



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE
LA TIERRA

**ESTUDIO DE DEFORMACIONES PROFUNDAS DE
LADERA EN EL ORIENTE DE MICHOACÁN, CASOS:
LAS PILAS, JUNGPEO Y TURUNDEO**

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL
TERRITORIO**

PRESENTA

Itzayana Torres Velázquez

ASESOR

Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal

Morelia, Michoacán

Febrero, 2023

DEDICATORIA

A mi familia y mi abue ♡

Por el apoyo incondicional y amor que me brindan,

el pilar más importante de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A **las instituciones**, Universidad Michoacana De San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) e Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT), por brindarme la oportunidad de realizar mi investigación en sus aulas, por el apoyo de todos los que integran el INICIT, por su amabilidad y comprensión, que hicieron mi estancia más amena.

A **mi asesor**, el Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, por darme la oportunidad de trabajar bajo su guía. Gracias por enseñarme el mundo de los procesos en remoción en masa, de innovar su estudio con nuevas metodologías, por confiar en mi capacidad, por retarme a salir de la zona de confort, por la paciencia y el apoyo en todo este proceso.

A la **Dra. Cecilia Irene Villaseñor Reyes**, porque sin saberlo, fue una gran guía en este proceso. Gracias por siempre apoyarme en las dudas que me surgieron.

A **mi comité tutorial**, por apoyarme y brindarme de su tiempo con sus valiosas observaciones hacia mi trabajo en los seminarios. Gracias por la paciencia.

A **mi comité sinodal**, el Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, Dra. Cecilia Irene Villaseñor Reyes, Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera, Dr. Pedro Corona Chávez, Dr. Luis Miguel Morales Manilla y Dr. Gerardo Rodríguez Torres, por aceptar ser parte de este proceso tan importante, por brindarme tiempo para revisar y por sus valiosos comentarios.

Al **Dr. Luis Miguel Morales Manilla**, por mostrarme por primera vez el mundo de los procesos en remoción en masa en la licenciatura, después de eso, fueron de gran interés para mí. No lo sabía, pero su pasión y paciencia, iniciaron esto. Gracias infinitas.

A **mis profesores**, el Dr. Pedro Corona Chávez, la Dra. Cecilia Irene Villaseñor Reyes, la Dra. Luisa Nicté Equihua, el Dr. Ángel Gregorio Figueroa, y la Dra. Erna Martha López Granados, por todo el tiempo y pasión que les dedicaron a sus clases, el conocimiento brindado y la paciencia.

A **mis compañeros y amigos**, Elesbaan, Lupe, Kari, Nestor, Karlita, Ruth, Memo, Lolita, Lucy y Circe, por apoyarme en tareas, cuando necesite un amigo, por los pasteles de cumpleaños, por las salidas a los cerros y las risas que nunca faltaron. En especial quiero agradecer a Elesbaan y Kari, por siempre estar, ser tan buenos conmigo y acompañarme a campo. Y a Liz porque a pesar del tiempo y la distancia siempre me ha motivado a dar lo mejor de mí.

A **mi familia y seres queridos**, a mis papás por siempre estar a mi lado, su apoyo, su amor, sus abrazos. A mis hermanos, que son mis mejores amigos. A Pedro, por todo su amor y paciencia. Sin ustedes y su apoyo emocional este trabajo no habría sido posible. Gracias infinitas, los amo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xi
Resumen	1
<i>ABSTRACT</i>	2
1. Introducción	4
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Objetivo	6
1.3. Hipótesis	6
2. Marco teórico	7
2.1. Deformación gravitacional profunda de roca	8
2.2. Mecanismo	10
2.3. Peligrosidad	11
3. Antecedentes	13
3.1. Antecedentes históricos	13
3.2. Técnicas de estudio	16
3.3. Monitoreos con ELT	19
4. Área de estudio	20
4.1. Localización	20
4.2. Clima	21
4.3. Sismicidad	22
4.4. Hidrografía	25
4.5. Edafología	27
4.6. Uso de suelo	27
4.7. Geomorfología	30
4.8. Marco Geológico	34
4.8.1. Geología local	36
5. Metodología	44
5.1 FASE 1: Implementación SIG	45

5.2 FASE 2: Mapa inventario.....	45
5.3 FASE 3: Delimitación PRM de estudio	46
5.4 FASE 4: Monitoreos con Escáner Láser Terrestre (TLS)	46
5.4.1 Adquisición	47
5.4.2 Georreferenciación	51
5.4.3 Registro	51
5.4.4 Clasificación o limpieza	56
5.5 Procesamiento de datos corregidos	58
5.5.1 Morfología, morfometría y mapas inventarios locales	58
5.5.2 Cloud To Cloud (C2C).....	60
5.5.3 Cinemática.....	61
6. Resultados y discusiones.....	62
6.1 Mapa inventario de cuerpos inestables.....	62
6.2 Deformación de ladera rocosa Turundeo, Tuxpan	64
6.2.1 Morfología y morfometría.....	64
6.2.2 Cinemática.....	70
6.2.3 Discusión.....	77
6.3 Deslizamiento rocoso Jungapeo	82
6.3.1 Morfología y morfometría.....	82
6.3.2 Cinemática.....	85
6.3.3 Discusión.....	92
6.4 Deslizamiento complejo Las Pilas	95
6.4.1 Morfología y morfometría.....	96
6.4.2 Cinemática.....	99
6.4.3 Discusión.....	108
7. Conclusiones y recomendaciones.....	111
Anexo 1	113
Anexo 2	117
Bibliografía	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de Mencl para describir el comportamiento a profundidad de un flujo de roca. 1) zona de deformación viscosa. 2) Zona cedida por deslizamiento. 3) el cizallamiento en la zona frágil se adapta a la disminución de volumen en la zona dúctil. Tomada de Mencl, 1968.....	11
Figura 2. Trabajos realizados anteriormente en el cuerpo inestable de Las Pilas. a) Mapa de uso de suelo y ubicación de puntos GPS de Villaseñor-Reyes, 2019. b) grietas en la infraestructura y c) grietas en el terreno documentadas en el año 2012 (Hernández-Madrigal y Garduño-Monrroy, 2012; Villaseñor-Reyes, 2019).....	14
Figura 3. Trabajos realizados anteriormente en Jungapeo (Villaseñor-Reyes, 2019) a) mapa de uso de suelo, inventario de PRMs y puntos GPS. b) y c) grietas de tensión sobre la ladera afectada.	15
Figura 4. Trabajos realizados anteriormente en Turundeo. a) Mapa realizado durante la construcción de la carretera (Triada, 2000), el área delimitada en este mapa corresponde a Proceso de Remoción en Masa secundario, asignado con el número 1 en la Figura 32. b) y c) grietas de tensión documentadas durante el trabajo del Medina (2014).	16
Figura 5. Mapa en el que integran los tres cuerpos inestables: Turundeo, Jungapeo y Las Pilas.	20
Figura 6. Precipitación media para cada mes los años 2020, 2021 y 2022, en Michoacán.....	22
Figura 7. Mapa hidrológico que muestra las regiones hidrológicas (RH). RH18: Balsas, RH12: Lerma-Santiago, RH17: costas de Michoacán, y RH 16: Armería Coahuayana. Así como las corrientes de agua cercanas a la zona de estudio y los ríos que erosionan el pie de monte.	26
Figura 8. Uso de suelo de los cuerpos inestables. a) Vista panorámica de las Pilas, en donde se observa la distribución de cultivos de chayote, guayaba y aguacate. b) Vista panorámica de Turundeo, en donde se observan algunos cultivos de la parte superior. c) Vista a contraescarpe de los cultivos de las Pilas. d) Imagen del flujo de agua en el riego rodado en cultivos de chayotes en Turundeo. e) Vista de cultivos de aguacate en Jungapeo.	29
Figura 9. Mapa geológico de la zona de estudio, el cual abarca desde el norte de Tuxpan hasta la presa El Bosque al sureste de Zitácuaro. Modificado de: Israde-Alcántara & Martínez, 1986; Pasquare et al., 1991; Corona-Chávez, 2000; Blatter et al., 2001; Bernal-Hernández et al., 2019; Corona-Chávez, en proceso de publicación).....	41
Figura 10. Litología presente en el cuerpo inestable de Turundeo. a) y b) Depósito de deslizamiento. c) Riolita fracturada. d) Riolita con estructuras de flujo e) Textura porfídica de la riolita.	42

Figura 11. Litología del cuerpo inestable de Las Pilas a) clastos de andesita en el escarpe cerca de las casas b) clasto de andesita en el escarpe superior. c) Rodado de andesita con vesículas. d) Bloque de andesita con estructuras de flujo.....	43
Figura 12. Diagrama representativo de la metodología que se utilizada en este trabajo.....	44
Figura 13. Implementación del SIG a) MDE escala 1:10 000. b) Mosaico generado a partir de 12 cartas del MDE. c) Modelo de sombras generado a partir del mosaico.	45
Figura 14. Escáner láser terrestre utilizado en este trabajo.	46
Figura 15. Área que abarca el escáner de los sitios en estudio (polígono azul y sitio en dónde se colocó el escáner (cuadrado rosa). a) Jungapeo, b) Turundeo y c) Las Pilas.....	47
Figura 16. Imágenes de campo en Las Pilas. a) escáner laser terrestre, b) reflectores utilizados en campo, c) tornillo que se coloca en un punto fijo, y se colocan los reflectores en el mismo punto..	48
Figura 17. Imágenes de campo de Turundeo. a), b), d) tres de los reflectores utilizados en campo, c) tornillo que se coloca en un punto fijo para colocar los reflectores. e) Uno de los puntos de escaneo.	49
Figura 18. Imágenes de campo de Jungapeo. a), b), d) reflectores utilizados en campo. b) escáner laser terrestre. c) tornillo que se coloca en un punto fijo, y se colocan los reflectores en el mismo punto.....	50
Figura 19. Targets y puntos naturales utilizados en el registro grueso. a) Jungapeo, b) Turundeo y c) Las Pilas.	52
Figura 20. Estimación de la correspondencia entre la nube de referencia no deformada P (rojo) y la nube deformada Q (azul). Tomada de Jafari (2016).	54
Figura 21. Nubes de puntos antes y después de realizar el registro. Se puede notar el desplazamiento que hay entre las nubes antes de realizar el registro.....	55
Figura 22. Clasificación de nubes de puntos de Jungapeo en RiSCANPRO. a) Nube completa obtenida con el ELT. b) Nube de puntos delimitada al PRM. c) Perfil en nube de puntos delimitada, sin clasificar, siguiendo el perfil A-A' en (b). d) Perfil de nube de puntos clasificada (sin vegetación) siguiendo el perfil A-A' en (b).....	57
Figura 23. Clasificación de nubes de puntos de Turundeo en RiSCANPRO. a) Nube completa obtenida con el ELT. b) Nube de puntos delimitada al PRM. c) Perfil en nube de puntos delimitada, sin clasificar, siguiendo el perfil A-A' en (b). d) Perfil de nube de puntos clasificada (sin vegetación) siguiendo el perfil A-A' en (b).....	57
Figura 24. Modelos de sombras generado en Global Mapper, a partir de las nubes de puntos. a) Jungapeo b) Turundeo.....	58

Figura 25. Insumos utilizados para delimitar los cuerpos inestables. a) Imagen satelital. b) Modelo de sombras escala 1:10 000 y curvas de nivel. c) Nubes de puntos.	59
Figura 26. Distancia medida del vecino más cercano. Tomada de Jafari, 2016.....	60
Figura 27. Inventario de deslizamientos del área de estudio.....	63
Figura 28. Vista panorámica del cuerpo inestable de Turundeo.	64
Figura 29. Deformación profunda de ladera de Turundeo. a) Perfil topográfico, muestra las características estructurales: fracturas, superficies de deslizamiento inferidas, canales de agua (triángulos invertidos) y río Taximaroa en la parte inferior. b) Dimensiones aproximadas del cuerpo inestable, tomando de referencia el trabajo de WP/WLI4 (1993) (Anexo 1). c) Ubicación del perfil topográfico obtenido A-B. d) Dimensiones de la deformación, obtenida a través de CloudCompare.	65
Figura 30. Nubes de puntos de Turundeo. a) Fracturas de flanco izquierdo, delimitadas con líneas punteadas blancas. b) Fracturas del PRMs del centro, delimitadas con líneas punteadas amarillas. 66	
Figura 31. a) b) Fracturas sobre la carretera Morelia-Toluca. c) Porción de asfalto de color más oscuro, indicando un ejemplo de los arreglos constantes de la carretera. d), e) y f) Fracturas en el canal inferior.	68
Figura 32. Mapa inventario del cuerpo inestable de Turundeo, en el cual se delimitan los PRMs que se desarrollan dentro de este. El PRM1 corresponde al verde, PRM2 color amarillo, PRM3 color rojo y PRM4 el amarillo de menor dimensión.....	69
Figura 33. Velocidades de desplazamiento mínimos y máximos de los tres PRMs del cuerpo de Turundeo. con las velocidades obtenidas en los dos monitoreos.	72
Figura 34. Análisis de distancias de Turundeo, mediante el método C2C, entre las nubes de 2020 y 2021. En los incisos b, c, y d, los colores verdes indican zonas estables, los colores rojos zonas mayor desplazamiento. a) Distancia absoluta, los colores azules indican zonas estables, y los colores rojos zonas con mayor desplazamiento. b) Distancia en X. c) Distancia en Y. d) Distancia en Z.....	73
Figura 35. Análisis de distancias de Turundeo, mediante el método C2C, entre las nubes de 2021 y 2022. En los incisos b, c, y d, los colores verdes indican zonas estables, los colores rojos zonas mayor desplazamiento. a) Distancia absoluta, los colores verdes son zonas estables y las rojas zonas con mayor desplazamiento. b) Distancia en X. c) Distancia en Y. d) Distancia en Z.	74
Figura 36. Perfil topográfico A-A' de Turundeo, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.....	75
Figura 37. Perfil topográfico B-B' de Turundeo, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	77

Figura 38. Perfil topográfico desde base a cima del cuerpo de Turundeo, en el cual se aprecia la geología del sitio.	79
Figura 39. Comparación de desplazamiento 2020 -2021 vs mapa inventario de Turundeo. Se realizó tomando solo una parte de puntos de la nube original.	80
Figura 40. Comparación de desplazamiento 2020 -2022 vs mapa inventario de Turundeo. Se realizó tomando solo una parte de puntos de la nube original.	81
Figura 41. Vista del cuerpo inestable de Jungapeo.	82
Figura 42. Deslizamiento rocoso de Jungapeo. a) Perfil topográfico, muestra las características estructurales: fracturas, superficies de deslizamiento inferidas y corriente de agua secundaria en la parte inferior. b) Dimensiones aproximadas del cuerpo inestable, tomando de referencia el trabajo de WP/WLI4 (1993) Anexo 1. c) Ubicación del perfil topográfico obtenido A-B. d) Dimensiones de la deformación, obtenida a través de CloudCompare.	83
Figura 43. Mapa inventario del cuerpo inestable de Jungapeo, en el cual se delimitan los PRMs que se desarrollan dentro de este, así como vectores de desplazamiento. El PRM 1 corresponde al cuerpo de color naranja, el PRM 2 color verde, PRM 3 color amarillo; mientras que, lo de color rojo pertenecen a cuerpos generados dentro del PRM 1.....	84
Figura 44. Velocidades de desplazamiento mínimos y máximos de los tres PRMs del cuerpo de Jungapeo, con las velocidades obtenidas en los dos monitoreos.....	88
Figura 45. Análisis de distancias de Jungapeo, mediante el método C2C, entre las nubes de 2015 y 2016. En los incisos a, b y c, los colores verdes corresponden a zonas estables y los colores rojos a zonas con mayor desplazamiento. a) Distancia en Z. b) Distancia en X. c) Distancia en Y. d) Distancia absoluta, los colores azules corresponden a zonas estables y los colores rojos a zonas con mayor desplazamiento.....	89
Figura 46. Análisis de distancias de Jungapeo, mediante el método C2C, entre las nubes de 2016 y 2020. En los incisos a, b y c, los colores verdes corresponden a zonas estables y los colores rojos a zonas con mayor desplazamiento. a) Distancia en Z. b) Distancia en X. c) Distancia en Y. d) Distancia en Z, los colores azules corresponden a zonas estables y los colores rojos a zonas con mayor desplazamiento.....	90
Figura 47. Perfil topográfico A-A' de Jungapeo, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	91
Figura 48. Perfil topográfico B-B' de Jungapeo, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	92
Figura 49. Comparación de desplazamiento 2015 -2016 vs mapa inventario de Jungapeo. La simbología del mapa inventario puede ser consultada en la Figura 44. Los puntos se obtuvieron de la nube original, exportando una nube con menor cantidad de puntos.	93

Figura 50. Comparación de desplazamiento 2016 -2020 vs mapa inventario de Jungapeo. La simbología del mapa inventario puede ser consultada en Figura 44. Los puntos se obtuvieron de la nube original, exportando una nube con menor cantidad de puntos.	95
Figura 51. Vista del cuerpo inestable de Las Pilas.....	96
Figura 52. Deslizamiento complejo de Las Pilas. a) Perfil topográfico, muestra las características estructurales: fracturas, superficies de deslizamiento inferidas, canal de agua (triángulo invertido) y río Grande en la parte inferior (Modificado de Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy, 2012). b) Dimensiones aproximadas del cuerpo inestable, tomando de referencia el trabajo de WP/WLI4 (1993) (Anexo 1). c) Ubicación del perfil topográfico obtenido A-B. d) Dimensiones de la deformación, obtenida a través de CloudCompare.....	97
Figura 53. Fracturas que se observan en el cuerpo de Las Pilas. a) y b) Fracturas sobre casas en la parte superior del escarpe principal del PRMs estudiado en este trabajo. c) Fractura sobre casa en el bloque en rotación del PRMs. d) Grietas sobre el terreno perteneciente a la iglesia de la localidad. e) Fractura sobre el escarpe del PRMs.	98
Figura 54. Mapa inventario del cuerpo inestable de Las Pilas, en el cual se delimitan los PRMs que se desarrollan dentro de este, así como vectores de desplazamiento. Los PRM verdes corresponden a cuerpos cartografiados por Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy, 2012, mientras que los cuerpos de color naranja (PRM 1) y rojos (PRM 2 Y 3) corresponden a los analizados en este trabajo.	99
Figura 55. Velocidades de desplazamiento mínimos y máximos de los tres PRMs del cuerpo de Las Pilas con las velocidades obtenidas en los dos monitoreos. En el caso del PRMs 1 se traslapa con los datos del PRMs 2.	102
Figura 56. Análisis de distancias de Las Pilas, mediante el método C2C, entre las nubes de 2020 y 2021. Para los incisos b y c, los colores verdes indican zonas estables, sin desplazamiento, y los colores rojos mayor desplazamiento. a) distancia absoluta, los colores azules indican estabilidad y los colores rojos mayor desplazamiento. b) distancia en Z. c) distancia en X.....	103
Figura 57. Análisis de distancias de Las Pilas, mediante el método C2C, entre las nubes de 2021 y 2022. Para los incisos b y c, los colores verdes indican zonas estables, sin desplazamiento, y los colores rojos mayor desplazamiento. a) distancia absoluta, los colores azules indican estabilidad y los colores rojos mayor desplazamiento. b) distancia en Z. c) distancia en X.....	104
Figura 58. Perfil topográfico A-A' de Las Pilas, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.	105
Figura 59. Análisis de distancias del flanco izquierdo de Las Pilas, mediante el método C2C, entre las nubes de 2021 y 2022. a) Distancia absoluta, en la figura miniatura se observa con un recuadro amarillo el sitio en el cual se obtuvo el escaneo, así misma muestra de donde se obtiene el perfil de la Figura 61. Los colores azules indican zonas estables y los colores rojos mayor desplazamiento. b)	

Distancia en Z, los colores verdes indican zonas estables y los colores rojos zonas con mayor desplazamiento. c) Flanco en enero de 2022. d) Flanco en septiembre de 2022.....	107
Figura 60. Perfil topográfico del flanco de las Pilas a partir de las nubes de puntos de 2021 y 2022.En la Figura 60 se observa el sitio del cual se obtuvo este perfil.	107
Figura 61. Comparación de desplazamiento 2020 -2021 vs inventario de Las Pilas. La simbología del mapa inventario puede ser consultada en la Figura 32. Las nubes de puntos son una muestra de la nube de puntos original.	109
Figura 62. Comparación de desplazamiento 2021 -2022 vs mapa inventario de Las Pilas. La simbología del mapa inventario puede ser consultada en la Figura 32. Las nubes de puntos son una muestra de la nube de puntos original.	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación PRM de acuerdo a la propuesta de EPOCH (1993).	7
Tabla 2. Clasificación propuesta por Hungr et al., 2014, a partir de la clasificación de Varnes (1978).	8
Tabla 3. Precipitación en el estado de Michoacán de 2010 a 2021. Fuente: CONAGUA.	21
Tabla 4. Sismos de $M_w > 5$, en los últimos 86 años, en el estado de Michoacán.	24
Tabla 5. Datos utilizados en la adquisición de las nubes de puntos de cada PRM escaneado.	50
Tabla 6. Errores obtenidos en el registro grueso.	53
Tabla 7. Errores obtenidos en el registro fino.	55
Tabla 8. Cantidad de puntos obtenidos totales y clasificados, después de recortar y eliminar puntos manualmente.	58
Tabla 9. Velocidad de desplazamiento obtenidas por Medina (2014), comparadas con rangos de desplazamientos totales obtenidos en los monitoreos de este trabajo. Se utilizaron los PRMs como parámetro principal, debido a que corresponden a las zonas con mayores desplazamientos.....	71
Tabla 10. Velocidades anuales obtenidas a partir de los monitoreos realizados en este trabajo, así como en el monitoreo de Medina (2014).	71

Tabla 11. Velocidad de desplazamiento obtenidas anteriormente por Villaseñor-Reyes (2019), comparadas con rangos de desplazamientos absolutos obtenidos en los monitoreos de este trabajo. Se utilizaron los PRMs como parámetro principal, debido a que corresponden a las zonas con mayores desplazamientos. 87

Tabla 12. Velocidades anuales obtenidas a partir de los monitoreos realizados en este trabajo, así como en el monitoreo de Villaseñor-Reyes (2019)..... 87

Tabla 13. Velocidad de desplazamientos obtenidos anteriormente por Villaseñor-Reyes, (2019) comparadas con rangos de desplazamientos absolutos obtenidos en los monitoreos de este trabajo. Se utilizaron los PRMs como parámetro principal, debido a que corresponden a las zonas con mayores desplazamientos. 101

Tabla 14. Velocidades anuales obtenidas a partir de los monitoreos realizados en este trabajo, así como en el monitoreo de Villaseñor-Reyes (2019)..... 101

RESUMEN

Los procesos de remoción en masa (PRM) son fenómenos que cada año afectan a la población y a su infraestructura, produciendo lamentables pérdidas humanas y económicas. Las deformaciones profundas de ladera son uno de los PRM considerados particularmente peligrosos, ya que presenta un movimiento lento durante largos periodos de tiempo, que puede incrementarse súbitamente durante un evento detonante (precipitación de lluvia o sismo). Tal es el caso de los cuerpos inestables de Turundeo, Jungapeo y Las Pilas, que afectan directamente a localidades y vialidades del oriente de Michoacán. Estos cuerpos presentaron reactivación durante las precipitaciones atípicas de febrero del 2010, generando la formación de grietas en diversas partes de las laderas involucradas, así como formación de PRM secundarios. Esto a su vez ha generado el agrietamiento de la carpeta asfáltica de la carretera Federal N° 15 (Morelia-Toluca), en las localidades y cultivos de los sitios de Turundeo, Las Pilas y Jungapeo. Este escenario geológico, pone en riesgo a poblaciones cercanas, infraestructura y personas que transitan regularmente las zonas, debido al desplazamiento acelerado que pudieran presentar estos cuerpos bajo ciertos factores detonantes. A pesar de haber sido monitoreados por otras técnicas previamente, surge la necesidad de realizar un monitoreo con mayor precisión y con mejor distribución espacial de los desplazamientos de los PRM, a través de nubes puntos 3D adquiridas mediante un escáner laser terrestre, que alcanza una resolución de 8 mm. Se realizaron tres monitoreos en cada sitio que permitieron caracterizar morfométrica y morfológicamente los cuerpos inestables, así como, obtener su cinemática y velocidad de deformación. A partir de los resultados se identificó que los PRM presentan características de deformaciones profundas de ladera para el caso de Turundeo, deslizamiento rocoso para Jungapeo, y deslizamiento complejo para las Pilas. En cuanto a su velocidad de desplazamiento, el cuerpo más activo es Turundeo, con un desplazamiento absoluto de 0.25 a 1 m en los primeros seis meses, en los siguientes ocho meses se desplazó solo 30 cm. Le sigue Jungapeo con un desplazamiento absoluto de 1.5 m de 2015 a 2016 y de 2016 a 2020 (cuatro años) se desplazó 1 m. Por último, Las Pilas se desplazó de 0.6 a 18 cm, y en los siguientes ocho meses 8 cm. Estas velocidades de desplazamiento están siendo condicionadas y detonadas por el sistema de riego rodado utilizado en Turundeo y Las Pilas, y por la litología para el caso de Jungapeo. Se propone cambiar el sistema de riego y concientizar a las localidades debido a la influencia que este sistema de riego representa en estos cuerpos inestables. Por otro lado, a pesar de que la lluvia no jugó un papel importante en estos sitios durante el periodo de medición, es necesario seguir monitoreándolos, debido al tipo de

precipitación de la zona, y que históricamente se han presentado lluvias atípicas que han detonado aumento en los desplazamientos de los tres cuerpos de estudio. Sin duda los resultados logrados en este trabajo serán de gran importancia para los diferentes instrumentos de planeación de desarrollo urbano y mitigación del riesgo de desastre.

