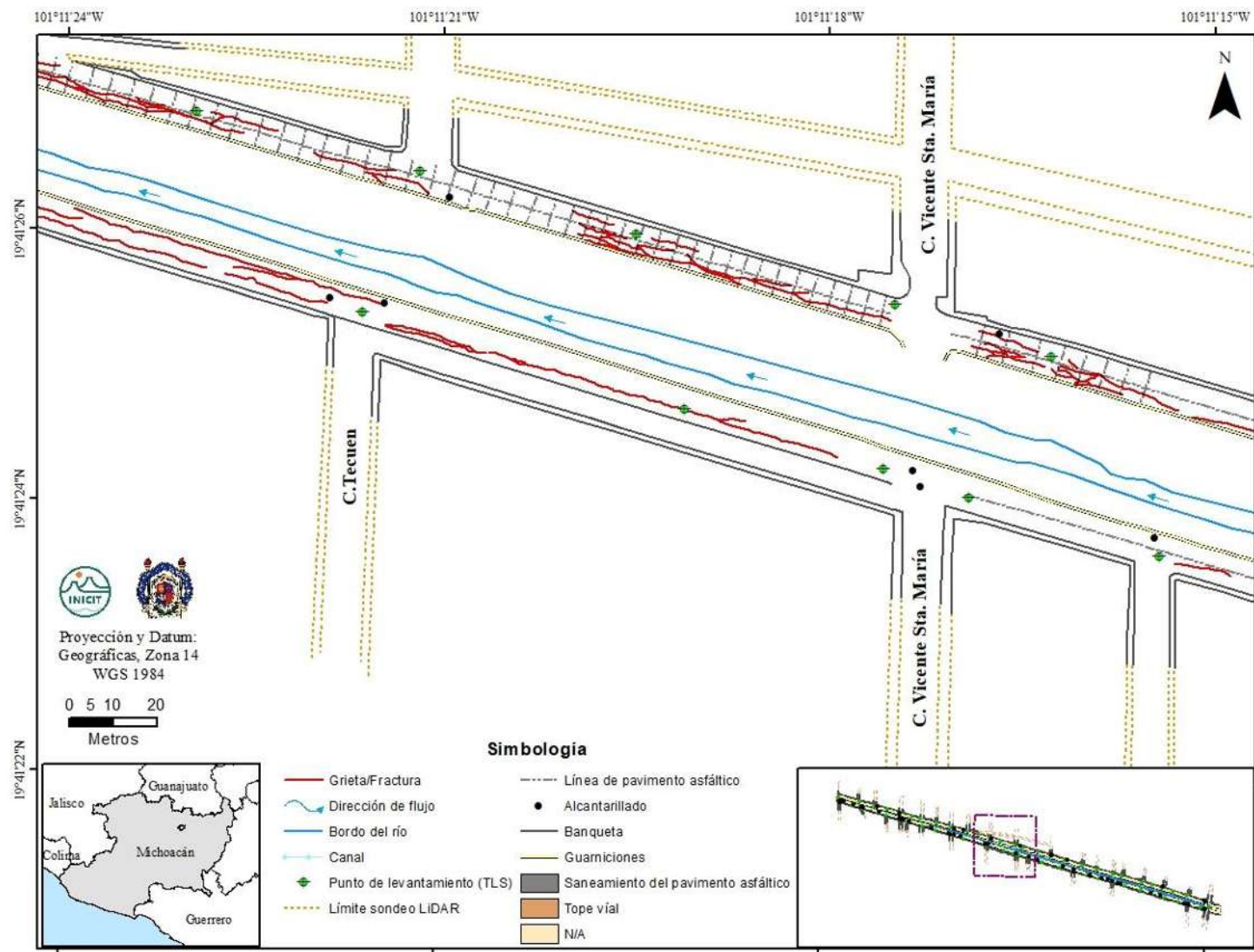


Figura A2. 4 Planimetría con inventario de fracturas, sección 4.