Palabras clave: Escáner laser terrestre (TLS), procesos de remoción en masa (PRM), deformaciones gravitacionales profundas, morfología y morfometría.

ABSTRACT

Landslides are phenomena that affect the population and its infrastructure every year, that lead regrettable human and economic losses. Deep slope deformations are one landslide type considered particularly dangerous, since they present a slow movement during long periods of time, which can suddenly increase during a triggering event (precipitation or earthquake). Such is the case of the unstable slopes of Turundeo, Jungapeo and Las Pilas, which directly affect localities and roads in eastern Michoacán. These bodies were reactivated during the atypical rainfall of February 2010. This process has generated the formation of cracks in various parts of the slopes, as well as the formation of secondary landslides. Additionally cracking of the asphalt on Federal Highway No. 15 (Morelia-Toluca), was developed in the localities and crops out in the towns of Las Pilas and Jungapeo. Neighborhood and people who regularly travel through these areas are consequently at risk, due to the displacement that these bodies could present under certain triggering factors. In spite of being monitored by other techniques previously, more precise monitoring is needed with better spatial distribution of the displacements of the landslides, through 3D point clouds acquired by means of a terrestrial laser scanner, which reaches a resolution of 8 mm. Three monitorings were carried out at each site, which allowed to characterize morphometrically and morphologically the unstable bodies, as well as to obtain their kinematics and deformation velocity. From the results, it was identified that the landslides show deep slope deformations behavior in the case of Turundeo, rock slide for Jungapeo, and complex landslide for Pilas. Regarding its displacement velocity rate, the most active body is Turundeo, with absolute displacement of 0.25 to 1 m in the first six months, in the following eight months it displaced only 30 cm. It is followed by Jungapeo with an absolute displacement of 1.5 m from 2015 to 2016 and from 2016 to 2020 (four years) it displaced 1 m. Finally, Las Pilas

shifted from 0.6 to 18 cm, and in the following eight months 8 cm. These displacement velocities are being conditioned and triggered by the type of irrigation used in Turundeo and Las Pilas, and the lithology in the case of Jungapeo. It is important to consider changing the irrigation system and to make the localities aware of the implications of this irrigation system on these unstable bodies. On the other hand, although apparently rain did not play an important role in this study, it is necessary to continue monitoring them, due to the type of precipitation in the area, and that historically there have been atypical rains that have triggered an increase in the displacements of the three study bodies.

Key words: Terrestrial laser scanner (TLS), mass removal processes, deep gravity deformations, morphology and morphometry

1. INTRODUCCIÓN

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) han sido definidos por diferentes autores utilizando varios términos. Hutchinson (1968) utilizó el término deslizamiento (*landslide*) para referirse al movimiento ladera abajo de masas de suelo o roca, que ocurre en una superficie de cizallamiento en los límites de la masa desplazada. Varnes (1978) por su parte utilizó el término movimientos de ladera (*slope movement*), y lo definió como un movimiento hacia abajo y hacia afuera de materiales formadores de ladera, bajo la influencia de la gravedad. Dikau et al., (1996) utilizaron el término remoción en masa (*mass movement*) que hace referencia a un proceso que no requiere un medio de transporte como agua, aire o hielo. En este trabajo entenderemos como PRM (*mass movement processes* (por sus siglas en inglés), por sus siglas en inglés) al movimiento en masa y hacia abajo, de materiales (p. ej. rocas, suelos, rellenos o una combinación) que conforman una ladera, influenciados por la gravedad.

Para el estudio de estos fenómenos se tienen diversas clasificaciones, siendo la propuesta por el programa europeo EPOCH (1993), la cual fue generada a partir de las clasificaciones de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), es la más simple debido a que describe de mejor manera el tipo de movimiento y materiales involucrados. Con base en esta clasificación los tipos de PRM se subdividen de acuerdo al tipo de material involucrado, destacando por su magnitud y tipo de movimiento los flujos de rocas.

Los flujos de roca se caracterizan por tener límites laterales discontinuos y/o poco definidos, un volumen de masa en movimiento de millones de m³, con tasas frecuentes de deformación muy bajas (mm a cm/año) registradas a decenas de metros de profundidad (Soldati, 2013; Villaseñor-Reyes, 2019), por lo que suelen conocerse también como Deformaciones Gravitacionales Profundas de Laderas (DGPL), Deformaciones Profundas de *Creep* en Roca (*Deep Seated Gravitational Creep*), o simplemente Flujos de roca (Bisci y Sorriso-Valvo, 1996). Los rasgos morfológicos que los caracterizan están asociados a deformaciones de tensión tales como crestas dobles, escarpes, trincheras y grietas; en la parte media puede presentar contra-escarpes; y en la parte baja se generan estructuras de compresión como abultamiento, pliegues concéntricos y fracturamiento radial (Agliardi et al., 2012; Villaseñor-Reyes, 2019).

Las deformaciones profundas de ladera desarrollan PRM secundarios dentro de la masa de roca afectada y son de alta peligrosidad debido a su lenta evolución, ya que bajo efectos sísmicos o condiciones meteorológicas excepcionales como lluvias intensas y/o prolongadas, pueden evolucionar de manera repentina y generar un movimiento rápido, ocasionando pérdidas humanas y materiales (Agliardi et al., 2012; Villaseñor-Reyes, 2019).

Michoacán presenta características geomorfológicas que permiten la generación de PRM, aunados a perturbaciones de origen antrópico que se llevan a cabo en las laderas como el cambio de uso de suelo o cambio de geometría, así como fenómenos naturales como lluvias atípicas. Tal es el caso de febrero de 2010, en el que se registraron lluvias 10 veces más copiosas en comparación con el mismo mes de otros años (CONAGUA, 2001 - 2010). Estas lluvias afectaron principalmente al oriente de Michoacán (Expansión, 2010; SEGOB, 2010), generando inundaciones, flujos de detritos y reactivación de PRM en la zona. Tal es el caso de tres laderas ubicadas en las localidades de Jungapeo, Las Pilas y Tuxpan, en donde, a partir de esto, se registraron cambios en la morfología del terreno, como la formación de abultamientos, hundimientos, que a su vez generan grietas sobre la superficie y edificaciones.

1.1. Planteamiento del problema

Las laderas inestables de Las Pilas, Jungapeo y Tuxpan, corresponden a PRM que amenazan la infraestructura y población de localidades rurales y urbanas del Oriente de Michoacán. En estudios como los de Villaseñor-Reyes (2019) y Medina (2014), se han implementado técnicas de monitoreo mediante tecnología GPS que han permitido la evaluación del desplazamiento en puntos de control específicos (3 a 7 puntos), para áreas de más de 100 000 m². Por lo que la medición limita la capacidad de registrar deformaciones con mayor precisión. Como técnica alternativa, se han realizado intentos de evaluar la deformación de estos cuerpos activos aplicando la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), encontrándose que el relieve abrupto con vegetación es una fuente importante de correlación en los datos por lo que no se lograron resultados satisfactorios (Villaseñor-Reyes, comunicación personal, 28 de octubre de 2021). En el presente trabajo se optó por evaluar la cinemática de estos cuerpos activos mediante la implementación de sistemas de alta resolución espacial como el Escáner Láser Terrestre, el cual permite detectar movimientos milimétricos del terreno y así obtener información con mayor precisión de la cinemática de estos cuerpos.

Está técnica ha sido asistida por una la cartografía a mayor detalle, así como el estudio de la cinemática que presentan estos cuerpos, con el objetivo de conocer y evaluar las deformaciones de estos cuerpos inestables activos: y de esta manera prevenir desastres naturales y pérdidas humanas,

por la falta de información de estos sitios. Es importante mencionar que se planea entregar un reporte de cada cuerpo inestable, a las autoridades correspondientes de cada localidad, para que se puedan seguir monitoreando estos sitios a futuro.

1.2. Objetivo

Evaluar la cinemática, morfometría y morfología de los flujos de rocas Jungapeo, Las Pilas y Tuxpan, mediante la implementación de un sistema de monitoreo multitemporal de alta resolución espacial.

Objetivos particulares

- Identificar y cartografiar deformaciones sobre la superficie inestable: escarpes principales y secundarios, terrazas, grietas, flancos.
- Obtener direcciones de desplazamiento de las DGPL y sus PRM secundarios.
- Monitorear la velocidad de desplazamiento de las áreas de estudio.

1.3. Hipótesis

En los últimos años, la tecnología ha avanzado de tal forma que nos ha permitido estudiar y monitorear PRM, sin embargo, estos métodos pierden calidad en algunas zonas en las que las condiciones del terreno no les permite obtener datos de toda el área, ya sea por la vegetación, la topografía o la extensión.

Dado que la cinemática de las deformaciones profundas de ladera de Turundeo, Jungapeo y Las Pilas, es compleja y heterogénea, es necesario implementar una nueva metodología que nos permita registrar con mayor detalle la cinemática de estos cuerpos inestables. Por lo que se propone la implementación de un monitoreo de gran resolución espacial como el escáner láser terrestre, el cual permitirá detectar movimientos casi imperceptibles del terreno. Y de esta forma correlacionar las características morfológicas y morfométricas con los factores detonantes, para identificar las condiciones estén favoreciendo en mayor medida al desplazamiento.

2. MARCO TEÓRICO

Los PRM son generados por factores condicionantes y detonantes, los cuales son de tipo interno y externo. Los factores condicionantes son generados por causas internas que disminuyen la resistencia de los materiales sin cambiar la tensión o esfuerzos. Estos factores usualmente son heredados de la naturaleza de la roca y sus estructuras, como la litología, fracturas y fallas (Varnes, 1978; Alcántara-Ayala, 2000).

En cambio, los factores detonantes son generados por causas externas que incrementan la tensión o esfuerzos sin modificar la resistencia de los materiales rocosos (Varnes, 1978; Alcántara-Ayala, 2000). Algunos de estos son los cambios geométricos de las laderas o taludes, esto generado por la erosión o cortes carreteros; otros factores son los sismos y lluvias atípicas (intensas y prolongadas) (Varnes, 1978).

La clasificación de los PRM es compleja y variada debido a que diferentes autores diseñan propuesta en función de enfoques particulares. Sin embargo, una de las clasificaciones más sencillas y completas es la que propone el programa EPOCH (1993) a partir de las clasificaciones de Varnes (1978) y Hutchinson (1998), y con base en el mecanismo de movimiento y tipo de material involucrado (Tabla 1). En este trabajo y dada la complejidad de los PRM de este estudio, se utiliza tanto la clasificación de EPOCH, como una nueva propuesta por Hungr et al., 2014 (

Tabla 2). Dentro de estas clasificaciones y para los fines de este trabajo, destaca el grupo de los flujos de roca, deslizamiento complejo y deformaciones profundas de ladera.

Tabla 1. Clasificación PRM de acuerdo a la propuesta de EPOCH (1993).

MECANISMO/MATERIAL	Roca	Derrubios	Suelo
Caídas	Caída de rocas	Caída de detritos	Caída de suelos
Vuelco	Vuelco de rocas	Vuelco de detritos	Vuelco de suelos
Deslizamiento rotacional	Individual, múltiple y sucesivo	Individual, múltiple y sucesivo	Individual, múltiple y sucesivo

Deslizamiento traslacional	Deslizamiento de rocas en bloque	Deslizamiento de derrubios	Deslizamiento de barro
Flujos	Flujo de rocas	Flujo de derrubios	Flujo de tierra, arena o suelo
Expansión lateral	Expansión lateral en rocas	Expansión lateral en derrubios	Expansión lateral en suelos
Complejo	Combinación de dos o más tipos		

Tabla 2. Clasificación propuesta por Hungr et al., 2014, a partir de la clasificación de Varnes (1978).

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Caídas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Caída de roca/hielo 	Caída de cantos rodados/escombros/limo
Vuelco	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vuelco de bloques de roca ▪ Vuelco flexural de roca 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vuelco de grava/arena/limo
Deslizamiento rotacional	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deslizamiento rotacional roca ▪ Deslizamiento planar de roca ▪ Deslizamiento en cuña de rocas ▪ Deslizamiento compuesto de rocas ▪ Deslizamiento irregular de rocas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deslizamiento planar de arcilla/limo <ul style="list-style-type: none"> ▪ Deslizamiento de grava/arena/escombros
Expansión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Expansión de rocas en pendiente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Expansión por licuefacción de arena/limo ▪ Expansión de arcilla
Flujos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Avalancha de roca/hielo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo seco de arena/limo/escombros <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo de escombros ▪ Flujo de lodo ▪ Inundación de escombros ▪ Avalancha de escombros <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo de tierra
Deformación de ladera	Deformación de ladera de montaña	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deformación de pendiente de suelo <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fluencia del suelo
	Deformación de ladera de rocas	

2.1. Deformación gravitacional profunda de roca

Las deformaciones profundas de rocas ocurren con una variedad de mecanismos que dependen de las condiciones del entorno en donde se desarrollan, por lo que existen varias sub clasificaciones; sin embargo, no existe una que se adapte a todas las situaciones posibles.

Existen varios términos que hacen referencia a las deformaciones profundas, entre estos están las siguientes opciones: flujos de roca, Deformación Gravitacional Profunda de Ladera (DGPL), sagging, deformación de ladera de montaña y deformación de ladera de rocas. Estos términos hacen referencia a movimientos de masas rocosas que evolucionan lentamente durante períodos de tiempo muy largos, y que afectan laderas enteras o flancos de valles (Dramis y Sorriso-Valvo 1994; Soldati, 2013; Pánek y Klimeš, 2016). Usualmente involucran laderas de 100 a 1000 m de altura con características morfológicas bien definidas (p.ej. trincheras, contra-escarpes, escarpes dobles).

Los rasgos morfológicos, así como el plano de falla, están influenciados principalmente por las estructuras primarias tectónicas de las laderas (p. ej. planos de estratificación, fallas) y actividad sísmica que pueda provocar una desestabilización o reactivar la deformación (Jomard *et al.*, 2014). A grandes rasgos, estas características geomorfológicas son las siguientes: en la parte alta se distinguen estructuras de tensión como crestas dobles, escarpes, trincheras, grietas y grabens; en la parte media pueden presentar contra-escarpes; y en la parte baja se generan estructuras de compresión como abultamiento, pliegues concéntricos y depresiones con y sin laguna (Audemard *et al.*, 2011; Agliardi *et al.*, 2012).

Desde un punto de vista de la cinemática y origen, estos tipos de deformaciones, son el resultado de una compleja interacción de diferentes factores y procesos que los controlan (Agliardi *et al.* 2012). Usualmente se relacionan con la relajación paraglacial de rocas masivas tras el retroceso de los glaciares, pero no en todos los casos ocurren por dicha causa, también se relacionan con tensiones topográficas de laderas de alto relieve, tensiones tectónicas, sacudidas sísmicas y erosión fluvial de parte baja de los taludes (Agliardi *et al.*, 2001; Agliardi *et al.*, 2009).

Hungr *et al* (2014), hace referencia a deformaciones de ladera de roca, como una deformación profunda con deformación de lenta a extremadamente lenta, de laderas de valles o colinas. Se caracterizan por desarrollar crestas en los taludes, grietas o fallas. Se forman sobre taludes relativamente pequeños constituidos por arcillas débiles, sobre todo si están cubiertas por una capa masiva más fuerte. Otras características de estas deformaciones incluyen el hundimiento de crestas, formación de rasgos de tensión, pre-corte por flexión de planos de estratificación (cuando estos existen) y levantamiento de los fondos de los valles.

Los términos más utilizados para nombrar este tipo de deformación son las DGPL y deformaciones de ladera de roca. La diferencia entre las deformaciones de ladera de roca y deformaciones gravitacionales profundas de ladera (DGPL) es la escala, ya que en la primera afecta a laderas de solo

decenas a cientos de metros y la segunda afecta montañas enteras a más de cien metros de profundidad (Hungar *et al.*, 2014).

2.2. Mecanismo

Las deformaciones profundas se caracterizan por presentar un comportamiento plástico a profundidad en la ladera. Por lo que autores como Soldati (2013), señalan que estas deformaciones carecen de superficie de deslizamiento continua o bien definida. Debido a que, en la parte central, existe una alta presión de confinamiento que no permite la formación de superficies de corte (Dikau, 1996). Sin embargo, otros autores sugieren la presencia de una superficie de deslizamiento bien definida, la cual es originada por estructuras heredadas como fallas, pliegues y estratificación, que favorecen al desarrollo de esta superficie de deslizamiento. (Dramis y Sorriso-Valvo, 1994; Crosta *et al.*, 2013; Pánek y Klimeš, 2016; Villaseñor-Reyes, 2019).

Para fines de este trabajo, utilizamos el modelo de Mencl (1968) (Figura 1), en el cual se propone que, en la parte central de la ladera existe una presión de confinamiento mayor producto de la carga litostática, y un esfuerzo desviador menor, por lo que se presenta una superficie de debilidad en donde la masa rocosa se deforma lenta y plásticamente de manera similar a la deformación de un fluido muy viscoso. Es decir, en la parte superior e inferior de la ladera, donde el confinamiento es menor, la masa rocosa se mueve a lo largo de una superficie de cizalla bien definida que afecta solo la parte superficial de la masa de roca deformada; mientras que, en profundidad, la mayor presión que se genera, induce una deformación plástica, que no necesariamente crea una superficie de deslizamiento.

La distribución de velocidades se asemeja a la de fluidos viscosos, los cuales no son homogéneos en todo el cuerpo inestable. Este tipo de movimiento es conocido como tipo *creep* o reptación, este es considerado como una deformación continua bajo tensión constante (Varnes, 1978). A largo plazo puede tener dos patrones de movimientos: *creep* lento y continuo, y movimientos episódicos discretos. Estos movimientos pueden operar de forma constante, generando diferentes etapas de aceleración, desaceleración y casi estabilización, por prolongados periodos de tiempo (Varnes, 1978; Pánek y Klimeš, 2016). Así como también se pueden presentar reactivaciones de una fase rápida, en presencia de lluvias extremas o sismos (Dikau, 1996).

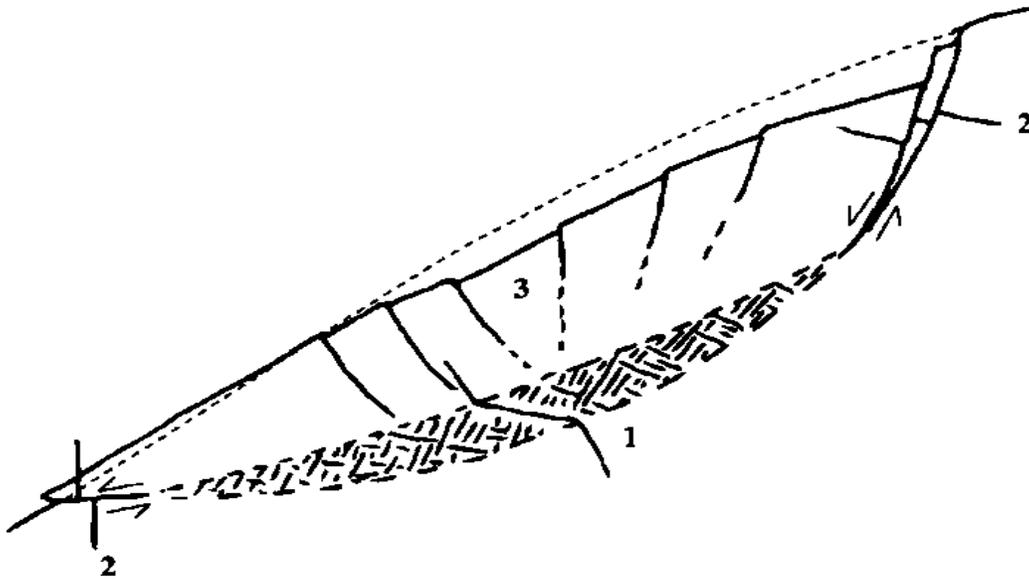


Figura 1. Modelo de Mencl para describir el comportamiento a profundidad de un flujo de roca. 1) zona de deformación viscosa. 2) Zona cedida por deslizamiento. 3) el cizallamiento en la zona frágil se adapta a la disminución de volumen en la zona dúctil. Tomada de Mencl, 1968.

2.3. Peligrosidad

Las deformaciones profundas no se consideran como fenómenos peligrosos debido a que evolucionan lentamente. Sin embargo, no debe despreciarse el peligro que conllevan si estas inestabilidades colapsan. A pesar de la lentitud de su deformación, pueden generar daños estructurales, subterráneos y superficiales (p.ej. túneles, edificios, presas, vías terrestres) (Frattoni *et al.*, 2013). Además, de que pueden evolucionar de forma repentina, generando un deslizamiento de masa de movimiento rápido (Soldati, 2013) o facilitar el desarrollo de deslizamientos compuestos de rocas (Hungri *et al.*, 2014).

El movimiento lento durante periodos de tiempo prolongados, predispone el terreno para la formación de PRM secundarios como flujos, caídas y deslizamientos. Estos movimientos secundarios inducen una situación de peligro debido al potencial que tienen de desplazarse con altas velocidades, generando un riesgo para las localidades cercanas (Soldati, 2013; Villaseñor-Reyes, 2019).

A continuación, se mencionan algunos ejemplos en los que estas inestabilidades han generado daños a la población y a la infraestructura:

- En la falla de Denali, Alaska en 2002, donde un terremoto de 7.9 desencadenó miles de deslizamientos de tierra a lo largo de una falla de 300 km de longitud, pero concentrando la mayoría de deslizamientos a lo largo de 30 km. Así como desprendimientos cerca de la ciudad de Palmer (Jibson *et al.*, 2004).
- En Italia, el movimiento de las DGPL en el centro de los Alpes italianos, ha generado daños estructurales en las edificaciones en la zona. Desde daños leves, como grietas y caídas de rocas pequeñas en algunos edificios; hasta daños fuertes, como el fallo de muros, generando colapso de techos y pisos (Frattini *et al.*, 2013).
- En San Luis Potosí, México. En el cañón de Yerbabuena, un deslizamiento profundo, ha generado daños estructurales por más de 30 años a la carretera Federal 63 (Villaseñor-Reyes *et al.*, 2021).

3. ANTECEDENTES

Este capítulo aborda antecedentes históricos de algunos PRM que han afectado al país. Se divide en tres subcapítulos; el primero hace mención de los desplazamientos reportados anteriormente en los tres sitios de estudio; en el segundo, se menciona otras técnicas que usualmente son utilizadas para el estudio de este tipo de inestabilidades; por último, el monitoreo de PRM mediante el uso del Escáner Laser Terrestre (ELT).

3.1. Antecedentes históricos

Los PRM son catalogados como uno de los peligros naturales que generan daños importantes en muchas regiones del mundo (Huang *et al.* 2019). México, tiene características geográficas y geológicas que favorecen al desarrollo de estos fenómenos. Tal es el caso del deslizamiento de Teziutlán (Puebla) en 1999, donde el cerro del barrio Tlaxcala se desgajó sobre 40 casas; también está el caso del deslizamiento de tierra ocurrido en la comunidad La Pintada (Guerrero) de 2013, que registró pérdidas humanas y materiales dejando más de 379 damnificados (Ramos-Bernal *et al.*, 2015).

Michoacán también ha sido afectado por estos procesos debido a sus características morfológicas, aunadas a perturbaciones que se llevan a cabo en las laderas como el cambio de uso de suelo, cambio de geometría y fenómenos naturales como la precipitación. Esta última es un factor detonante importante de estos tipos de inestabilidades, un buen ejemplo son las lluvias atípicas del 2010.

Durante los últimos días de enero y los primeros de febrero, el Oriente de Michoacán fue afectado por lluvias atípicas provocadas por los frentes fríos No. 28 y 29. Se presentaron lluvias de baja intensidad, pero larga duración, esto generó una precipitación que representó el 35.8% de la media anual, es decir 358 mm, en tan solo 4 días (Figuroa-Miranda, 2013). Esta precipitación fue un factor detonante de diferentes PRM en masa al oriente de Michoacán, siendo uno de los más importantes el flujo de detritos de Anganguero (De la Luz, 2011; Figuroa-Miranda, 2013). Por otra parte, estas precipitaciones atípicas reactivaron y aceleraron a antiguos cuerpos inestables como los de Las Pilas (Zitácuaro), Jungapeo y Turundeo (Tuxpan).

El cuerpo inestable de Las Pilas, ubicado en la localidad del mismo nombre, comenzó a presentar un desplazamiento considerable en los años 50's, a partir de la construcción de un canal de mampostería que atraviesa la localidad de norte a sur y que forma parte del sistema Cutzamala (Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy, 2012). Al construirse sobre un terreno inestable, este canal presentó deformaciones continuas desde su construcción (p. ej. agrietamientos y fugas de agua). Las continuas fugas de agua detonaron un aumento en el desplazamiento de este cuerpo, lo que también generó daños estructurales en las casas de la localidad de las Pilas (Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy, 2012) (Figura 2).

Un estudio realizado por Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy, arrojó que para 2012, este cuerpo inestable presentó un desplazamiento de 2.7 m en dos años (2012-2013). Posteriormente, Villaseñor-Reyes (2019), mediante un monitoreo con GPS diferencial, obtuvo desplazamientos de 34 cm en la horizontal y 16 cm en la vertical, en un lapso de cuatro años (2013-2017).

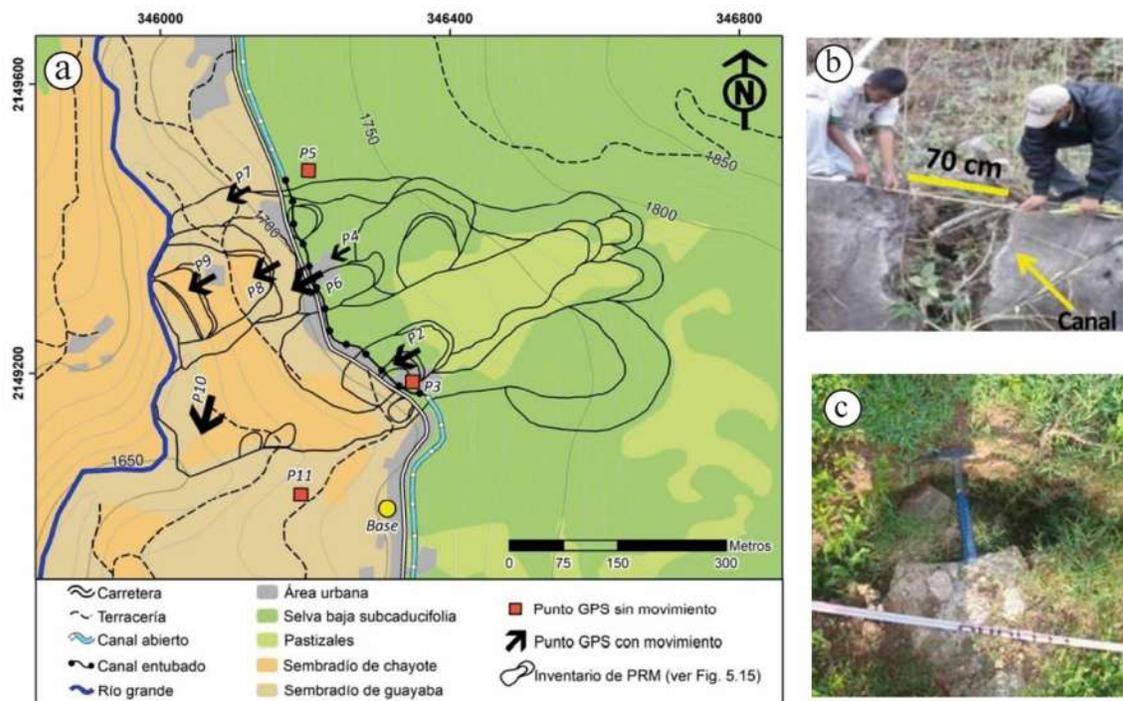


Figura 2. Trabajos realizados anteriormente en el cuerpo inestable de Las Pilas. a) Mapa de uso de suelo y ubicación de puntos GPS de Villaseñor-Reyes, 2019. b) grietas en la infraestructura y c) grietas en el terreno documentadas en el año 2012 (Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy, 2012; Villaseñor-Reyes, 2019).

El caso de Jungapeo, se encuentra al sureste de la localidad de Jungapeo. Es un cuerpo inestable que afecta a toda una ladera del Cerro donde se encuentra el deportivo. La identificación del movimiento de este cuerpo data desde más de 40 años, siendo en los 70's el año en el que relatan la ocurrencia de un derrumbe que destruyó huertas de la localidad llamada El Plan (Martínez-Marín, 2016). Un estudio previo de la zona reporta un movimiento acumulado de 6 m en la horizontal y 2 m en la vertical, en un lapso de dos años (2015-2017) (Villaseñor-Reyes, 2019) (Figura 3). A pesar de lo anterior, el Atlas de Riesgos Naturales de Jungapeo (2011) considera a esta ladera inestable sólo como “Área susceptible a deslizamiento”.

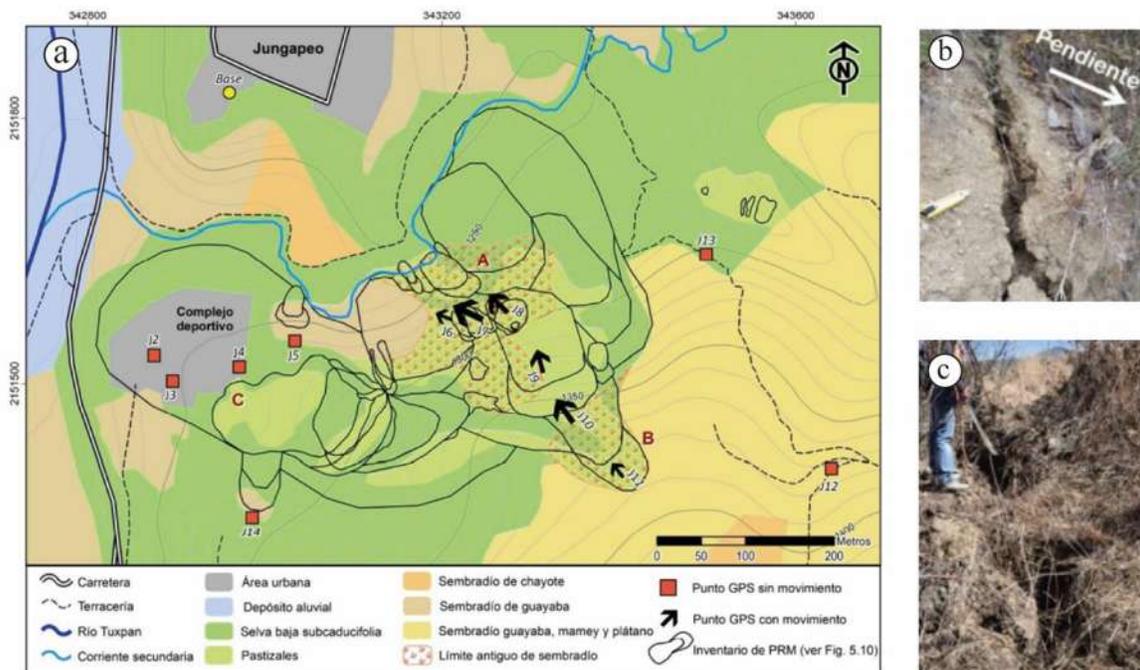


Figura 3. Trabajos realizados anteriormente en Jungapeo (Villaseñor-Reyes, 2019) a) mapa de uso de suelo, inventario de PRMs y puntos GPS. b) y c) grietas de tensión sobre la ladera afectada.

El caso de Turundeo se encuentra al norte de la localidad de Tuxpan y al sur de la localidad de Turundeo. Es una inestabilidad que afecta a la ladera noreste del C. El Molcajete. Este cuerpo afecta directamente a la carretera federal N° 15 Toluca-Morelia. Los estudios previos de sitio son escasos, Triada (Figura 4) realizó un estudio geotécnico para la construcción de una parte de la carretera, en el cual reportan al menos tres deslizamientos tentativamente activos, los cuales generan grietas de tensión sobre la carpeta asfáltica, y también se identificaron una serie de fallas recientes localizadas

al noreste del C. El Molcajete. Posteriormente, Medina (2014), obtuvo que este cuerpo se desplaza 3.5 cm/año, en dirección suroeste-noreste.

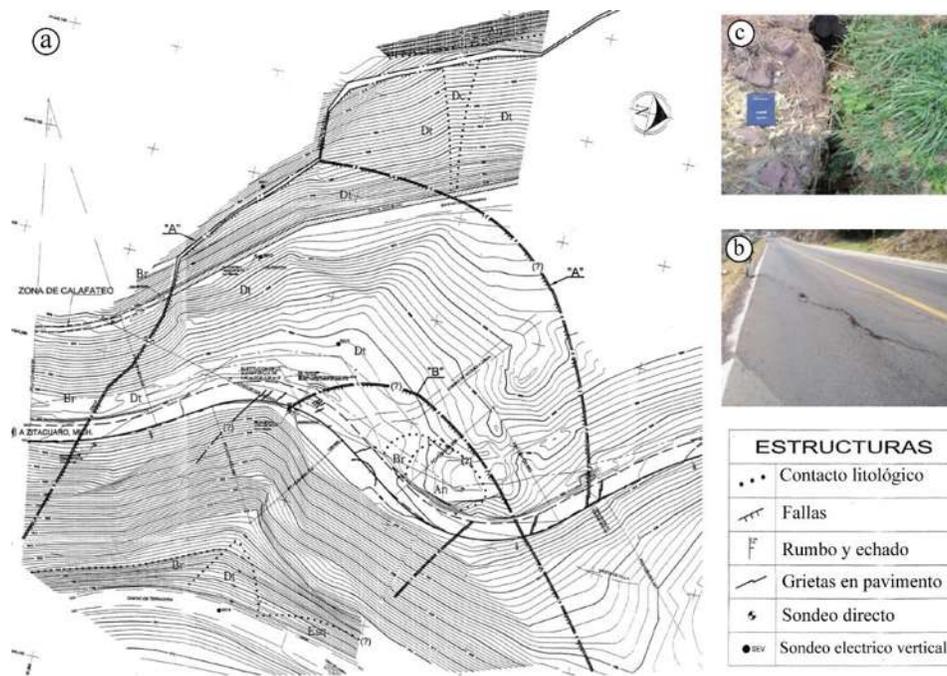


Figura 4. Trabajos realizados anteriormente en Turundeo. a) Mapa realizado durante la construcción de la carretera (Triada, 2000), el área delimitada en este mapa corresponde a Proceso de Remoción en Masa secundario, asignado con el número 1 en la Figura 32. b) y c) grietas de tensión documentadas durante el trabajo del Medina (2014).

En los tres casos, los cuerpos inestables han permanecido activos durante un largo tiempo, presentando movimientos lentos y algunos autores como Medina (2014) y Villaseñor-Reyes (2019) coinciden en que los factores condicionantes son los sistemas de riego (riego rodado) de las zonas de cultivo, mal manejo de recursos hídricos, el cambio de geometría de las laderas durante la construcción de carretera y las lluvias atípicas.

3.2. Técnicas de estudio

El monitoreo de los PRM se ha realizado mediante diferentes técnicas y sensores a través de los años, cuanto más avanza la tecnología, más opciones tiene la ciencia para estudiar estos fenómenos. Sin embargo, la utilidad de estas técnicas radica en la resolución espacial y temporal que requiera el trabajo en estudio. Es decir, dependiendo de las características del terreno (con vegetación o sin

vegetación), extensión del sitio o fenómeno en estudio (cientos a miles km²) y cinemática (velocidad de desplazamiento), se necesitará técnicas de monitoreo con diferentes características.

La red geodésica juega un papel muy importante, esta consiste en un conjunto de estaciones de operación permanente que registran datos del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS). También es conocida como un Marco de Referencia a través de una red de puntos con coordenadas conocidas en un sistema de referencia determinado (Rastrero-Seijas, 2014). Estas redes permiten que el monitoreo con técnicas GPS sea más preciso, como en el caso del GPS Diferencial (DGPS) o Cinemático en Tiempo Real (RTK). Estas técnicas permiten conocer las coordenadas de un punto en específico a partir de un receptor o estación base del cual se conocen sus coordenadas exactas y un receptor o receptores que ocupan los lugares de interés; esto permite obtener la diferencia de coordenadas medidas en distintos instantes de tiempo y entre mayor sea el número de receptores, mejor será la determinación de las coordenadas (Ripoll, 2003; Torres, 2011).

En el caso del DGPS el procesamiento de la información es en gabinete; para el caso de RTK la obtención de coordenadas es en el momento de la medición; a partir de un enlace de comunicaciones entre los receptores GPS y a la incorporación de software de procesamiento en los equipos (Ferrecio, 2009). Estas técnicas tienen una precisión centimétrica (Ripoll, 2003; Torres, 2011). Sin embargo, un factor en contra del funcionamiento del GPS es que depende de la visibilidad, de la conexión satélite-receptor y usualmente presenta errores de multitrayectoria y geometría satelital (Carías *et al.*, 2018). El uso de redes geodésicas para el estudio de estos procesos proporciona datos precisos si los puntos GPS se colocan en zonas adecuadas, pero muchas veces existen limitaciones debido a la extensión de las laderas, la vegetación abundante, así como el acceso a estas (Syhami *et al.*, 2011). Esto provoca que las redes de puntos monitoreados en las laderas afectadas sean limitados, a comparación de los millones de puntos que se puede obtener a través del ELT, ahorrando tiempo y recursos económicos en su implementación.

Una de las técnicas más utilizadas en el estudio de las DGPL son las técnicas interferométricas que se basan en imágenes de radar de apertura sintética (SAR). Estas se generan reflejando las señales de radar en un área y miden el tiempo que viaja la onda electromagnética de ida y vuelta al satélite. Las señales tienen dos características principales: amplitud y fase. La amplitud se relaciona con la energía de la señal retrodispersada; y la fase se relaciona con la distancia del sensor al objeto (TRE-ALTAMIRA, s.f.). A partir de las imágenes SAR se pueden formar interferogramas, que reflejan el cambio de fase entre dos imágenes SAR de la misma área, trayectoria y geometría de adquisición, pero adquiridas en diferente temporalidad. La diferencia de fase calculada es proporcional a la

deformación de la superficie más las contribuciones topográficas, atmosféricas y de ruido (USGS, 2018, Villaseñor-Reyes, 2019; Del Conte y Falorni, 2019). La interferometría diferencial (DInSAR) utiliza un par de imágenes SAR para identificar y cuantificar el movimiento al eliminar la contribución topográfica mediante un Modelo Digital de Elevación (MDE) (Del Conte y Falorni, 2019).

Existen técnicas interferométricas avanzadas como PSInSAR que utiliza un conjunto de imágenes SAR (entre 20 a 25 imágenes) permitiendo identificar reflectores estables o dispersores permanentes (PS), que son puntos sobre la superficie terrestre coherentes a través del tiempo (p. ej., edificios, objetos metálicos, antenas o roca expuesta). Esto permite medir velocidades de desplazamiento con precisión milimétrica (TRE-ALTAMIRA, s.f). Las técnicas interferométricas son utilizadas frecuentemente en el estudio de los deslizamientos, estos permiten la construcción de mapas temporales de deformación de áreas extensas y detecta movimientos muy lentos (<0.1 m/año) permitiendo la elaboración de inventarios de deslizamientos o DGPL a una escala menor (km) (Crippa *et al.*, 2021; Chacón *et al.*, 2015). Por lo que para el estudio de PRM de escalas grandes (tamaños métricos) no son tan adecuadas.

Cada técnica tiene diferentes desventajas, en el caso de DInSAR se tienen problemas debido a que la adquisición de imágenes no es simultánea, por lo que las condiciones de propagación de las ondas en la atmósfera no es la misma, particularmente el vapor de agua, lo que dificulta la generación de DEMs (Naciones Unidas, s.f). En el caso de estudios multitemporales con la técnica PSI se necesitan al menos 20 imágenes SAR para que el estudio pueda ser confiable y no siempre se cuenta con esa cantidad de imágenes (García-Davalillo *et al.*, 2013).

Por su parte la técnica del Escaneo Láser Terrestre (TLS por sus siglas en inglés) permite la adquisición de coordenadas XYZ de miles o millones de puntos en tierra, a través de la medición de la distancia desde el dispositivo al objetivo (Oguchi *et al.*, 2011). Esta cantidad de puntos nos permite obtener datos topográficos con una precisión milimétrica. Lo cual permite realizar estudios con variaciones espacio-temporal complejas, como lo son los flujos de roca en estudio. En contraste con las técnicas anteriores, el TLS puede utilizarse como un método útil de observación directa para la evaluación de riesgos sin contacto con la zona, la capacidad de obtener puntos es rápida de minutos a horas dependiendo la extensión del terreno, con una resolución milimétrica y también permite el análisis multitemporal.

3.3. Monitoreos con ELT

El ELT permite obtener conocimiento de la forma de la superficie y la cinemática de los deslizamientos, obtiene datos que pueden usar los geólogos, geomorfólogos y geotécnicos, para interpretar estos fenómenos. En el análisis de los deslizamientos se utiliza para predecir, monitorear y prevenir para una alerta temprana (Barbarella y Fiani, 2013).

El monitoreo mediante escáner láser tiene como principal ventaja proporcionar el campo de desplazamiento completo del cuerpo inestable, sin limitarse a mediciones de un solo punto como en el caso de los receptores GNSS o mediciones con estaciones totales. El uso de esta técnica se ha hecho muy popular para el monitoreo de desplazamientos de cuerpos inestables (deslizamientos) multitemporales (Scaioni *et al.*, 2014).

Esta técnica ha sido usada para monitorear diferentes PRM, algunos de estos casos son: monitoreos de PRM secundarios que se presentan en deslizamientos profundos (Deep-seated landslides), como flujos de lodo con superficie visco-plástica, con desplazamientos de hasta 3.2 cm por día, bajo condiciones de lluvias consecutivas por varios días (Travellenti *et al.*, 2008). Por otra parte, estudios como el de Prokop y Panholzer (2009), demuestran que esta técnica es útil para monitorear deslizamientos con movimiento lento (<100 mm por periodo), así como para detectar pequeños movimientos previos a la falla (Huang *et al.*, 2019).

En México las técnicas que más se utilizan para monitorear PRM (p.ej. deslizamientos en carreteras, deslizamientos complejos y DGPL) es el GPS (Medina, 2014; Villaseñor-Reyes, 2019), o interferometría SAR (Sarychikhina *et al.*, 2021; Villaseñor-Reyes, 2019). En el país, existen pocos estudios de este tipo de fenómenos estudiados o monitoreados con el TLS. Vargas (2019), presenta un estudio de trayectoria de desprendimientos de rocas mediante un modelo de simulación 3D, utilizando nubes de puntos obtenidas a partir de TLS. De aquí surge la necesidad de implementar este tipo de técnicas para monitorear estos fenómenos.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El capítulo del área de estudio aborda diferentes factores que se relacionan y afectan al desarrollo de los PRM analizados, como la sismicidad, hidrología, clima, geomorfología y geología. Para esto, se realizó una búsqueda exhaustiva de información bibliográfica relacionada con estos factores. Y se realizaron algunos mapas temáticos con información obtenida en la plataforma de INEGI.