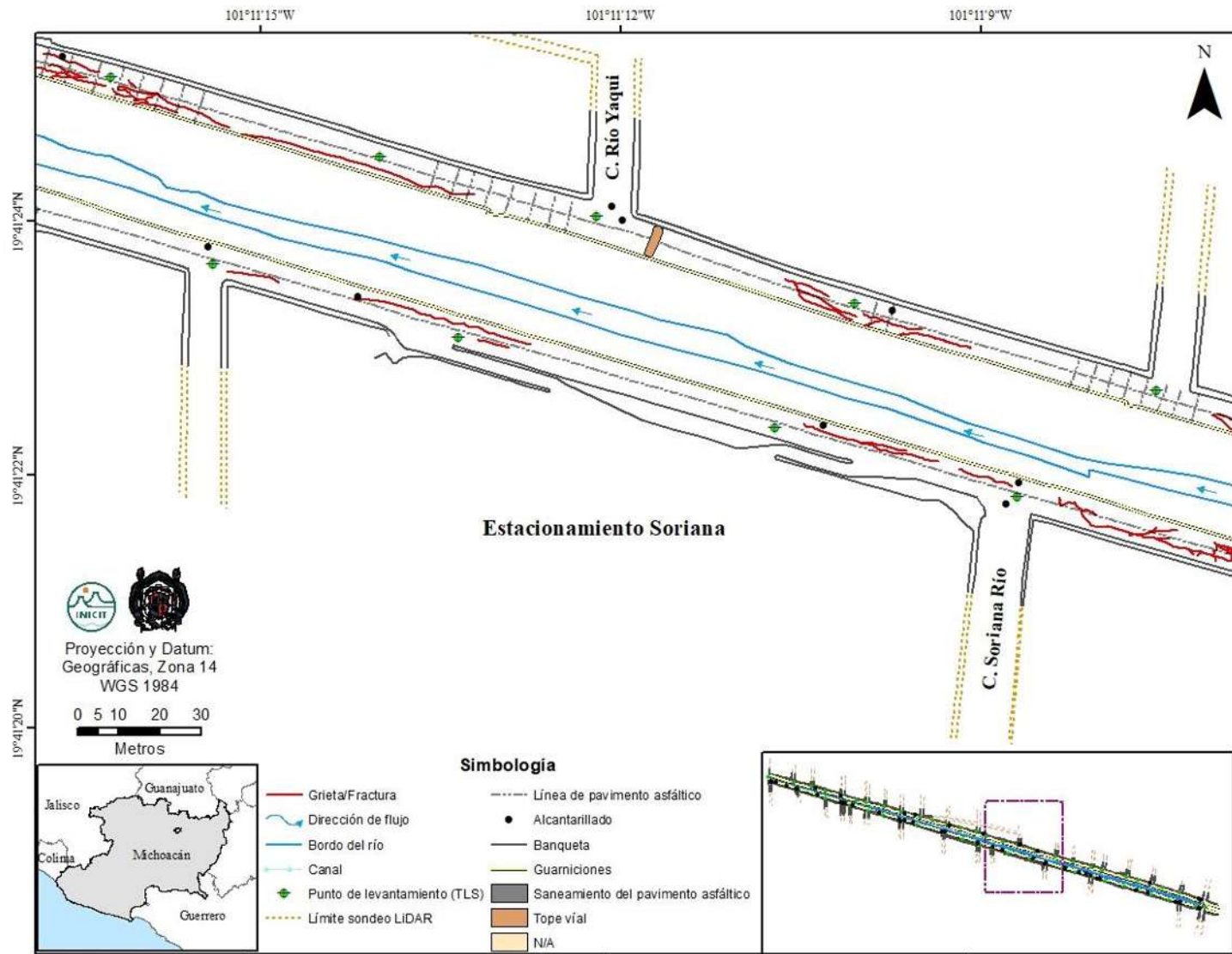


Figura A2. 5 Planimetría con inventario de fracturas, sección 5.