4.1. Localización

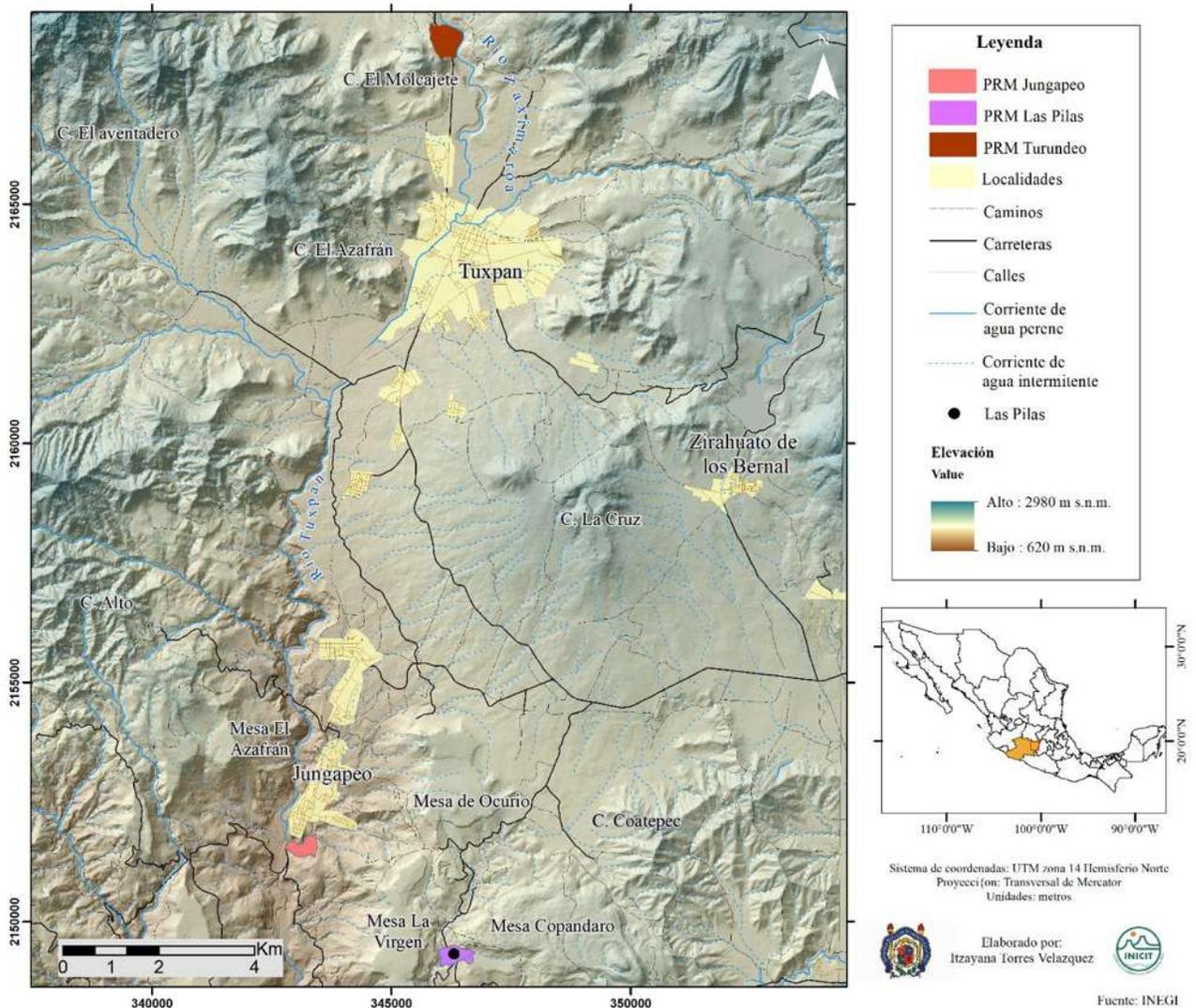


Figura 5. Mapa en el que integran los tres cuerpos inestables: Turundeo, Jungapeo y Las Pilas.

La zona de estudio se ubica al oriente del estado de Michoacán, abarcando parte de los municipios de Tuxpan, Jungapeo y Zitácuaro, dentro del área geográfica definida por las coordenadas 355,000 m E y 2,170,000 m N (UTM Zona 14, hemisferio norte (Figura 5).

4.2. Clima

El clima en la zona de estudio para el caso de Turundeo, es Templado con lluvias en verano (Cw) según la clasificación Köppen. Este tipo de clima se encuentra en latitudes subtropicales y subecuatoriales. Corresponde a un clima semicálido, con verano fresco, temperatura media en el mes más cálido de 22° C y una temperatura media anual de 18°C, con lluvias de verano y un porcentaje aproximado de 5% de lluvias invernales (Silva-Sáenz y Soto-González, 2016).

En Jungapeo y Las Pilas, que pertenece al municipio de Jungapeo y Zitácuaro, respectivamente. Tienen un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano (ACw). Este tipo de clima presenta una temperatura media anual >18°C, temperatura del mes más frío <18°C, con precipitación anual entre 500 y 2, 500 mm y lluvias de verano del 5% (INEGI, 2009).

En los últimos 11 años, el estado de Michoacán ha tenido una precipitación acumulada de 689 a 1,114 mm, y se ha registrado en promedio al mes de febrero como el más seco; mientras que junio como el mes más lluvioso (Tabla 3). Particularmente en la zona de estudio, de acuerdo a los datos que proporciona CONABIO, entre los años 1980 a 2009 se ha registrado una precipitación mensual que va de 600 a 900 mm para las zonas topográficas más bajas y de 900 a 1,200 mm en las zonas montañosas de la Sierra del Fraile al noroeste de Tuxpan. En general, los tres municipios tienen una precipitación anual de 800 a 1,200 mm.

En los años 2020 y 2021, se han registrado precipitaciones anuales de 703 y 974.1 mm, respectivamente, siendo el mes de agosto con mayor precipitación (Tabla 3) (Figura 6).

Tabla 3. Precipitación en el estado de Michoacán de 2010 a 2021. Fuente: CONAGUA.

Año	Precipitación anual acumulada (mm)	Mes con menor precipitación (mm)	Mes con mayor precipitación (mm)
2021	974.1	Febrero 0	Agosto 245.6
2020	703	Diciembre 2.4	Agosto 201
2019	829	Marzo 1	Julio 179.8
2018	1,114.10	Marzo 0.4	Junio 246.8

2017	792.8	Marzo	0.1	Agosto	228.4
2016	722	Febrero	2.2	Agosto	172.7
2015	996	Enero	1.5	Octubre	164.6
2014	885.1	Febrero	0.6	Junio	203.8
2013	1075.3	Febrero	0.1	Septiembre	359.4
2012	754.8	Abril	0.9	Agosto	192.4
2011	689	Febrero	0	Julio	270.6
2010	1086	Diciembre	0	Julio	330



Figura 6. Precipitación media para cada mes los años 2020, 2021 y 2022, en Michoacán.

4.3. Sismicidad

La República Mexicana se localiza dentro de las regiones sísmicas más activas del mundo, ya que pertenece al Cinturón de Fuego del Pacífico en donde se libera entre el 80 y 90% de la energía anual de la Tierra, por lo que en esta zona se concentra la mayor actividad sísmica del planeta (SGM, 2017). Por lo anterior, el país presenta una gran actividad sísmica a lo largo de las costas del océano

pacífico, debido a que la interacción de las placas de Cocos, Pacífico y la de Rivera con la Placa Norteamérica (SGM, 2017). Estas placas interactúan a través de un límite de tipo convergente, lo que quiere decir que las placas de Rivera y Cocos subducen la placa Norteamericana. El SGM (2017) y, López-Martínez y Mendoza (2018) mencionan que debido a esta subducción de placas, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán y Jalisco son los estados con mayor sismicidad del país. Sin embargo, a esta lista se une la Ciudad de México, que presenta gran sismicidad debido al material sobre el que se encuentra asentada.

A lo largo del tiempo estos estados han sido afectados por sismos históricos con una magnitud mayor a 7. Solo por mencionar algunos se presenta la siguiente lista:

- Sismo Mw 8.1 del 03 de junio de 1932, con epicentro en las costas de Jalisco, provocando un tsunami que afectó a la bahía de Manzanillo, con alturas máximas de 3 m. Esto se obtuvo mediante una caracterización histórico-etnográfica (Sánchez y Farreras, 1993).
- Sismo Mw 7.5 del 23 de agosto de 1965, con epicentro en las costas de Oaxaca, el cual dejó al menos 5 muertos (Nava, 2011).
- Sismo Mw 7.6 del 30 de enero de 1973, con epicentro en las costas de Colima, dejó un saldo de 56 muertos (Nava, 2011).
- Sismo Mw 7.1 del 22 de junio de 1979 con epicentro en Tehuantepec, Oaxaca (Nava, 2011).
- Sismo Mw 8.1 del 19 de septiembre de 1985, con epicentro en las costas de Michoacán, que causó grandes daños materiales y pérdidas humanas en la Ciudad de México (Esteve, 1998).

Michoacán se encuentra dentro de la zona sísmica D para la parte suroeste, y la zona B y C para la parte noreste, lo que representa un riesgo alto y medio, respectivamente. Lo anterior se ve reflejado en los datos sísmicos que presenta el Servicio Sismológico Nacional (SSN) (Tabla 4), los cuales indican que los últimos 86 años, se han registrado 29 sismos con una magnitud mayor a 5, dentro de estos se encuentran sismos de hasta 7.3, 7.6, 7.7 y 8.1, y 13,125 menores a 5 en el mismo periodo de tiempo (SSN, 2021).

Tabla 4. Sismos de Mw > 5, en los últimos 86 años, en el estado de Michoacán.

Fecha	Latitud	Longitud	Magnitud	Localización
16/05/2021	18.66	-102.73	5	48 km al sureste de Coalcoman
06/06/2019	18.52	-101.68	5.6	71 km al sureste de Nueva Italia
03/03/2019	18.33	-101.36	5.3	58 km al suroeste de Huetamo
30/04/2016	18.06	-103.25	5.1	80 km al sur de Coalcoman
21/04/2013	17.8568	-102.28	5.9	13 km dal suroeste de Cd Lazaro Cárdenas
11/04/2012	1.9217	-103.068	6.4	79 km al oeste de La Mira
21/01/2011	15.72	-104.15	5.5	321 km al suroeste de la Mira
25/11/2007	18.65	-101.7	5.6	59 km al sureste de Nueva Italia
09/08/2000	17.99	-102.66	7	35 km al oeste de La Mira
20/04/1998	18.37	-101.21	5.9	44 km al suroeste de Huetamo
22/05/1997	18.41	-101.81	6	61 km al noroeste de las Guacamayas
16/01/1997	17.94	-102.76	5.6	47 km al oeste de La Mira
11/01/1997	18.34	-102.58	7.7	43 km al noroeste de la Mira
30/04/1986	18.361	-103.045	7	48 km al sur de Coalcoman
29/10/1985	17.9	-102058	5.6	38 km al suroeste de la Mira
19/09/1985	18.419	-102.468	8.1	45 km al noroeste de la Mira
08/12/1983	18.3	-102.42	5.5	31 km al Noroeste de la Mira
24/10/1981	18.088	-102.061	7.3	18 km al noreste de Las Guacamayas
25/07/1981	17.79	-102.01	6.5	28 km al sureste de Cd Lazaro Cardenas
22/03/1979	17.37	-102.14	5.5	65 km al sur de la Cd Lazaro Cardenas
05/09/1976	17.406	-100.682	5.5	4 km al noroeste de Huetamo
15/11/1975	18.23	-102.18	5.9	24 km al norte de las Guacamayas
11/10/1975	17.58	-102.28	5.5	42 km al sur de Cd Lazaro Cardenas
30/01/1973	18.412	-103.019	7.6	43 km al sureste de Coalcoman
02/06/1942	19	-101	6.7	43 km al norte de Huetamo
15/04/1941	18.85	-102.94	7.6	25 km al noreste de Coalcoman
29/06/1935	18.75	-1035	6.9	36 km al oeste de Coalcoman

Los sismos son uno de los factores detonantes de deslizamientos en zonas sísmicamente activas. Estos son considerados uno de los eventos que causan más daños en áreas montañosas de todo el mundo, generando daños en las infraestructuras y pérdidas humanas (Bird y Bommer, 2004; Cao *et al.*, 2019). Un ejemplo de esto, es el caso del Parque Nacional de Jiuzhaigou en China, considerado como patrimonio de la humanidad. El cual fue afectado por una serie de deslizamientos que fueron detonados por un sismo de Mw de 6.5, generando 25 muertes y 525 heridos (Wu *et al.*, 2018). Otro

caso, es el terremoto de Mw de 7.6 en Tecomán, México. El cuál detonó una serie de deslizamientos causando daños principalmente en las carreteras (Keefer *et al.*, 2006).

4.4. Hidrografía

La república mexicana está conformada por 731 cuencas hidrológicas, mismas que se organizan en 37 regiones hidrológicas (RH). Estas regiones están conformadas de acuerdo con sus características orográficas e hidrográficas; sus límites no coinciden con los límites políticos estatales ni municipales (CEAJ, 2021).

Michoacán se encuentra entre cuatro regiones hidrológicas: Balsas (RH18), Lerma-Santiago (RH12), Costas de Michoacán (RH17) y Armería Coahuayana (RH16). Particularmente, el área de estudio se encuentra dentro de las RH del Balsas y Lerma-Santiago (Figura 7). La RH del Balsas, también conocida como depresión del Balsas, cubre el 55.64% de la superficie estatal y drena el agua del centro de la entidad hacia el río Balsas, que es una de las corrientes más importantes del país y termina vertiendo sus aguas en el océano Pacífico (CONAGUA, 2015). Tiene una precipitación media anual de 952 mm.

En el caso de la RH Lerma-Santiago, cubre 30.26 % de la superficie estatal, tiene una precipitación promedio anual de 723 mm. La mayoría de los lagos más importantes del país se encuentran en esta RH (Chapala, Cuitzeo, Pátzcuaro, Yuriria). Drena el agua hacia los ríos Ameca, Armería, Coahuayana, Santiago, Tomatlán, Marabasco San Nicolas y Lerma, los cuales terminan vertiendo sus aguas en el océano Pacífico (CONAGUA, 2014).

El municipio de Jungapeo, Tuxpan y Zitácuaro se encuentran dentro de la RH del Balsas y la cuenca del río Cutzamala. Jungapeo presenta corrientes de agua de tipo perenne como el río Chico, Chiquito y Tuxpan; y corrientes de agua intermitentes como El Paso del Muerto, El Salitre, Las Guásimas, Agua Salada, El Hilamo, El Chorrillo, Las Guayabas, solo por mencionar algunos (INEGI, 2009a). Mientras que, Tuxpan tiene corrientes de agua perenne como el río Tuxpan y Turundeo; así como corrientes de agua intermitentes como el Tigre, La Fábrica, Los Zapotes, Las Cajas, El Tepetate, El Arenal, solo por mencionar algunos (INEGI, 2009b). Por último, Zitácuaro, presenta corrientes perennes como el río Chiquito, e intermitentes como, El Salto, Guadalupe y Crescencio Morales (INEGI, 2009c).

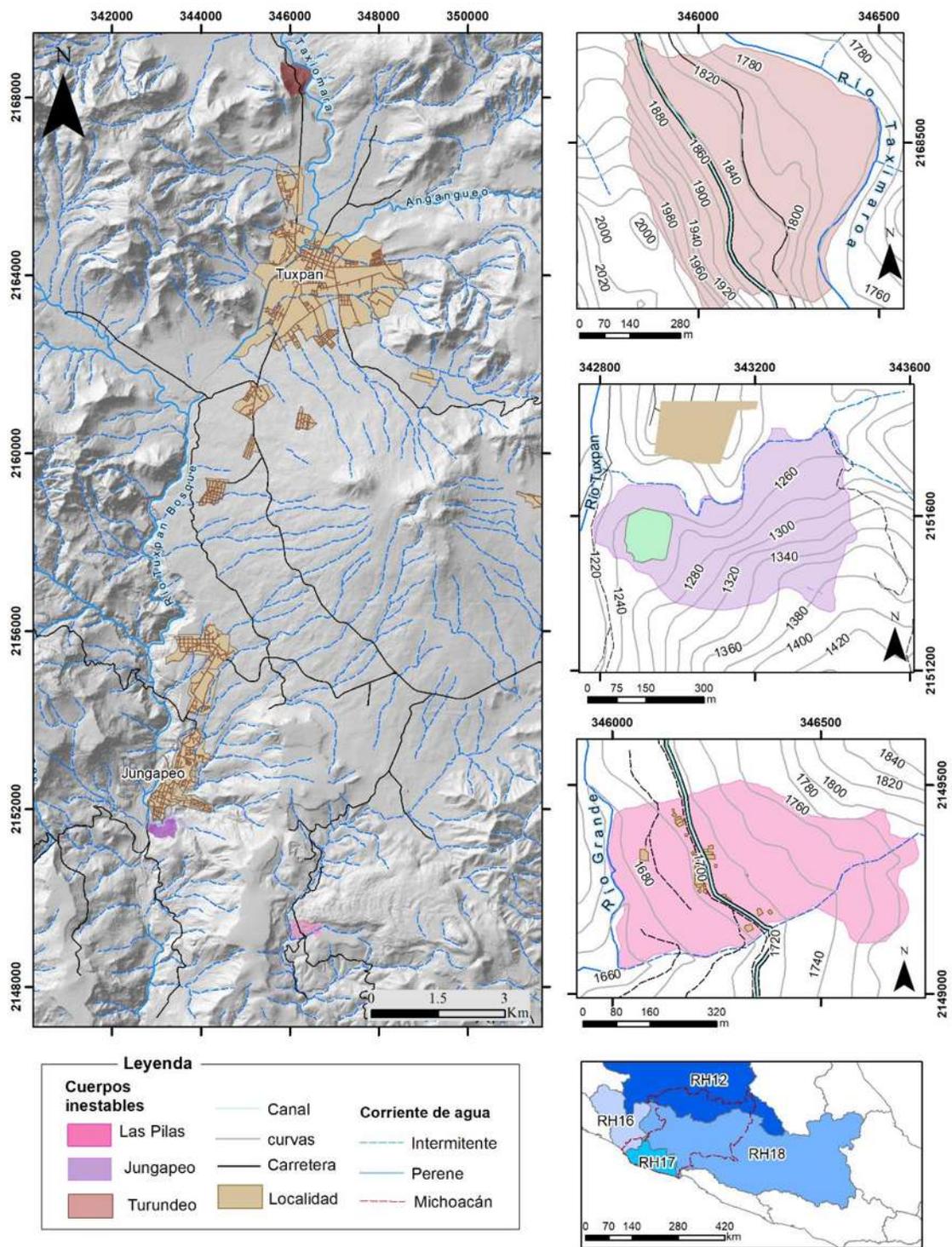


Figura 7. Mapa hidrológico que muestra las regiones hidrológicas (RH). RH18: Balsas, RH12: Lerma-Santiago, RH17: costas de Michoacán, y RH 16: Armería Coahuayana. Así como las corrientes de agua cercanas a la zona de estudio y los ríos que erosionan el pie de monte.

4.5. Edafología

La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA por sus siglas en inglés), define al suelo como la capa superficial de la corteza terrestre, conformada por material mineral y orgánico, no consolidado, que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas; sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas dependen de los factores que le dieron origen (p.ej. topografía, material parental, biota, tiempo).

La República Mexicana está conformada por una gran variedad edáfica, representada en 26 grupos de suelo, siendo seis los que más abundan en el país (SEMARNAT, 2012): leptosol, regosol, calcisol, feozems y vertisol. El área de estudio está conformada por suelo en mayor área de acrisol, luvisol, vertisol, y en menor área regosol (INEGI, 2013). Estos tipos de suelos presentan las siguientes características:

- *Acrisol*. Se caracteriza por presentar un desarrollo a partir de la meteorización de rocas ácidas, ricas en arcillas; favorece su desarrollo el clima húmedo tropical y templado cálido; con cobertura tipo selva. Es el suelo con mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial (IUSS, 2007).
- *Luvisol*. Se caracterizan por ser suelos que se desarrollan sobre materiales no consolidados (p.ej., terrazas aluviales, depósitos aluviales y coluviales). Se presentan en climas templados y fríos o cálidos húmedos; son comunes en bosque de coníferas y selvas caducifolias. Es uno de los suelos más fértiles, por lo que es utilizado frecuentemente para el uso agrícola (IUSS, 2007).
- *Vertisol*. Se caracterizan por suelos que se desarrollan en climas semiárido y subhúmedo; son comunes en sabanas, pastizales, matorrales y llanuras de inundación. Presentan un alto contenido de arcillas, las cuales se caracterizan por expandirse y contraerse con el cambio de húmedo a seco; esto genera la formación de grietas en el terreno (IUSS, 2007).

4.6. Uso de suelo

El uso de suelo se refiere al tipo de aprovechamiento que se realizan de los ecosistemas terrestres de un área específica del terreno (Paruelo *et al.*, 2005). De acuerdo a SEMARNAT, la evaluación más reciente del uso del suelo corresponde a la carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie V de INEGI (2013), dentro de la cual se describen 69 usos de suelo para 2014. Estos se ordenan en grupos más grandes denominados formaciones vegetales/ usos de suelo: bosque mesófilo de montaña,

bosque templado, selva húmeda, matorral xerófilo, pastizal natural, vegetación halófila, pastizal inducido, plantación forestal, zonas urbanas, agricultura y cuerpos de agua.

La transformación de la cubierta vegetal en México ha sido provocada por el crecimiento de la población y por ende ha crecido la demanda de espacios para establecerse, así como la demanda de alimentos, esto implica el aumento de la agricultura (SEMARNAT, 2018). Esto tiene como consecuencia la alteración de los ciclos biogeoquímicos, pérdida de biodiversidad y el cambio climático.

Los cuerpos inestables de este estudio presentan usos de suelo de tipo agricultura, cultivando los siguientes vegetales:

- **Turundeo:** se distribuyen en toda la ladera del cuerpo plantíos de chayote, aguacate, limón, guayaba y agave (Figura 8a y b).
- **Jungapeo:** se distribuyen al oeste de la ladera, plantíos de aguacate y ciruela (Figura 8e).
- **Las Pilas:** en la parte superior de cuerpo, cerca del escarpe principal se cultiva maíz y en del canal de agua hacia abajo, se cultiva principalmente chayote, guayaba y aguacate (Figura 8b y c).

El tipo de riego utilizado para el caso de Turundeo y Las Pilas es de tipo rodado o por gravedad, que consiste en mover el agua por gravedad, esto quiere decir que el agua se mueve a través de a pendiente, utilizando surcos para su distribución; este sistema es el que más consume agua, con una eficiencia de 40-60% (Earthgonomic, 2017).

Para el caso de Jungapeo, el tipo de riego es por goteo, este consiste en suministrar gota a gota el agua a las raíces, de forma que se puede controlar la cantidad que se libera (Rieggo, 2022), a través de una red de mangueras o tuberías. Se considera el sistema más eficiente (90-95%) (Earthgonomic, 2017).



Figura 8. *Uso de suelo de los cuerpos inestables. a) Vista panorámica de las Pilas, en donde se observa la distribución de cultivos de chayote, guayaba y aguacate. b) Vista panorámica de Turundeo, en donde se observan algunos cultivos de la parte superior. c) Vista a contraescarpe de los cultivos de las Pilas. d) Imagen del flujo de agua en el riego rodado en cultivos de chayotes en Turundeo. e) Vista de cultivos de aguacate en Jungapeo.*

4.7. Geomorfología

Existen varias clasificaciones del territorio de México, que lo divide en grandes unidades de acuerdo a criterios geomorfológicos, a los cuales se les denomina provincias fisiográficas. Estas se basan en la homogeneidad del relieve, a partir de su clasificación morfogenética, sus límites y toponimia (Hubp y Córdova, 1992).

México está formado en provincias y subprovincias que actualmente se dividen en: Península de Baja California, Llanura Sonorense, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, Sierras y llanuras del norte, Llanura Costera del Pacífico, Llanura Costera del Golfo, Mesa central y Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transversal Mexicana (FVTM) (INEGI, 2001). Como se menciona en el Marco Geológico de este trabajo, la zona de estudio pertenece a la FVTM y a la Sierra Madre del Sur, las cuales presentan diferentes geoformas que son generadas a partir de la geología de la zona, así como de la meteorización (Hubp, 1900). De acuerdo a Hubp (1900), el vulcanismo es uno de los procesos más importantes en la geomorfología debido a que este genera mayores cambios en las superficies en un menor tiempo. Ya que debido a esta actividad se forman estructuras como calderas, conos de ceniza y fracturas.

La zona de estudio presenta características topográficas muy variadas con distribuciones dispersas de diferentes elementos morfológicos, las cuales se describen a continuación a partir de los insumos cartográficos del Capítulo 5:

Macizo metavulcano sedimentario

El macizo se distribuye al suroeste y al norte de Zitácuaro. Al norte presenta una forma alargada con dirección NE-SW y al sur una forma menos alargada con direcciones preferenciales N-S y E-W. Está conformado por cerros y montañas, constituidas por rocas metavulcano-sedimentarias. Estas presentan alturas que van de 300 a 800 m de altura desde la base hasta la cima. Presenta pendientes abruptas menores a 80°. El tipo de drenaje que presenta es de tipo dendrítico con un patrón extendido similar a un árbol con una ramificación irregular de afluentes en muchas direcciones y en casi cualquier ángulo. Cabe mencionar que este macizo es la base de la columna estratigráfica de la zona de estudio.

Mesetas de basaltos y andesitas

Las mesetas de basaltos y andesitas se encuentran al oeste de la zona de estudio. Presentan una forma ovalada y alargada en las partes más altas del C. Las Mesitas, La Guacamaya, Mesa La Virgen y Mesa de Ocampo. Estás son cortadas por un lineamiento con dirección N-S, el cual aprovecha el río Tuxpan por su cauce. Presentan pendientes de 0 a 8° en las partes de las mesas, y pendientes < 76° en las zonas de escarpes.

Lomeríos vulcano-sedimentarios

Los lomeríos están conformados por rocas vulcano-sedimentarias del Cretácico y se presentan como un conjunto de lomas con unas alturas que van de los 50 a los 200 m desde su base hasta la cima. Se distribuyen al oeste y al sureste de la localidad de Jungapeo con pendientes suaves menores a los 30° al sureste y menores a 40° al sureste de la misma localidad. El drenaje que se observa en estos lomeríos es rectangular, que nos muestra una red casi perpendicular de corrientes con afluentes y corrientes principales unidas en ángulo casi recto; algunos de estos, están controlados por las fallas normales presentes en la zona. Estos lomeríos subyacen a las mesas basálticas y andesíticas mencionadas anteriormente, por lo que también presentan una dirección preferencial E-W.

C. La Coyota – Montaña y lomeríos

La Coyota es una montaña de 500 m de altura desde su base a su cima con lomeríos aledaños con alturas que van de los 200 a los 300 m de altura de su base hasta la cima. Estos se encuentran al suroeste de la ciudad de Zitácuaro y están constituidas por rocas como lutitas rojizas, lutitas calcáreas y conglomerados.

El C. La Coyota presenta un drenaje de tipo radial en donde las corrientes fluyen hacia afuera en todas las direcciones desde el punto más elevado, y tiene pendientes abruptas menores a 80° en las zonas más altas. En los lomeríos aledaños existe un drenaje rectangular, que muestra una red casi perpendicular de afluentes que se unen a la corriente principal con un ángulo casi recto, y pendientes más suaves de aproximadamente 40°.

Flujos de Lava y conos

Los flujos de lava presentan una forma alargada y ovalada. Se encuentran distribuidos aleatoriamente en la zona de estudio, al oeste de Zitácuaro y otros al noreste de Tuxpan, sobre los lomeríos de rocas vulcano-sedimentarias del Cretácico. Presentan una altura mínima de 200 m y una máxima de 500 m desde la base a la cima, así como pendientes que varían de <80° en las zonas más abruptas y < 20° en

las zonas más suaves. El molcajete, es uno de los conos más representativos, muestra un drenaje radial, el cual desciende desde la parte más alta sobre las laderas en todas direcciones. Mientras que los flujos de lava no presentan un drenaje bien definido, estos siguen las formas de estructuras de flujos.

Sierra de Angangueo

La Sierra de Angangueo se distribuye al noroeste de Zitácuaro, siguiendo una dirección NW-SE, aunque en el área de estudio aflora una mínima porción de esta. Es un conjunto de montañas altas, alargadas y que generan una forma aserrada. En la zona que aflora presenta una altura mínima de 500 m y máxima de casi 1000 m de base a cima. Y tiene contacto al suroeste con el macizo que se encuentra al norte de Zitácuaro.

El drenaje que se observa dentro de la zona de estudio es de tipo rectangular, ya que parece que la red de afluentes es casi perpendicular a las corrientes principales, a las cuales se unen en ángulo casi recto. Se distinguen pendientes $\leq 85^\circ$ en las zonas con escarpes abruptos, y en zonas más suaves predominan las pendientes $\leq 30^\circ$.

Domos dacíticos y andesíticos

Los domos dacíticos y andesíticos se distribuyen aleatoriamente en la zona de estudio, siendo mayor su presencia al este de Tuxpan, y en menor proporción al norte de Zitácuaro, como el C. Zirahuato. Estos domos tienen forma parecida a un círculo, con pendientes abruptas y cimas achatadas. Presentan una altura mínima de 400 m y máxima de 700 m de altura de base a cima, en las cuales predominan las pendientes abruptas $\leq 85^\circ$. Estos presentan dos lineamientos, uno con dirección N-S y otro NW-SE.

El drenaje que domina este grupo es el tipo radial, ya que al ser elevaciones de más 400 m la red de afluentes se distribuye desde la parte más alta en direcciones aleatorias a las partes más bajas. Cabe mencionar que este dominio está constituido por dacitas y riolitas, que son de las más jóvenes de la zona de estudio, por lo que estas se encuentran sobre otros depósitos como lo flujos piroclásticos y de caída que se encuentran en la misma área.

Flujos piroclásticos y de caída

Los flujos piroclásticos y de caída, se distribuyen en la porción este de Tuxpan y al noroeste de Jungapeo. Estos presentan una forma extensa en zonas bajas y con poca pendiente. Su altura mínima es de 100 m y máxima de 200 m desde la base hasta las zonas más altas. Predominan pendientes $\leq 20^\circ$.

El drenaje de estos flujos varía un poco, la mayoría es de tipo paralelo, sus corrientes principales regularmente son más o menos paralelas con afluentes que se unen en ángulos agudos. También se distinguen drenajes rectangulares, en el que sus afluentes se unen en un ángulo casi recto a las corrientes principales. Y, por último, se observa drenaje dendrítico, el cual no tiene un patrón exacto y la red es parecida a la ramificación de un árbol. En el caso de drenaje rectangular y paralelo, se observa que son controlados por sistemas de fallas y fracturas inferidas en la zona. Se desconoce con exactitud su edad, pero por su posición estratigráfica se podría tomar como más recientes a los domos dacíticos y andesíticos, ya que estos se encuentran sobre los flujos piroclásticos.

Complejo de domos El Fraile

La sierra del Fraile se distribuye en casi toda la porción oeste de la zona de estudio, está constituida por una serie de domos y depósitos de avalanchas. Presentan una altura mínima de 200 m y una máxima de 1200 m, con pendientes predominantes $\leq 85^\circ$ y en menor proporción pendientes de $\leq 50^\circ$, esto para los domos. En el caso de los depósitos de avalancha se distingue una altura mínima de 200 m y máxima de 300 m, con pendientes predominantes de $\leq 50^\circ$.

El drenaje que se observa en este complejo es de tipo dendrítico al noroeste de Tuxpan, que presenta una red que se distribuye en varias direcciones, asemejando su forma a la ramificación de un árbol. El otro drenaje que se observa es el paralelo y rectangular, al suroeste de Tuxpan, el cual se encuentra controlado por el contacto entre los domos y avalanchas, así como algunas fracturas inferidas.

Volcán en escudo

El volcán en escudo es una de las estructuras que más resaltan en la zona de estudio, presenta una forma circular con un radio aproximado de 700 m, con suaves y prolongadas laderas. Se distribuye en la parte central, al sur de Tuxpan y norte de Jungapeo. Presenta una elevación aproximada de 1100 m de base a cima; con pendientes suaves $\leq 30^\circ$. Su drenaje es de tipo radial ya que sus afluentes se distribuyen de las zonas más bajas a las más altas sin tocar la cima.

Este edificio volcánico se considera una andesita basáltica, con domos en la parte superior. Es contemporáneo a los domos dacíticos y andesíticos mencionados anteriormente, por lo que también se agrupa dentro de las rocas más jóvenes del área.

Complejo volcánico de Zitácuaro

El Complejo Volcánico de Zitácuaro (CVZ) se encuentra en la porción sureste de la zona de estudio, está constituido por una serie de conos, lavas, domos, flujos piroclásticos y de caída, los cuales son productos de actividad postcaldérica de la zona. Este complejo presenta lavas alargadas y ovaladas con pendientes $\leq 20^\circ$; conos como el Molcajete con altura de 200 m de base a cima con pendientes $\leq 80^\circ$; domos riolíticos como el Cacique con altura aproximada de 900 m de base a cima y pendientes $\leq 80^\circ$; así como flujos piroclásticos y de caída, con una forma similar a las mesas, extensa y con pendientes $\leq 40^\circ$

El tipo de drenaje de este complejo es de tipo radial en los conos y domos; mientras que se distingue un drenaje rectangular en la zona de depósitos piroclásticos y de caída, esto puede relacionarse con contactos entre diferentes flujos, así como control estructural dado por algunas fracturas.

4.8. Marco Geológico

La zona de estudio comprende tres laderas inestables, que se localizan al oriente de Michoacán, particularmente al norte de Tuxpan, suroeste de la localidad de Jungapeo, y al noreste del municipio de Zitácuaro. Por lo que pertenecen a dos provincias fisiográficas: Faja Volcánica Transversal Mexicana (FVTM) y al Terreno Guerrero. De acuerdo a las edades espacio-temporal de formación de cada provincia, se presenta una breve descripción del Terreno Guerrero y posteriormente de la FVTM.

La Sierra Madre del Sur (SMS) se extiende a lo largo de aproximadamente 1, 100 km de la costa pacífica del sur de México, desde la ciudad de Puerto Vallarta hasta el Golfo de Tehuantepec. La SMS está delimitada por bloques corticales, delimitados por fallas y características estratigráficas que marcan cambios abruptos en la litología y en sus edades, que subdividen la SMS en terrenos tectono-estratigráficos (Campa y Coney, 1983).

De acuerdo a Campa y Coney (1983), la SMS se divide en los siguientes terrenos: Xolapa, Guerrero, Mixteca, Juárez, Oaxaca. En particular, el terreno Guerrero está compuesto por una estratigrafía compleja, que a grandes rasgos comprende sucesiones vulcano-sedimentarias submarinas y subáreas

que van desde el Jurásico (Titoniano) hasta el Cretácico medio-tardío (Cenomaniano). Centeno-García y colaboradores (2008) proponen que el Terreno Guerrero está formado por cinco subterrenos: Tahue, Zinahuatanejo, Guanajuato, Arcelia y Teloloapan.

El área de estudio se encuentra sobre El Terreno Arcelia y Teloloapan. El Terreno Arcelia está compuesto por una secuencia de rocas volcánicas de composición basáltico-andesíticas con niveles de brechas, aglomerados y lavas basálticas almohadilladas, sedimentos terrígenos y turbiditas, todas ellas intensamente deformadas y parcialmente metamorfizadas; Así como capas de chert con radiolarios de edad Albiano-Cenomaniano (Corona-Chávez, *et al* 2000; Centeno-García *et al.*, 2003; Centeno-García *et al.*, 2008). Por otra parte, el Terrano Teloloapan con edad del Cretácico inferior, está constituido por metatobas, metareniscas y metalutitas, afectadas por un complejo sistema de fallas normales, que deforman estas rocas en facies de esquistos verdes de bajo grado. Cabe mencionar que en Jungapeo aflora un cambio transicional entre estos dos subterrenos, el cual presenta una secuencia de areniscas y limolitas con fauna de amonoideos y plantas, así como conglomerados y calizas con fauna de Cretácico (SGM, 1998).

La FVTM es un arco magmático que se origina a partir de la subducción de la placa de Rivera y de Cocos debajo de la placa Norteamericana, tiene una extensión de 1000 km y un ancho que varía de 90 a 230 km y está constituida por más de 8000 estructuras volcánicas (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Algunos autores dividen a la FVTM en tres sectores de acuerdo a su composición y tipo de vulcanismo: este, centro y oeste, aunque recientemente, usando el mismo criterio, han agregado un sector conocido como Easternmost (el extremo más oriental) (Ferrari *et al.*, 2012).

El sector occidental se encuentra limitado al este por el rift de Colima, al norte por el Bloque Jalisco (BJ) y la Sierra Madre Occidental (SMO). El vulcanismo emplazado al sur de la SMO se considera bimodal, formando estratovolcanes y complejos dacítico-riolíticos, así como centros monogenéticos basálticos. Por su parte, el vulcanismo emplazado dentro del BJ es monogenético y de composición basáltico-andesítico (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). El sector central se encuentra delimitado por el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende. En este sector se encuentra el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, el cual está formado por centros monogenéticos y volcanes en escudo de composición basáltico-andesítica. En este sector solo se presenta el estratovolcán del Cerro de Tancítaro (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). El sector occidental se encuentra al oriente del sistema Taxco-San Miguel de Allende, este vulcanismo se caracteriza por el emplazamiento de estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición andesítica a riolítica, los cuales se

encuentran alineados a lo largo de estructuras corticales. Por otro lado, también presenta emplazamiento de volcanes monogenéticos de composición basáltica (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

4.8.1. Geología local

Localmente el área de estudio se encuentra constituida por rocas sedimentarias, ígneas extrusivas e intrusivas y metamórficas, con edades que van desde el Jurásico hasta el presente. Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio pertenecen al Terreno Guerrero, específicamente al subterreno Arcelia en los alrededores de Jungapeo, y al subterreno Teloloapan al norte de Zitácuaro. Las rocas del subterreno Teloloapan son relacionadas con la secuencia metavolcano-sedimentaria del Jurásico Tardío (Corona-Chávez, 2000), que presenta rocas con ligero metamorfismo. Por otra parte, la secuencia vulcanosedimentaria del Aptiano y los conglomerados y calizas del Aptiano-Albiano, se relacionan con el subterreno Arcelia (Israde-Alcántara y Martínez, 1986). El gabro El Bosque, así como las capas rojas de C. La Coyota también se relaciona con el Terreno Guerrero. Las rocas más recientes, además de los depósitos aluviales y coluviales, corresponden a la actividad de la FVTM; entre las más jóvenes está el domo El Cacique (31 ka) (Capra *et al.*, 1997). Particularmente, las rocas más jóvenes que afloran directamente en los cuerpos inestables en estudio son los basaltos del Volcán Zacapendo (0.23 Ma) (Israde-Alcántara y Martínez, 1986; Corona-Chávez *et al.*, 2000). A continuación, se describe la litología local de base a cima (Figura 9).

Metavolcano-sedimentarias - Puerto El Gato – Jurásico Tardío

Las rocas metavolcano-sedimentarias se encuentran al norte de Zitácuaro, presentan una forma alargada, que forman lineamientos dirección NE-SW. Esta unidad es de origen vulcano sedimentario con metamorfismo de bajo grado, presenta facies de esquistos verdes, metalavas y alternancias de metacalizas y metalutitas (Israde-Alcántara y Martínez, 1986; Corona-Chávez *et al.*, 2000). No se han realizado dataciones del sitio, pero de acuerdo a Israde-Alcántara y Martínez (1986), se estiman con una edad del Jurásico Tardío.

Esta unidad se divide en dos: rocas sin metamorfismo y rocas con metamorfismo. La secuencia vulcanosedimentaria sin metamorfismo, presenta tobas y microbrechas andesíticas de coloraciones verde olivo, que cambia transicionalmente a una secuencia metamórfica compuesta por intercalaciones de esquistos muy rojizos y tobas arenosas (Israde-Alcántara y Martínez, 1986).

Las rocas metamórficas están constituidas por metatobas de color café rojizo, textura arenosa, composición andesítica y ligeramente foliada; esquistos muy plegados de color que varía de gris a negro y café amarillento por intemperismo; metalavas de color café amarillento por intemperismo, de textura afanítica y fracturas rellenas de cuarzo; y esquistos micáceos color gris claro, plegados, con bandas color negro paralelas a la estratificación (Israde-Alcántara y Martínez, 1986).

Gabro El Bosque – Barremiano

El intrusivo El Bosque aflora en la ribera sureste de la presa El Bosque en Zitácuaro, con una orientación NW-SE (Montiel *et al.*, 1997). Es un intrusivo de composición diorítica con una edad de 129 Ma (Israde-Alcantara y Martínez, 1986). La diorita presenta un color negro, estructura masiva, con minerales de feldespatos, plagioclasas y cuarzo (Montiel *et al.*, 1997). Intrusiona a las rocas volcánicas de la formación Arcelia y también se encuentra subyaciendo discordantemente a las rocas volcánicas del Cenozoico (Montiel *et al.*, 1997).

Vulcanosedimentarias - Aptiano

Las rocas vulcanosedimentarias del Aptiano se encuentran rodeando a Jungapeo, subyaciendo a las coladas de lavas de composición andesítica. Estas rocas están asociadas a la Formación Purúa, que está constituida, a grandes rasgos, por intercalaciones de lutitas, areniscas, limolitas y calizas fosilíferas.

Particularmente las rocas volcánicas se encuentran con terrígenos y nódulos de caliza; los conglomerados, lutitas, limolitas con presencia de ostrácodos y gasterópodos. Así como conglomerados volcánicos englobando lentes de calizas, y en algunas zonas las calizas se encuentran plegadas y con abundantes restos de corales y bryozoarios (Israde-Alcantara y Martínez, 1986).

Conglomerados y calizas – Aptiano Superior – Albiano Inferior

Estas rocas se encuentran al este de Jungapeo, subyaciendo a los flujos de lava de composición basáltica. Consiste en una secuencia constituida por areniscas, conglomerados, aglomerado, lutitas y calizas. Las areniscas son composición volcánicas color café, intercalaciones de lutitas calcáreas color verde oscuro verdosos con presencia de fósiles de ostrácodos, tallos y amonites de edad Aptiano Tardío - Albiano Temprano (Israde-Alcántara y Martínez, 1986). Discordante a los depósitos calcáreos, un conglomerado de rocas volcánicas de composición andesítica. Y aglomerados volcánicos de rocas ígneas extrusivas intercaladas con niveles tobáceos. Lutitas con niveles de calizas

olíticas, así como calizas masivas color gris claro muy compactas con abundantes bioclásticos de ostrácodos y fragmentos de equinodermos y foraminíferos.

Capas rojas La Coyota – Eoceno

Las capas rojas La Coyota pertenecen a una unidad de rocas terrígenas, que se encuentran al suroeste de la ciudad de Zitácuaro, teniendo sus mejores exposiciones en el C. La Coyota, y por observaciones indirectas en la vertiente sur del río de Tuxpan (Israde-Alcántara y Martínez, 1986). Están constituidas por una alternancia de brechas compuestas por fragmentos de cuarzo lechoso, andesitas, conglomerado poligmítico, lutitas rojizas deleznales estratificadas e inclinadas, lutitas calcáreas color verde, brechas volcánicas (Israde-Alcántara y Martínez, 1986).

Formación Patámbaro-Tzitzio Jurásico Medio- Eoceno

La formación Patámbaro y Tzitzio se encuentran al oeste de Jungapeo. La Formación Patámbaro consiste en conglomerados, calizas, areniscas, esquistos y secuencias de flysch de edad Jurásico medio-Cretácico temprano (Pasquaré *et al.*, 1991); mientras que la Formación Tzitzio corresponde a conglomerados andesíticos, limolitas y areniscas rojas del Cretácico tardío al Eoceno (Pasquaré *et al.*, 1991).

Andesitas Sierra de Angangueo - Mioceno temprano – Oligoceno tardío (24-20 Ma)

La sierra de Angangueo cubre un área aproximada de 2, 000 km². Está constituida por un macizo integrado por varios aparatos volcánicos de composición andesítica (Corona-Chávez *et al.*, 2000), compuesta por flujos de lavas masivas con niveles de brechas y tobas de la misma composición (Montiel *et al.*, 1997).

Las andesitas son lavas de color gris oscuro a gris verdoso, con algunas tonalidades rojizas, con estructura masiva e intenso fracturamiento, presentan una textura porfírica y ligeramente afanítica, con minerales de plagioclasa y piroxeno en su mayoría, y fenocristales de anfíbol al suroeste de la Sierra de Angangueo (Hernández-Bernal *et al.*, 2016). Estas andesitas subyacen en concordancia a la Secuencia Tafetán, la cual representa la última actividad volcánica de la Sierra Madre Occidental, y a su vez es cubierta por rocas de la FVTM (Montiel *et al.*, 1997).

Complejo volcánico Pucuato 14.5 Ma

Este complejo se distribuye al sureste de Jungapeo, y se encuentra una porción muy pequeña de este, el cual consiste en lavas andesíticas, riolíticas e ignimbritas, de acuerdo a Arce *et al.*, (2012) datan una edad de 14.5 Ma.

Complejo Volcánico Zitácuaro (12-0.5 Ma)

El Complejo Volcánico de Zitácuaro (CVZ), se encuentra al sureste de Jungapeo, y rodea la ciudad de Zitácuaro. De acuerdo a Capra *et al.*, (1997), este complejo es una caldera volcánica, la cual se ha caracterizado por tres diferentes periodos de resurgencia: 12, 5 y 0.5 Ma. A través de este tiempo se han generado diferentes depósitos, como flujos piroclásticos, domos dacíticos, depósitos de caída, flujos de bloques y cenizas. El Volcán El Molcajete pertenece a la actividad del primer episodio de resurgencia; la unidad la Soledad (flujos de bloques y cenizas) al noreste de Zitácuaro corresponden al segundo periodo de resurgencia; y el Domo el Cacique, así como la unidad de la Dieta (depósitos de caída) pertenecen al tercer episodio de actividad, siendo estos los más jóvenes con 0.5 y 0.3 Ma, respectivamente (Capra *et al.*, 1997).

Flujos de lavas (mesas) – (6-4 Ma)

Los flujos de lavas son una serie de mesas de composición que varía de andesita a basaltos, que en su mayoría coronan a las unidades del subterreno Arcelia. Se distribuyen al oeste y este de Jungapeo. Presentan una forma ovalada y alargada en las partes más altas del C. Las Mesitas, La Guacamaya, Mesa La Virgen y Mesa de Ocampo. Estos basaltos son de color negro grisáceo, estructura de colada, textura fanerítica, presentan una composición homogénea, sin cambio litológico ni intercalaciones con otro material.

Dacitas Sierra El Fraile – (4.3 Ma)

La Sierra El Fraile se encuentra principalmente al noreste del área de estudio, al norte de la localidad de Tuxpan y al sur de Los Azufres. Es una sucesión de domos dacíticos, lavas andesíticas y niveles de ignimbrita. Pasquarè *et al.*, (1991), reporta edades de 6.1 a 3 Ma. Las dacitas presentan color gris oscuro a claro, estructura masiva, textura afanítica a porfídica con plagioclasas y cuarzo. Por su parte, las andesitas tienen una textura porfídica, presentan minerales de hornblenda, augita, vidrio, apatito y ortoclasa (Montiel *et al.*, 1997). Estratigráficamente, los domos dacíticos cubren discordantemente

a las andesitas de la Sierra de Angangueo y subyacen discordantemente a los basaltos cuaternarios monogenéticos.

Depósitos de Avalanchas

Los depósitos de avalanchas se distribuyen al suroeste de la ciudad de Tuxpan, en la Sierra El Fraile y de acuerdo a Pasquarè *et al.*, (1991), son contemporáneas a la edad de la Sierra El Fraile. Consisten en depósitos de avalanchas locales, no se cuenta con información de su composición.

Andesitas Volcán en escudo – (0.49 - 0.6 Ma)

El volcán en escudo está ubicado al sureste de Tuxpan y noreste de Jungapeo. Tiene un diámetro basal de aproximadamente 10 km y una altura de 600 m desde la base a la cima. De acuerdo a Blatter *et al.*, (2001) su composición es andesita basáltica.

Conos y lavas – (0.37 - 0.23 Ma)

Los conos y lavas se distribuyen aleatoriamente: al oeste de la ciudad de Zitácuaro, al sureste de Jungapeo y al este de Tuxpan. De acuerdo a Blatter *et al.*, (2001) tienen una composición andesítica.