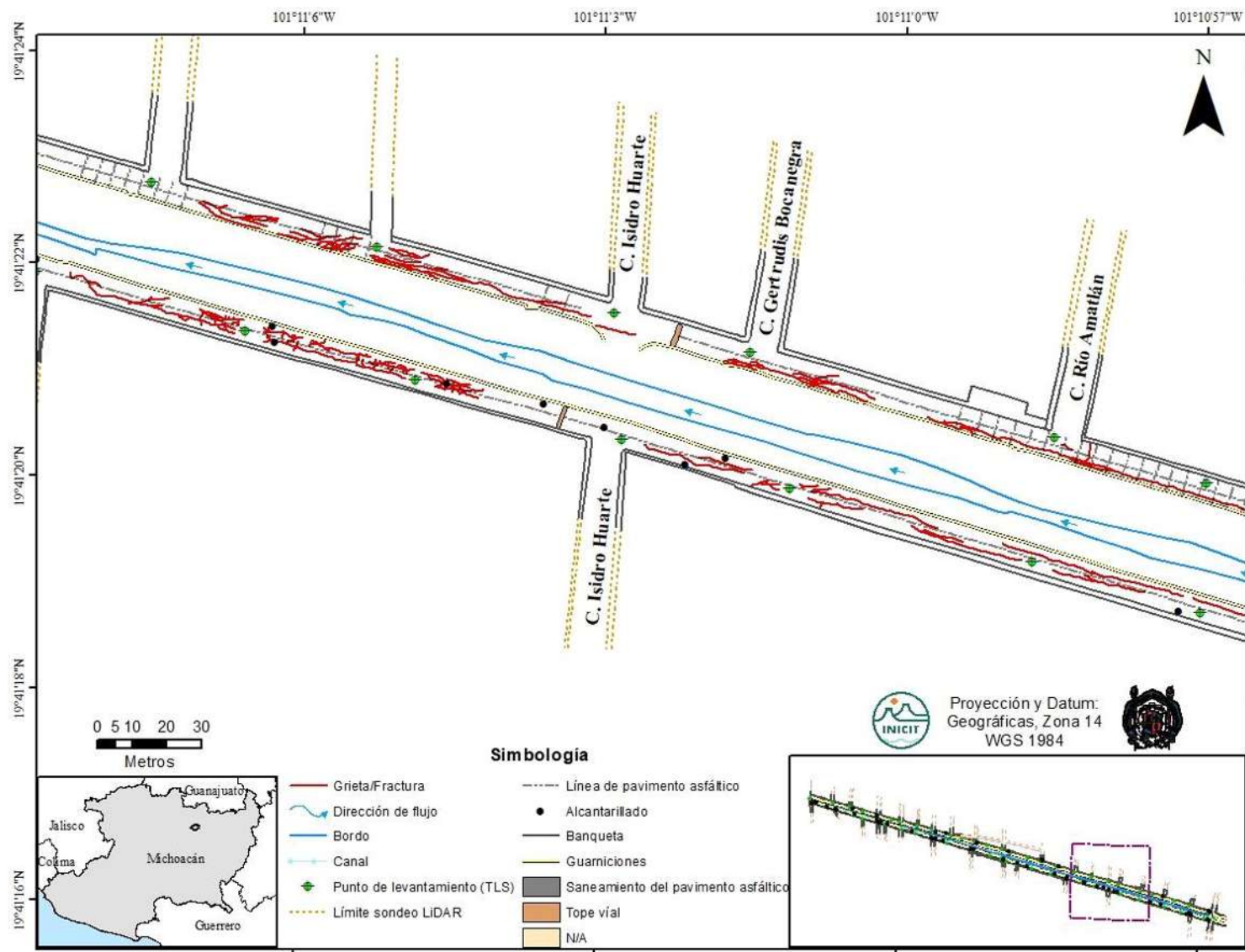


Figura A2. 6 Planimetría con inventario de fracturas, sección 6.