Domos andesíticos y riolíticos (0.05 Ma)

Los domos andesíticos y riolíticos se encuentran aleatoriamente distribuidos en dirección noreste de la zona de estudio, cerca de Tuxpan. Son domos relativamente pequeños, con una altura que varía desde 400 a 700 m desde su base a la cima, siendo el C. de Zirahuato el más elevado; este ha sido datado con una edad 0.05 Ma con una composición riolítica (Israde-Alcántara y Martínez, 1986; Blatter *et al.*, 2001).

Flujos piroclásticos y riolíticos

Estos depósitos se distribuyen aleatoriamente al noroeste de Jungapeo y al este de Tuxpan. Están conformados por depósitos de flujos piroclásticos y de caída, así como algunos flujos basálticos. No han sido estudiados con precisión hasta la fecha, pero se piensa que son contemporáneos a los domos riolíticos y dacíticos, así como a los conos y lavas.

Depósitos aluviales y coluviales

Los depósitos aluviales y coluviales se encuentran distribuidos en las planicies y pie de monte. Los depósitos coluviales son producto de la erosión de las rocas que conforman las laderas de los macizos, sierras, montañas y mesas. Por otra parte, los depósitos aluviales son productos del transporte y depósitos de detritos por medio de la acción del agua, comúnmente se localizan en llanuras de inundación. Algunos de estos depósitos (cerca de Turundeo) están constituidos por gravas empacadas en limo color café claro. También presentan bloques angulosos de roca andesita (Triada, 2000).

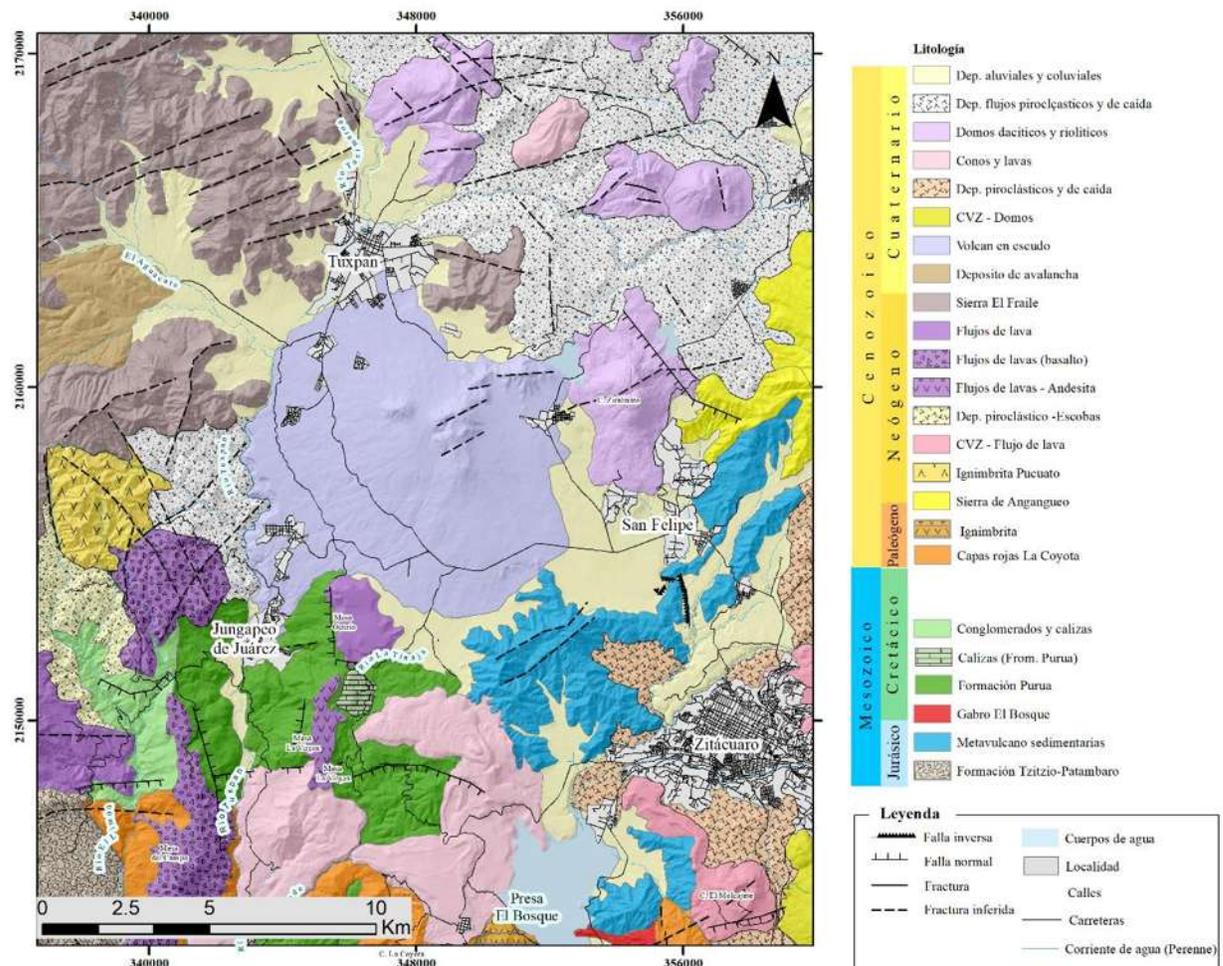


Figura 9. Mapa geológico de la zona de estudio, el cual abarca desde el norte de Tuxpan hasta la presa El Bosque al sureste de Zitácuaro. Modificado de: Israde-Alcántara & Martínez, 1986; Pasquaré et al., 1991; Corona-Chávez, 2000; Blatter et al., 2001; Bernal-Hernández et al., 2019; Corona-Chávez, en proceso de publicación).

Particularmente, cada cuerpo inestable presenta las siguientes litologías. El PRM de Turundeo está compuesto de base a cima por los siguientes tipos de rocas (Figura 10):

Depósito de deslizamiento: Clastos de moderado a muy mal seleccionados, de tamaños que van de ~2 cm a 60 cm, de angulosos a sub-angulosos, dentro de una matriz con textura que varía de arenosa a arcillo-arenosa. En general presenta de cuatro tipos de clastos: fragmentos de riolita, andesita y esquistos verdes (Figura 10).

Riolita: roca color café rojizo, presenta una textura porfídica, constituida por biotitas, plagioclasas y cuarzo (Figura 10e). Y presenta estructuras de flujo como se muestra en la Figura 10d.

Brecha: bloques de color café rojizo a café claro y angulosos, de composición riolítica; cerca del flanco izquierdo (Figura 10c), presentan un tamaño que va de ~3 a 10 cm, mal clasificados, dentro de una matriz arenosa color café oscuro. Mientras que, en la parte central de cuerpo inestable, a la altura del escarpe principal, esta unidad presenta bloques de tamaño que va de ~1 a 1.5 m.

Deposito coluvial: bloques color gris rojizo, gris claro, con una redondez de sub-angulosos a sub-redondeados, mal clasificados, con un tamaño de 0.5 a 40 cm, inmersos en una matriz de suelo de tamaño de arenas gruesas color café.

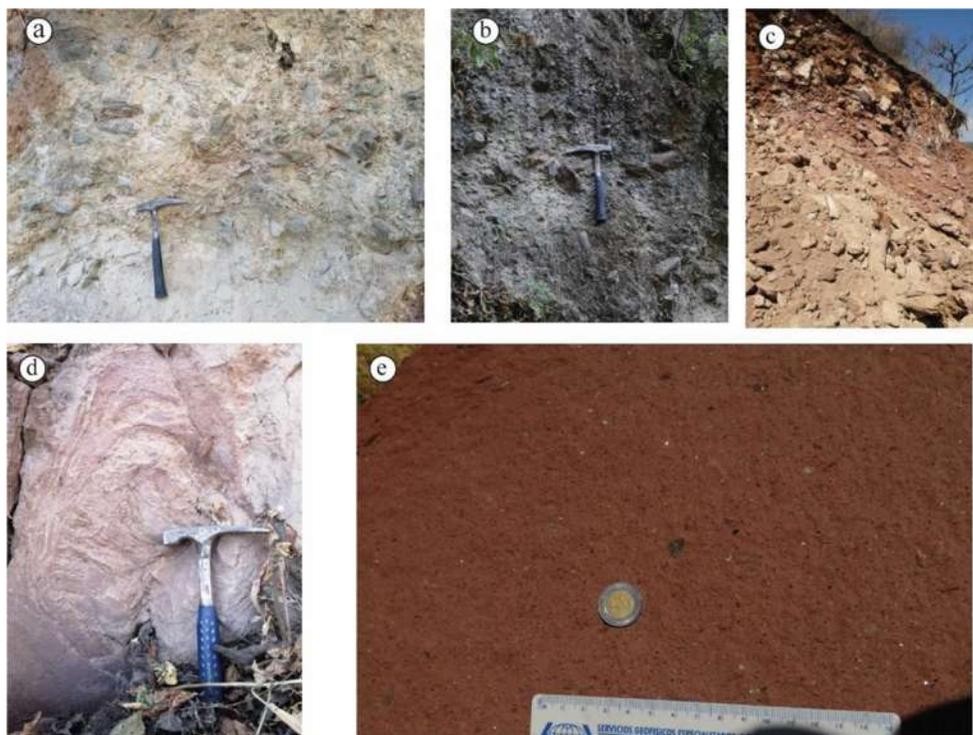


Figura 10. Litología presente en el cuerpo inestable de Turundeo. a) y b) Depósito de deslizamiento. c) Riolita fracturada. d) Riolita con estructuras de flujo e) Textura porfídica de la riolita.

El PRM de las Pilas, está constituido de base a cima por las siguientes unidades:

Brecha volcánica: El área afectada está constituida en su totalidad por clastos de color gris oscuro, angulosos y sub-angulosos, mal clasificados, con tamaños variados desde ~5 hasta 50 cm, predominando los clastos de menor tamaño, inmersos en una matriz arcillosa rojiza. Los clastos presentan textura afanítica de composición andesítica, con la lupa se observaron algunos minerales de plagioclasa y olivino (Figura 11a).

Bloques rodados: bloques grandes dispersos en todo el PRM, colores que varían de gris a café claro, tamaño ~0.50 a 1 metros de longitud, algunos presentan vesículas de hasta ~5 cm, y otros presentan estructuras de flujos de lava de composición andesítica (Figura 11 b, c y d).

Flujos de lava: En la parte superior del PRM está constituida por flujos de lava del volcán Zacapendo, con composición basáltico andesítica.



Figura 11. Litología del cuerpo inestable de Las Pilas a) clastos de andesita en el escarpe cerca de las casas b) clasto de andesita en el escarpe superior. c) Rodado de andesita con vesículas. d) Bloque de andesita con estructuras de flujo.

Por otra parte, la geología del PRM de Jungapeo, fue tomada de Villaseñor-Reyes, (2019). En dónde se describe que la base de este cuerpo está integrada por alternancias de areniscas de grano fino a grueso, con distintos grados de consolidación, presencia de niveles de caliza y nódulos de calcita. Posteriormente se encuentra el depósito que constituye el cuerpo del PRM, formado por roca residual, predominando lutitas y escasas areniscas, sin estructura. La parte superior está compuesta por intercalaciones de arenisca de grano grueso y lutitas, fuertemente plegadas.

5. METODOLOGÍA

La metodología es una de las partes más importantes de cualquier trabajo, debido a que muestra la sucesión de pasos que se siguieron para desarrollar el proyecto de investigación. Este capítulo se divide en cinco subcapítulos, los cuales corresponden a cinco fases de desarrollo del proyecto (Figura 12):

- 1) Implementación de los SIG para generar los insumos utilizados en la elaboración de los mapas temáticos.
- 2) Proceso de elaboración de un mapa inventario regional.
- 3) Proceso de delimitación de los PRM de este estudio.
- 4) Proceso de registro y clasificación de las nubes de puntos.
- 5) Obtención de mapas de distancias mediante el método *Cloud To Cloud (C2C)*, cinemática, morfología y morfometría.

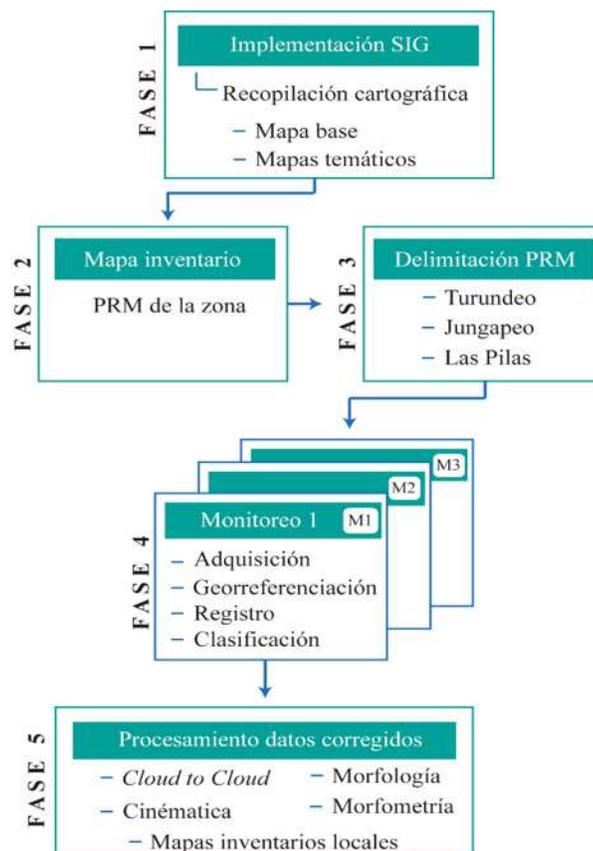


Figura 12. Diagrama representativo de la metodología que se utilizó en este trabajo.

5.1 FASE 1: Implementación SIG

La implementación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) fue el primer paso para elaborar el mapa base y mapas temáticos. Para la elaboración de mapas temáticos se utilizaron modelos digitales de elevación (MDE) tipo terreno, a escala 1:10, 000 (edición 2017) con resolución de 5 m, descargados de la plataforma de INEGI. Se generó un mosaico con 12 cartas (Figura 12), posteriormente se generó un MDE y un modelo digital de sombras, el cual fue tomado de base para diferentes mapas como el de zona de estudio, geológico, edafología e inventario de deslizamientos.

Por otra parte, para la descripción de la hidrología y edafología se utilizaron los datos vectoriales a escala 1:50000, con una resolución de 15 m (edición 1998).

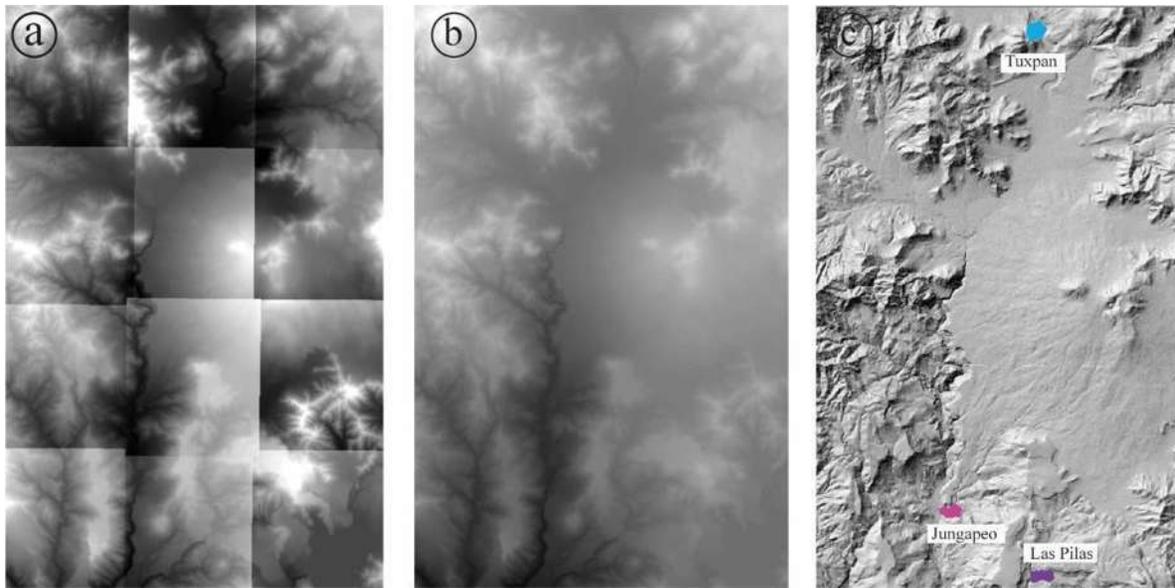


Figura 13. Implementación del SIG a) MDE escala 1:10 000. b) Mosaico generado a partir de 12 cartas del MDE. c) Modelo de sombras generado a partir del mosaico.

5.2 FASE 2: Mapa inventario

Los inventarios son un conjunto de registros históricos de un área geográfica en específico, que presenta PRM desarrollados bajo factores condicionantes y detonantes similares. Estos, permiten identificar y relacionar características de estos deslizamientos en un contexto regional.

El mapa inventario de PRM regional se elaboró con el modelo de sombras con resolución de 5 m (subcapítulo 5.1), curvas de nivel a cada 10 m, a través del software de *ArcGis* y *Global Mapper*.

Además, se hizo foto interpretación a través de la plataforma de *Google Earth*. Por último, los cuerpos de PRM identificados se digitalizaron en ArcGis.

5.3 FASE 3: Delimitación PRM de estudio

A partir del mapa inventario del subcapítulo anterior, se obtuvieron diversos PRM de la zona y se les dio mayor importancia a tres de estos: Turundeo, Jungapeo y Las Pilas. Debido a que la zona en la que se desarrollan representa un peligro para diferentes localidades.

Para la delimitación precisa de estos PRM se utilizó el modelo de sombras con resolución de 5 m, mapa de pendientes generado a partir de este, curvas de nivel cada 10 m e imágenes satelitales de *Google Earth* y de *Big satellite* (plugin *ArcBruTile* en *ArcGis*).

5.4 FASE 4: Monitoreos con Escáner Láser Terrestre (TLS)

El escáner láser terrestre es un sensor activo que permite obtener datos del terreno usando la tecnología láser. Este obtiene información del entorno real, que nos permite reconstruir digitalmente la escena a partir de nubes de puntos en 3D. Una de las principales ventajas del uso del TLS es que nos permite tomar una gran cantidad de puntos con alta precisión en un periodo de tiempo corto (Santana *et al.*, 2008; Oguchi *et al.*, 2011).

El equipo utilizado en el trabajo de campo fue un escáner láser terrestre (tipo estático) marca RIEGL VZ-1000 (Figura 14). Este proporciona una adquisición de datos sin tener contacto directo con la zona de estudio, con un rango de medición de hasta 1400 m con un láser infrarrojo, con una medición de hasta 122 000 puntos/segundo. Se basa en la digitalización de eco y procesamiento de la forma de onda, lo que permite tener una gran capacidad de medición incluso con condiciones



Figura 14. Escáner láser terrestre utilizado en este trabajo.

atmosféricas adversas. El mecanismo de barrido de línea utiliza un espejo poligonal de rotación rápida que proporciona líneas de barrido unidireccional y paralela. Este tiene un campo de visión de 100° en vertical y 360° en horizontal (RIEGL, 2011; RIEGL, 2017) y una precisión de 8 mm.

Se realizaron un total de tres monitoreos (noviembre 2020, mayo 2021 y febrero 2022) para el caso de Turundeo y las Pilas, en el caso de Jungapeo solo se realizaron dos (noviembre 2020 y febrero 2022), sin embargo, para este PRM ya existían dos monitoreos previos (diciembre 2015 y junio 2016). Cada monitoreo se divide en cuatro partes: adquisición de nubes de puntos, georreferenciación, registro y clasificación.

5.4.1 Adquisición

La adquisición de las nubes de puntos comienza determinando el punto en donde se colocará el escáner. Como primer paso, se debe conocer los PRM en estudio y el terreno en el que se encuentran, para poder determinar los puntos en los que se deben de colocar el equipo del escáner y los reflectores, ya que se deben elegir puntos que garanticen la mayor cobertura posible (Figura 15). Es por eso que se eligieron puntos altos, contrarios a la pendiente del PRM, de tal forma que se tuviera acceso a una buena visión de los cuerpos en estudio. Además, estos puntos deben estar sobre un terreno que permita colocar puntos de referencia sobre la superficie (p.ej. tornillos) (Figura 17, Figura 17, Figura 18), y que sea estable a largo plazo, para realizar el escaneo en diferentes temporadas a partir del mismo punto.

Otro aspecto que se debe de cuidar es comprobar que la posición presente la menor cantidad de obstáculos posibles y que se produzcan la menor cantidad de sombras. También corroborar que se cumplan los alcances máximos del escáner.

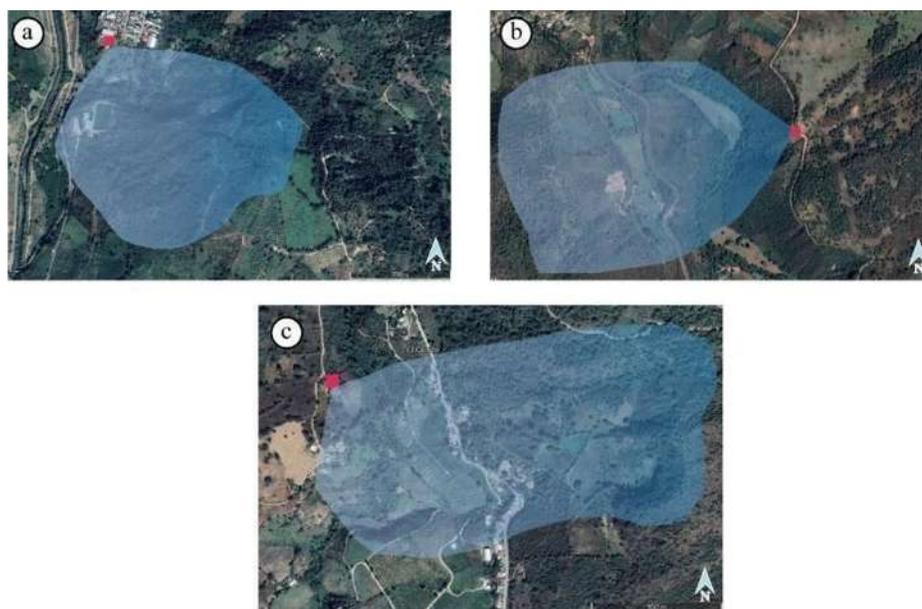


Figura 15. Área que abarca el escáner de los sitios en estudio (polígono azul y sitio en dónde se colocó el escáner (cuadrado rosa). a) Jungapeo, b) Turundeo y c) Las Pilas.

Los puntos de referencia para colocar los reflectores son de suma importancia, así como la geometría de estos. Se deben acomodar de forma espaciada entre ellos, tratando de abarcar la mayor área posible y estar libres de obstáculos. Estos reflectores son diseñados para reflejar la mayor parte del haz láser, de tal forma que el escáner los pueda detectar rápidamente durante un escaneo de mayor resolución y así determinar su centro exacto, ajustándose a una superficie de la nube de puntos (Santana *et al.*, 2008).

La adquisición de los datos se programó desde una computadora portátil utilizando el programa RiSCAN PRO, en el cual se ajusta el área que se desea escanear, se colocan los ángulos máximos y mínimos en la horizontal y vertical, resolución angular y distancia o frecuencia (Tabla 5).

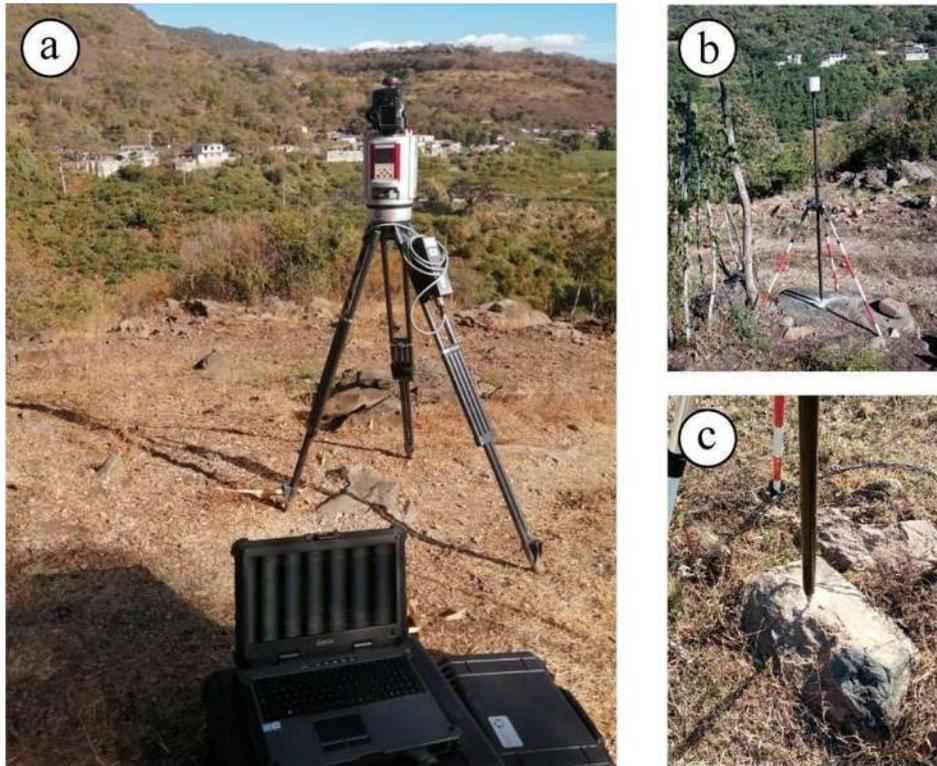


Figura 16. Imágenes de campo en Las Pilas. a) escáner laser terrestre, b) reflectores utilizados en campo, c) tornillo que se coloca en un punto fijo, y se colocan los reflectores en el mismo punto.

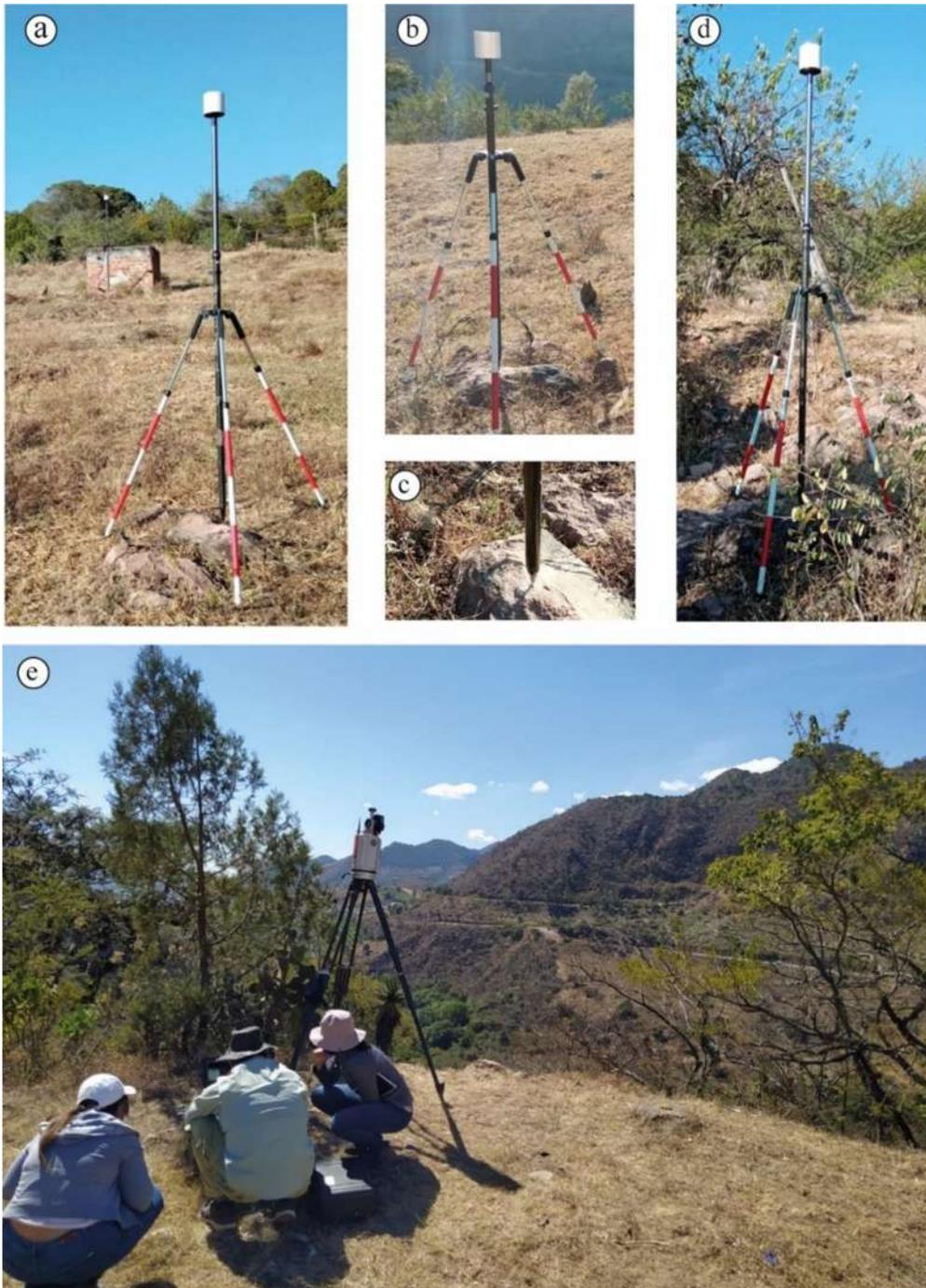


Figura 17. Imágenes de campo de Turundeo. a), b), d) tres de los reflectores utilizados en campo, c) tornillo que se coloca en un punto fijo para colocar los reflectores. e) Uno de los puntos de escaneo.



Figura 18. Imágenes de campo de Jungapeo. a), b), d) reflectores utilizados en campo. b) escáner laser terrestre. c) tornillo que se coloca en un punto fijo, y se colocan los reflectores en el mismo punto.

Tabla 5. Datos utilizados en la adquisición de las nubes de puntos de cada PRM escaneado.

PRM	Monitoreo	Tipo de levantamiento	Distancia /Frecuencia	Resolución angular
Turundeo	M1 - 2020	Panorámico	1400 m /70 kHz	0.03°
	M2 - 2021			
	M3 - 2022			
Jungapeo	M1 - 2015	Panorámico	1400 m /70 kHz	0.04°
	M2 - 2016			0.03°
	M3 - 2020			

Las Pilas	M1 - 2020	Panorámico	1400 m / 70 kHz	0.05°
	M2 - 2021			
	M3 - 2022			
Flanco Pilas	M2 - 2021	Panorámico	450 m / 300 kHz	0.03°
	M3 - 2022			

5.4.2 Georreferenciación

El ELT permite obtener información precisa de los receptores del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) simultáneamente a la obtención de las nubes de puntos de la superficie. Esta información se integra automáticamente a cada nube de puntos. Sin embargo, el GNSS no puede obtener la posición exacta por diferentes factores, uno de estos es la ubicación espacial de la zona de estudio, la cual puede estar limitada por bosques y zonas urbanas, por lo tanto, puede perderse cierta fiabilidad en los datos (Cheng *et al.*, 2018). Por lo que después de obtener estos datos es necesario realizar un tratamiento especializado de las nubes de puntos, que consiste en varias etapas: georreferenciación, registro (fino y grueso) y limpieza o clasificación.

La georreferenciación de nubes de puntos consiste en alinear las nubes de puntos a un conjunto de datos con un mismo sistema de coordenadas. Ya que el escáner cuenta con su propio sistema de coordenadas y estas son transformadas a un sistema de coordenadas externas (geodésicas) de ámbito local o global (Díaz *et al.*, 2014). Este proceso se realizó de forma directa en el software de RiSCAN PRO.

5.4.3 Registro

El registro de nubes de punto consiste en alinear múltiples nubes de puntos para formar una representación detallada de la superficie. Los registros de nubes de puntos suelen ir de grueso a fino.

Registro grueso

El método de registro grueso puede realizarse de dos formas: puntos artificiales o elementos naturales. El registro basado en puntos artificiales, reflectores o *targets*, es a partir de elementos fabricados con material reflectante para que estos puedan ser identificados fácilmente dentro de la escena del escaneo

(Díaz *et al.*, 2014). Es necesario colocar al menos tres de estos elementos y que en cada escaneo se coloquen en el mismo sitio.

Por otra parte, el registro basado en puntos naturales, se refiere a puntos, líneas y superficies que poseen cierta invariabilidad en un periodo largo de tiempo. Estas superficies pueden ser esquinas de edificios, parches de tejados, carreteras o alguna otra característica que pueda ser representativa (Cheng *et al.*, 2018).

Para el registro grueso de las nubes de puntos obtenidas, se utilizó tanto los reflectores como los puntos naturales. Se colocaron cuatro reflectores en cada escaneo, y cada uno tenía su punto de referencia para ser colocado exactamente en el mismo sitio. Los puntos naturales utilizados fueron puntos de esquinas de casas, postes de luz y árboles, todos fuera de las zonas inestables. Al final, para cada escaneo se utilizaron de 8 a 12 puntos alrededor de la superficie inestable, de tal forma que no quedarán dentro del área inestable, pero sirvieran para un mejor ajuste (Figura 19).

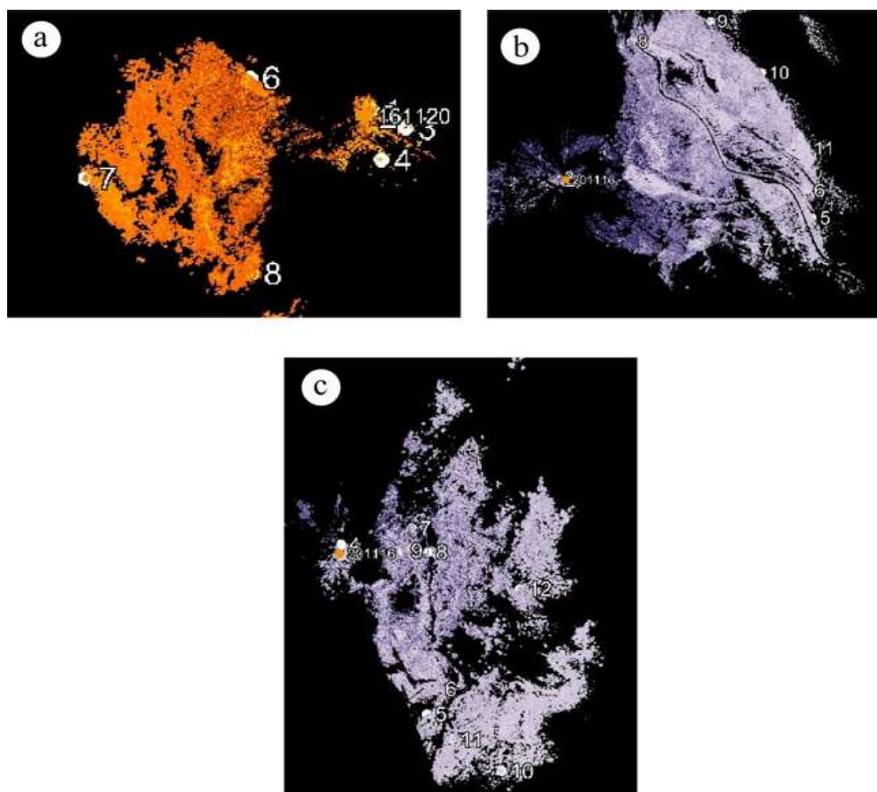


Figura 19. Targets y puntos naturales utilizados en el registro grueso. a) Jungapeo, b) Turundeo y c) Las Pilas.

Los puntos para realizar el registro grueso se colocan manualmente en las nubes puntos en la plataforma de RiSCAN PRO, generando un empalme entre las nubes de puntos con errores centimétricos (Tabla 6), el cual fue mejorado con el registro fino.

Tabla 6. Errores obtenidos en el registro grueso

Temporalidad	Error		
	Turundeo	Jungapeo	Las Pilas
2020 – 2021	4 cm	4 cm	6 cm
2015 - 2016 (Jungapeo)	4 cm	4 cm	6 cm
2020 – 2022	4 cm	6 cm	6 cm
2015 – 2022 (Jungapeo)	4 cm	6 cm	6 cm

Registro fino

El registro fino tiene como objetivo lograr la máxima superposición de dos nubes de puntos. Para esta aproximación existen diferentes métodos, sin embargo, en este estudio se utilizó el método de Aproximación Interactiva (ICP, por sus siglas en inglés) (Cheng *et al.*, 2018).

El método ICP es un algoritmo que determina el mejor emparejamiento entre dos nubes de puntos, mediante la minimización de una función de distancia. El ICP usa la información geométrica (x,y,z) de las nubes de puntos, cuenta con seis grados de libertad (traslación y rotación en los tres ejes de coordenadas) para realizar el ajuste (Díaz *et al.*, 2014).

Para esto se selecciona un número de puntos de un conjunto a registrar y los puntos de referencia correspondientes a estos (Figura 20). Entre cada interacción el algoritmo sigue los siguientes pasos (Díaz *et al.*, 2014):

Encuentra los puntos más cercanos usando la distancia euclidiana entre dos nubes de puntos (Ecuación 1).

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

Posteriormente calcula la alineación de la nube de puntos mediante una transformación geométrica, encontrando la matriz que mejor se ajuste mediante el método de descomposición de valores singulares (SVD) o mediante *quaterniones*. La matriz se compone por valores de rotación (3x3) y vectores de traslación (una columna) (Ecuación 2).

$$= \begin{bmatrix} R1 & R4 & R7 & 0 & R2 & R5 & R8 & 0 & R3 & R6 & R9 & 0 & x & y & z & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Por último, esta matriz de transformación se genera en una nueva nube de puntos y este proceso se realiza interactivamente hasta que el valor de error se minimiza o mantiene constante (Cheng *et al.*, 2018).

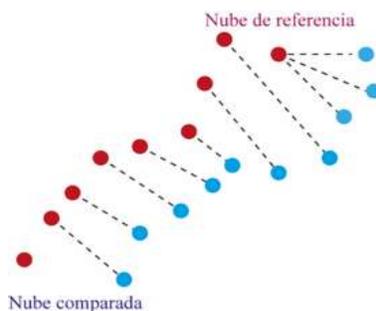


Figura 20. Estimación de la correspondencia entre la nube de referencia no deformada *P* (rojo) y la nube deformada *Q* (azul). Tomada de Jafari (2016).

El registro fino de estos cuerpos se realizó generando planos en las nubes de puntos, a partir de un conjunto de puntos que estuvieran fuera del área del cuerpo inestable. Posteriormente, los planos generados en cada nube de puntos realizan el emparejamiento a partir del método ICP. Este método permite alinear de manera milimétrica las nubes, generando el mínimo error posible (Tabla 7) (Figura 21).

Tabla 7. Errores obtenidos en el registro fino.

Temporalidad	Error		
	Turundeo	Jungapeo	Las Pilas
2020-2021	3 mm	2 mm	1 mm
2015-2016 (Jungapeo)			
2020 – 2022	3 mm	4 mm	1 mm
2015 – 2020 (Jungapeo)			

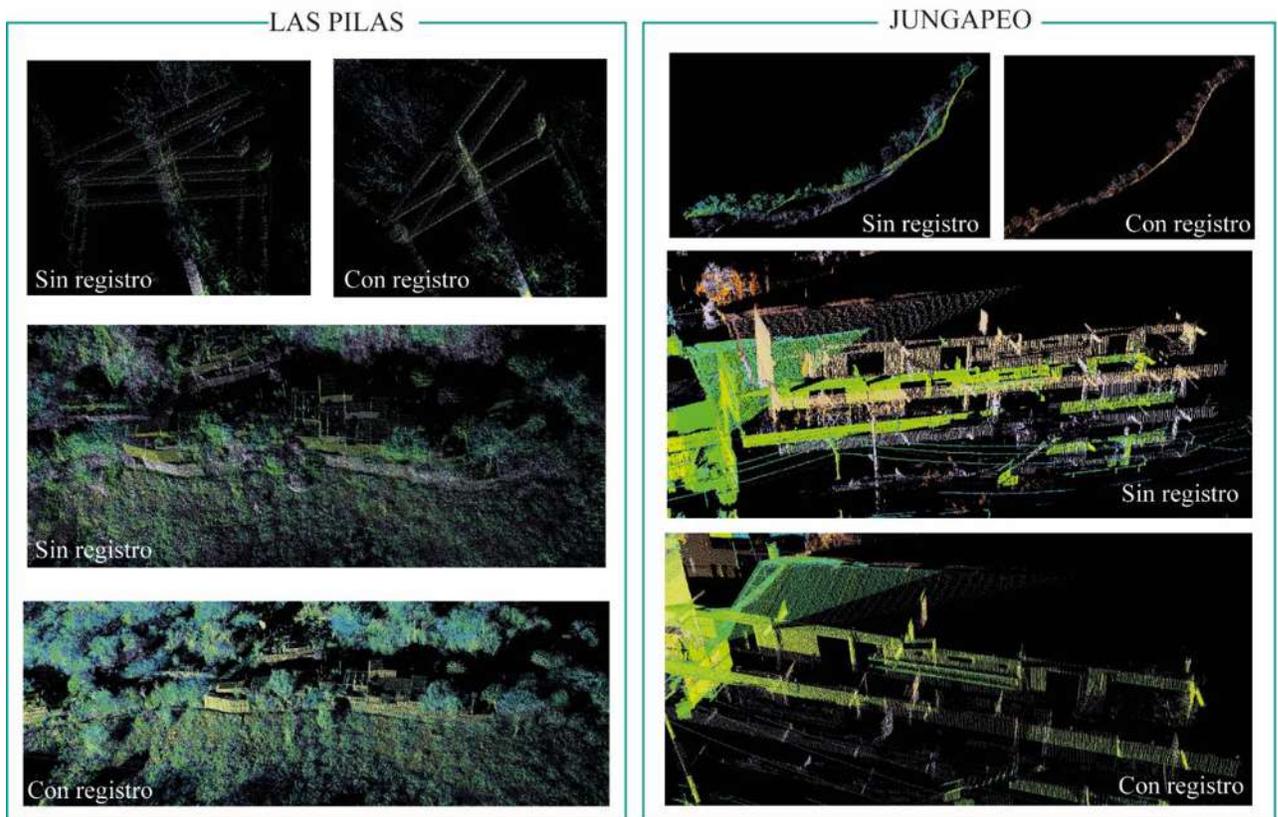


Figura 21. Nubes de puntos antes y después de realizar el registro. Se puede notar el desplazamiento que hay entre las nubes antes de realizar el registro.

5.4.4 Clasificación o limpieza

Las nubes de puntos 3D sin procesar obtenidas directamente del dispositivo del escáner láser suelen estar contaminadas con ruido y valores atípicos. Por lo que una de las primeras etapas de procesamiento consiste en limpiar puntos o muestras atípicas de la superficie escaneada (Rakotosaona et al., 2020). Dentro de estos puntos también entran los puntos que quedan fuera de la zona que abarca el PRM, los cuales usualmente pueden ser borrados manualmente (Santana et al., 2008).

De acuerdo a Rakotosaona et al., (2020), todo algoritmo de limpieza de nube de puntos debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Equilibrar la eliminación de ruido y valores atípicos, conservando la fidelidad de los datos de la superficie escaneada.
- Ser autoajutable, que no requiera como entrada estimaciones precisas del modelo de ruido.
- El resultado de la eliminación de ruido no debe depender del ángulo de escaneo ni de la elección del sistema de coordenadas.
- Dejar la superficie escaneada si la entrada está libre de ruido.

La limpieza de los datos se realizó mediante una clasificación automática de puntos del terreno en Global Mapper, tomando características del terreno como: altura mínima por encima de la elevación mínima media local que debe tener un punto para ser considerado un punto no terrestre, delta de altura máxima (metros), pendiente esperada del terreno (grados) y altura máxima de edificios (metros). Sin embargo, este nos quitaba ciertos puntos correspondientes al terreno.

Por lo anterior, se optó por eliminar la vegetación de forma manual a través de la plataforma de RiSCAN PRO. Se crearon perfiles muy finos a través de todo el cuerpo inestable y se eliminó la vegetación (Figura 22 y Figura 23). Cabe mencionar que en zonas con vegetación muy pequeña como tipo pastizal, fue muy difícil identificar la diferencia entre vegetación y terreno, por lo que se dejó dicha vegetación, para evitar errores en los procesamientos posteriores. Usualmente las nubes de puntos contienen millones de puntos, pero después de realizar la limpieza, la cantidad disminuye hasta la mitad o menos (Tabla 8).

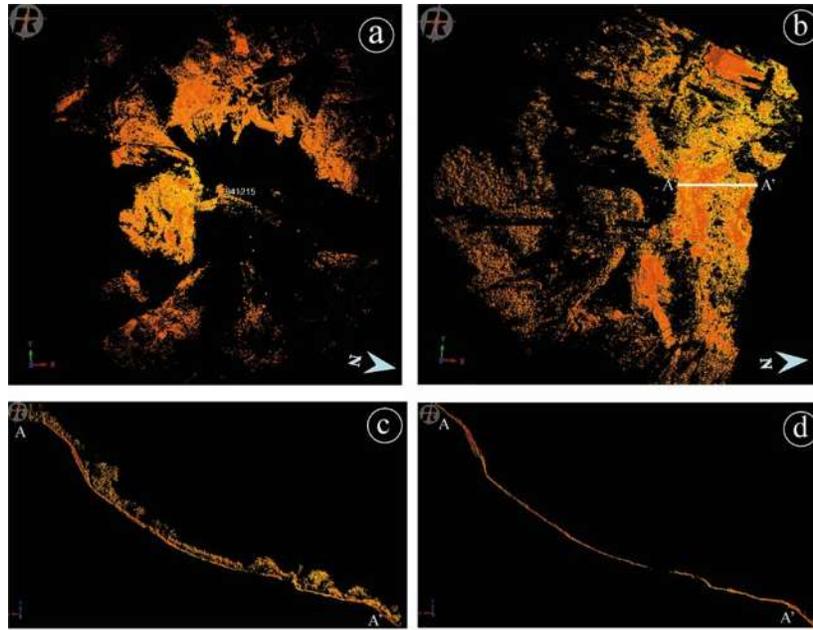


Figura 22. Clasificación de nubes de puntos de Jungapeo en RiSCANPRO. a) Nube completa obtenida con el ELT. b) Nube de puntos delimitada al PRM. c) Perfil en nube de puntos delimitada, sin clasificar, siguiendo el perfil A-A' en (b). d) Perfil de nube de puntos clasificada (sin vegetación) siguiendo el perfil A-A' en (b).