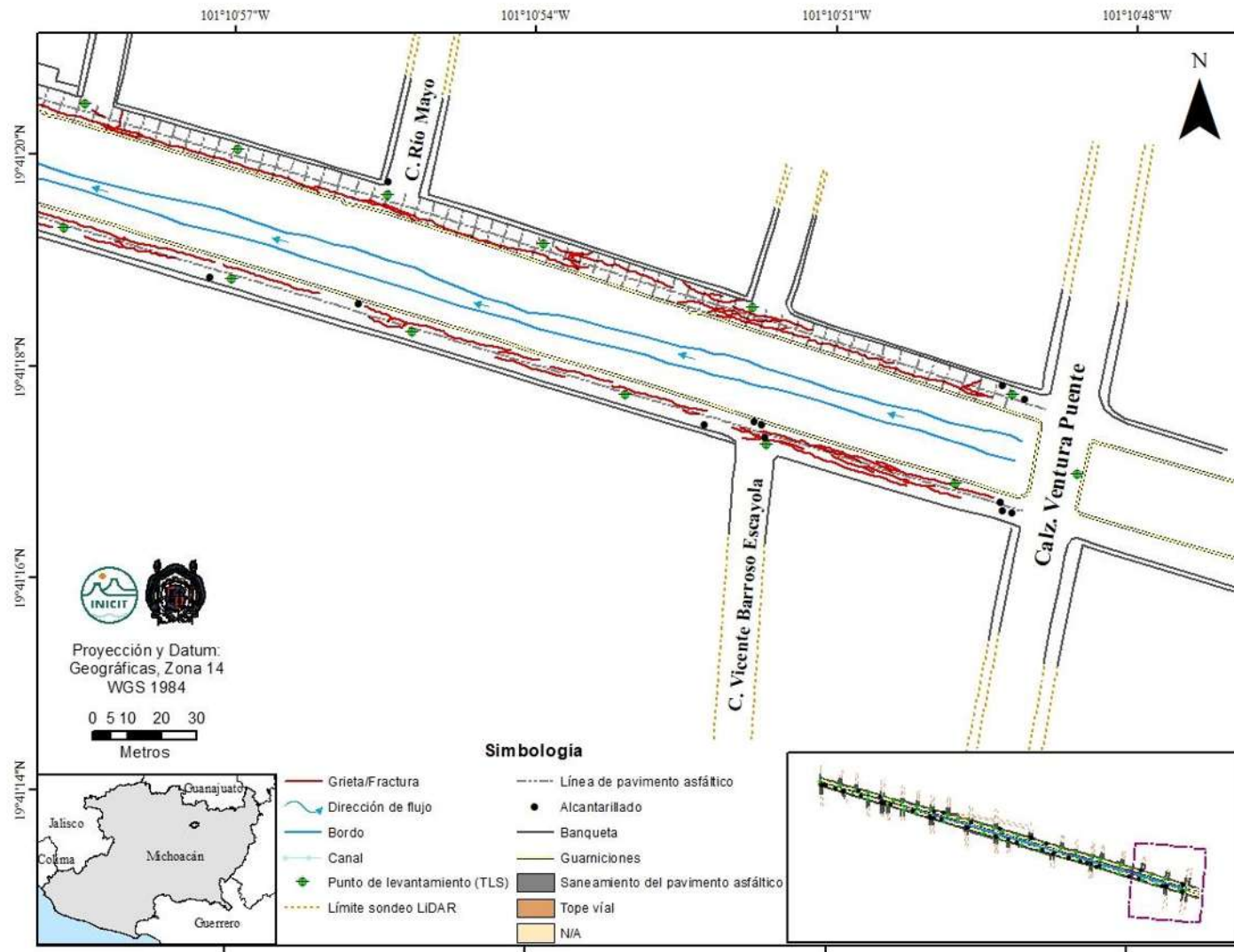


Figura A2. 7 Planimetría con inventario de fracturas, sección 7.