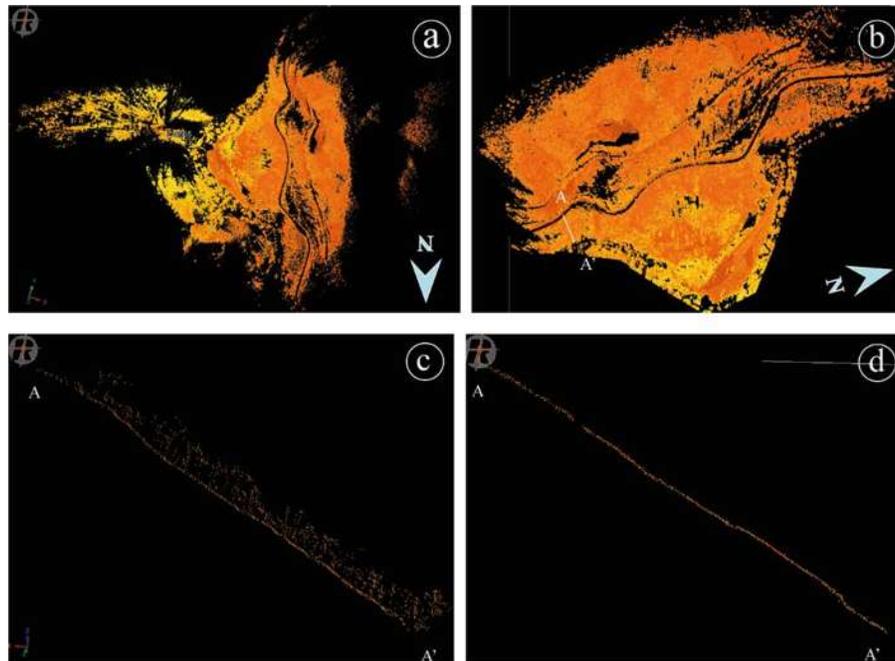


Figura 23. Clasificación de nubes de puntos de Turundeo en RiSCANPRO. a) Nube completa obtenida con el ELT. b) Nube de puntos delimitada al PRM. c) Perfil en nube de puntos delimitada, sin clasificar, siguiendo el perfil A-A' en (b). d) Perfil de nube de puntos clasificada (sin vegetación) siguiendo el perfil A-A' en (b).

Tabla 8. Cantidad de puntos obtenidos totales y clasificados, después de recortar y eliminar puntos manualmente.

PRM	Monitoreo 1		Monitoreo 2		Monitoreo 3	
	Total	Clasificados	Total	Clasificados	Total	Clasificados
Turundeo	11,767,505	587,124	12,375,027	660,264	31,851,828	1,743,981
Jungapeo	11,317,494	510,897	11,006,202	490,996	18,829,507	598,574
Las Pilas	32,703,249	229,493	33,367,928	287,978	32,658,575	283,502

5.5 Procesamiento de datos corregidos

Los datos corregidos nos permitieron crear una serie de insumos topográficos base como modelos 3D de alta resolución y MDE tipo terreno de cada PRM en estudio (Figura 24), procesados en *Cloudcompare* y *Global Mapper*, respectivamente. Estos insumos nos permitieron obtener la morfología, morfometría, topografía y cinemática de cada PRM en estudio.

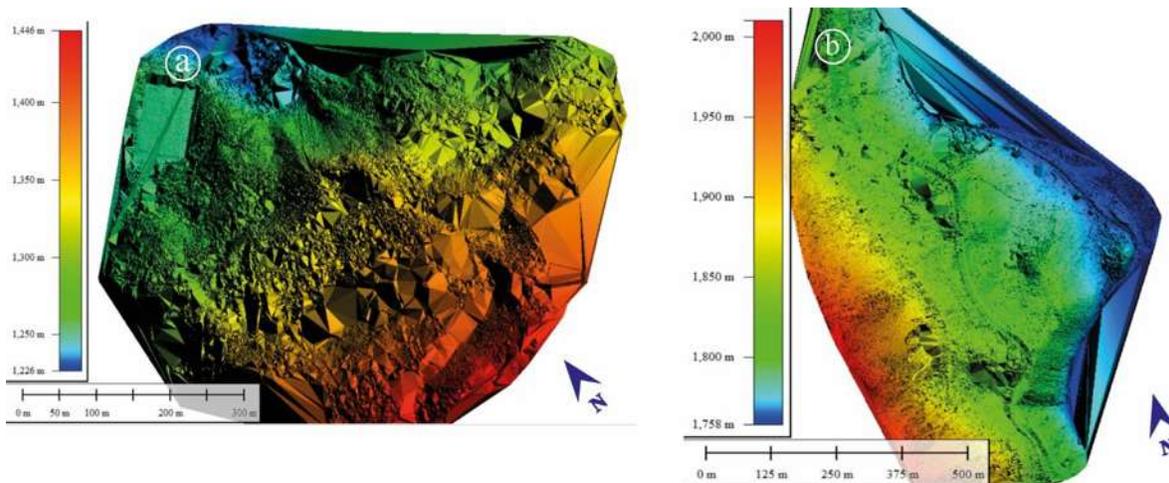


Figura 24. Modelos de sombras generados en Global Mapper, a partir de las nubes de puntos. a) Jungapeo b) Turundeo.

5.5.1 Morfología, morfometría y mapas inventarios locales

La morfología y morfometría se obtuvo con apoyo de los MDE de alta resolución, los cuales permitieron delimitar con mayor precisión algunos límites de los cuerpos inestables y de los Procesos de Remoción en Masa secundarios (PRMs) y fracturas. Lo anterior fue digitalizado en la plataforma

de ArcGis, mediante la cual también se obtuvieron características como ancho, longitud, profundidad y área.

Para delimitar los mapas inventarios locales, además de utilizar los MDE, también se utilizaron como apoyo los modelos 3D procesados en *Cloudcompare*, imágenes satelitales de *Google Earth*, curvas de nivel a 10 y 1 m (Figura 25) y mapas inventarios propuestos anteriormente por autores como Hernández-Madrigal y Garduño-Monrroy (2012) y Villaseñor-Reyes (2019).

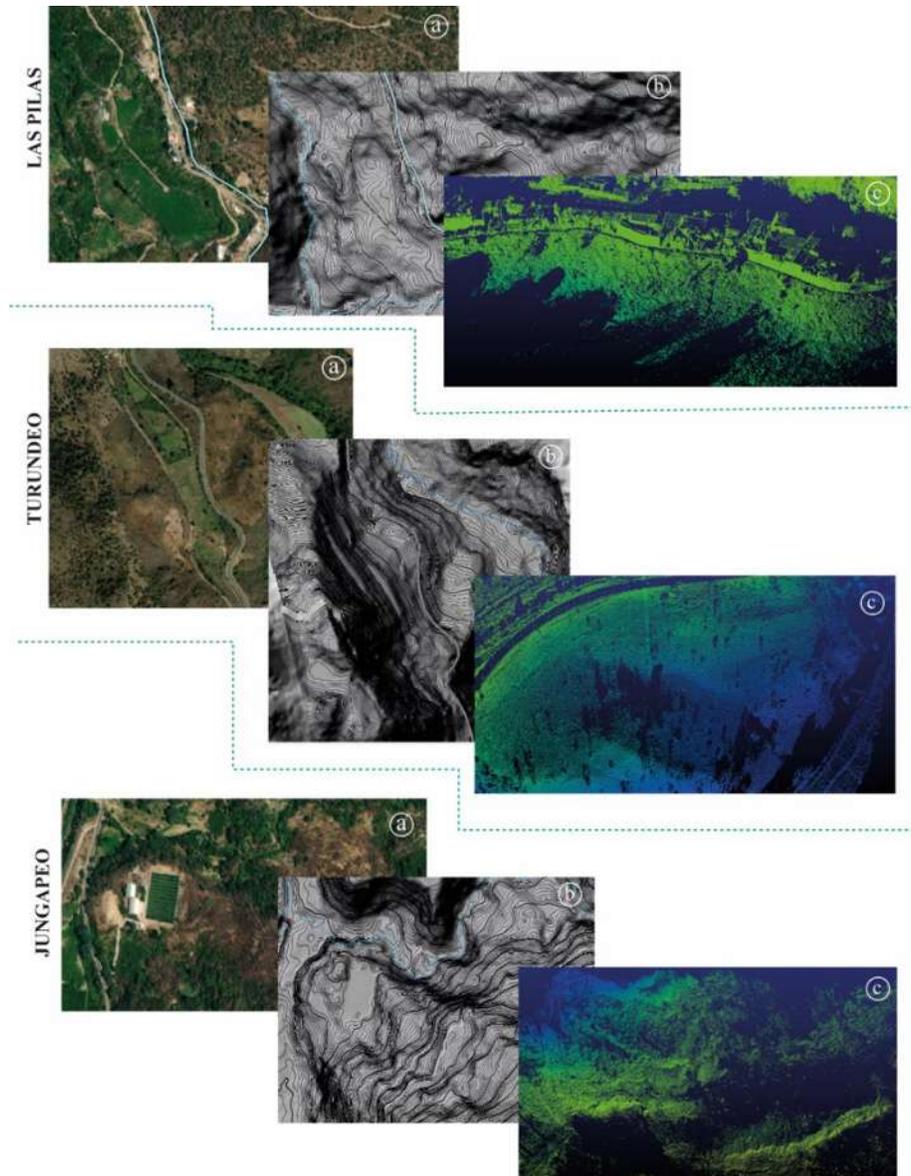


Figura 25. Insumos utilizados para delimitar los cuerpos inestables. a) Imagen satelital. b) Modelo de sombras escala 1:10 000 y curvas de nivel. c) Nubes de puntos.

5.5.2 Cloud To Cloud (C2C)

El cálculo de distancias entre dos nubes o entre una nube es conocido como C2C. Este método sirve para identificar el desplazamiento entre dos nubes de puntos de diferentes temporadas.

Cloud to cloud (C2C)

El método *cloud to cloud (C2C)* o nube a nube es un método comparativo que se basa en el cálculo de distancias entre dos nubes: una de referencia y una comparada. De tal forma que calcula la distancia vecina más cercana entre la nube de referencia y los datos de nube comparada (CloudCompare, 2015). El principio de la distancia vecina más cercana se usa para calcular la distancia entre dos puntos, donde, para cada punto de nube comparada se busca el punto más cercano en la nube de referencia y se calcula su distancia euclidiana (Figura 26) (Ahmad-Faud *et al.*, 2018; Suárez, 2019). Jafari (2016), menciona que es el método más directo y sencillo para comparar nubes de puntos 3D.

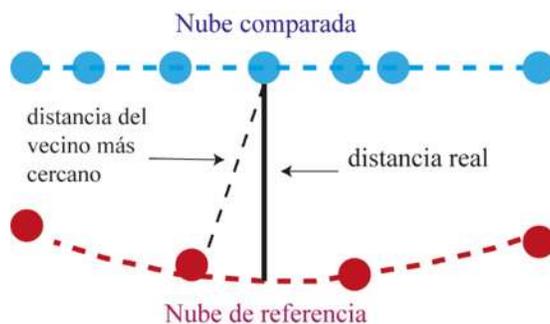


Figura 26. Distancia medida del vecino más cercano. Tomada de Jafari, 2016.

Es un método a escala milimétrica que permite identificar pequeños movimientos a lo largo de cierto tiempo a partir de análisis espaciales localizados (Jafari, 2016), que determinan la diferencia de distancia entre dos épocas de datos de escaneo láser terrestre. Las diferencias de distancia se relacionan con el movimiento de los flujos de roca en estudio (Ahmad-Fuad *et al.*, 2018).

Este procesamiento se realizó en la plataforma de CloudCompare, en el cual se debe elegir el papel de la nube de referencia (antigua) y la que será comparada (reciente), se calcula automáticamente la distancia. La nube comparada es aquella en la que se calcularán las distancias, ya que CloudCompare calcula las distancias de cada uno de sus puntos en relación a la nube de referencia, esta nube aloja el campo escalar (Jafari, 2016).

5.5.3 Cinemática

La cinemática se estudió a partir del movimiento del terreno en cada monitoreo, esto a través del cálculo de distancias mencionado anteriormente y de perfiles topográficos, para poder atribuir valores de desplazamiento y dirección.

El primer paso fue identificar las zonas con mayor desplazamiento obtenidas en los mapas de distancias, para posteriormente delimitar perfiles topográficos en los MDE a través de *Global Mapper*, exportar los datos en formato Excel, graficar y unir los perfiles de sitios específicos. Por último, estos gráficos de Excel se exportaron a *Adobe Illustrator (Ai)*, para calcular distancias entre cada perfil, correspondiente a cada uno de los monitoreos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Este capítulo muestra los resultados obtenidos a partir del procesamiento de las nubes de puntos, así como la interpretación de las características morfológicas de los diferentes cuerpos inestables e inventarios de los mismos.

Se divide en cuatro subcapítulos: el primero muestra mapas inventarios; el segundo, tercero y cuarto, son dedicados a cada uno de los PRM en estudio, en los cuales se desarrolla información relacionada a su morfología, morfometría, cinemática y perfiles topográficos. Asimismo, se desarrolla la discusión correspondiente a cada uno de los PRM en cuestión.

6.1 Mapa inventario de cuerpos inestables

El mapa inventario permitió identificar al menos 26 cuerpos de PRM en el área de estudio (Figura 1). En conjunto estos cuerpos abarcan un área de 15,574,256 m², la mayoría se desarrollan en laderas con pendientes mayores a 45°. Además, están compuestas por rocas volcánicas (p.ej. flujos de lavas y depósitos piroclásticos), sobreyaciendo a rocas sedimentarias (p. ej. intercalaciones de areniscas, limolitas y lutitas), estas últimas en muchos casos, fungen como planos de debilidad (estratos). Estas rocas a su vez se encuentran afectadas por fallas con dirección NE-SW y E-O. Aunado a esto, la mayoría de estos cuerpos son afectados al pie de talud por la erosión generada por ríos y arroyos. Todos estos factores mencionados anteriormente, son factores formadores y detonantes de PRM.

La mayoría de estos cuerpos inestables se localizan en laderas alejadas de poblaciones, sin embargo, hay otros, como los de este estudio (Figura 27), que son de gran importancia, debido a que se desarrollan cerca o sobre localidades y vías de transporte muy transitadas. Además, presentan evidencia de actividad reciente, lo que significa un riesgo continuo a la población.

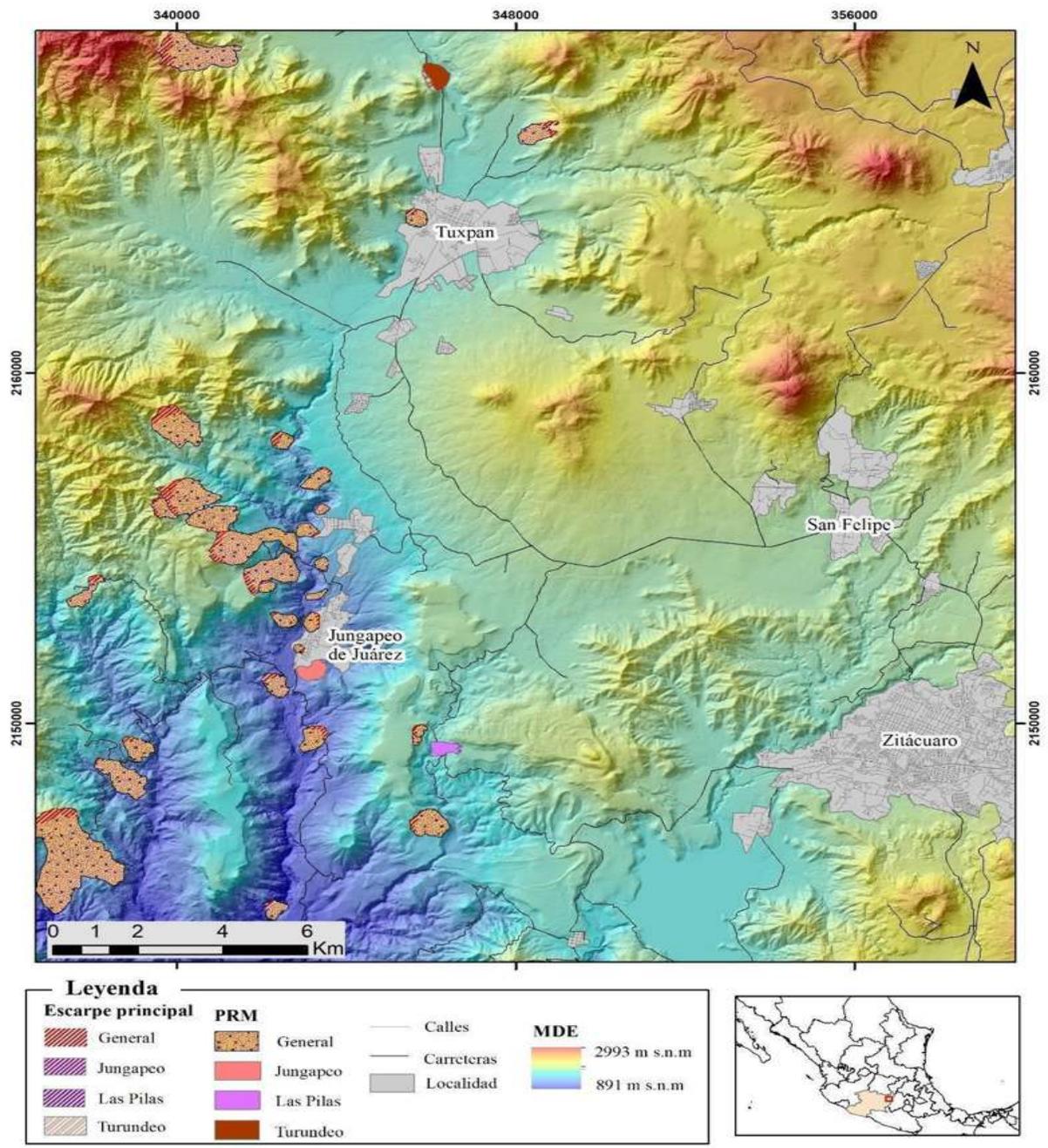


Figura 27. Inventario de deslizamientos del área de estudio.

6.2 Deformación de ladera rocosa Turundeo, Tuxpan

La ladera inestable de Turundeo se encuentra al norte de la ciudad de Tuxpan y al SW de la localidad de Turundeo, en la ladera este del C. El Molcajete (Figura 28). El cuerpo en movimiento se desplaza perpendicularmente a la carretera federal N° 15 Toluca-Morelia, presentando su frente de avance en el borde derecho del río Taxiomaroa.



Figura 28. Vista panorámica del cuerpo inestable de Turundeo.

6.2.1 Morfología y morfometría

El cuerpo principal de Turundeo tiene una longitud de 900 m, un ancho de 700 m, con un desnivel topográfico de 230 m de base a cima, se infiere el desarrollo de una superficie de desplazamiento a una profundidad de 37 m, y comprende un área total de 365,104 m², afectando toda la ladera este del cerro El Molcajete. Los flancos que lo limitan son poco definidos, en especial el flanco derecho. La parte superior de este cuerpo está limitada por un lineamiento dirección N-S, el cual podría estar asociado a alguna falla; además de presentar otras estructuras de tensión como fracturas en la parte superior; en la parte media del cuerpo se observa basculamiento y al menos un contraescarpe;

mientras que en la parte inferior se identificó un abultamiento o levantamiento que se asocia a un deslizamiento antiguo y al continuo desplazamiento que tiene el cuerpo.

Por lo anterior, este cuerpo inestable se clasifica como una deformación profunda de ladera o mejor conocida como *rock slope deformation* (Hungr et al., 2013), la cual también es conocida como flujo de rocas (Dikau et al., 1996); de acuerdo a Ambrosi y Crosta (2006), este tipo de deformaciones se asocian a fracturas, planos de estratificación, fallas, y pueden desarrollar una superficie de falla curva o plana (Figura 29), lo que limita la estabilidad de la ladera y genera un comportamiento anisotrópico. Además, se caracterizan por desarrollar deformación interna, la cual en este caso se asocia a los PRMs de la parte media e inferior.

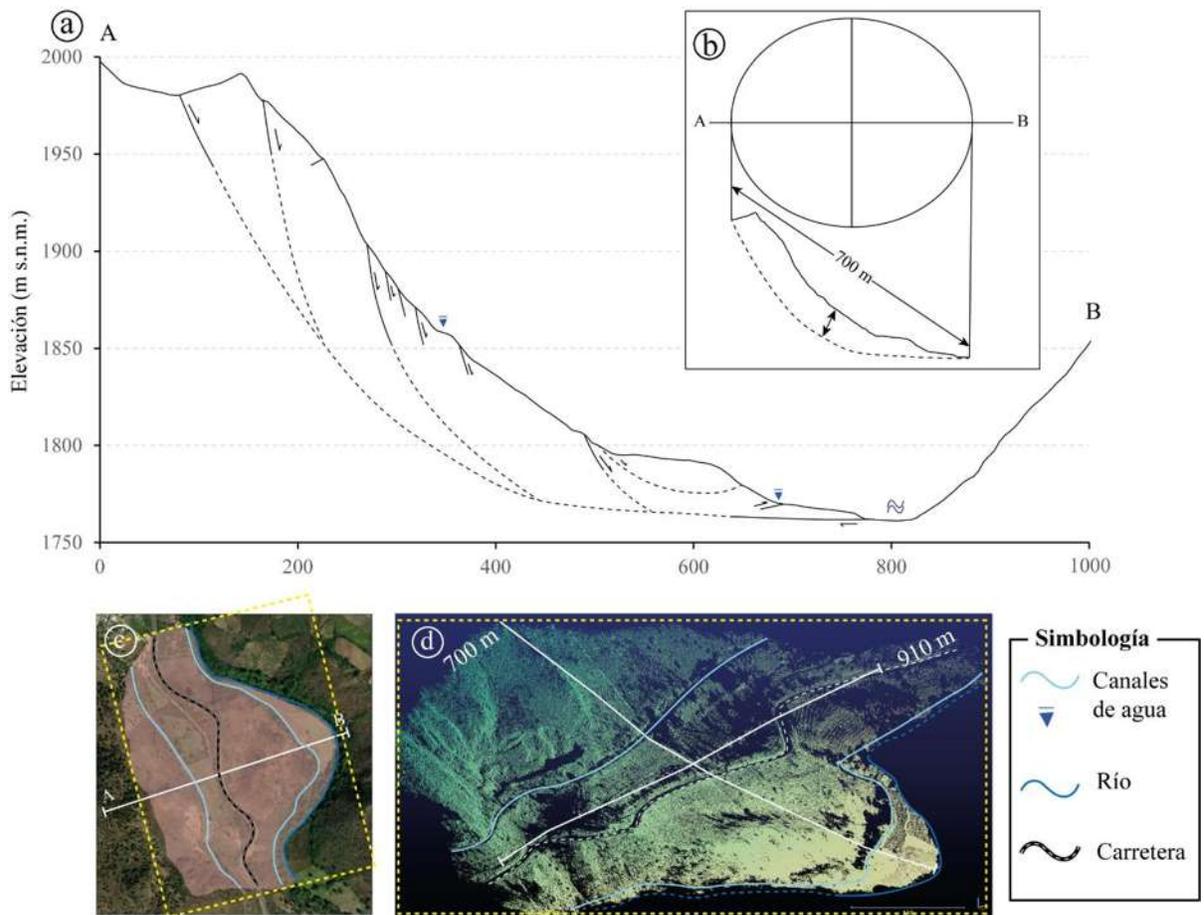


Figura 29. Deformación profunda de ladera de Turundeo. a) Perfil topográfico, muestra las características estructurales: fracturas, superficies de deslizamiento inferidas, canales de agua (triángulos invertidos) y río Taximaroa en la parte inferior. b) Dimensiones aproximadas del cuerpo inestable, tomando de referencia el trabajo de WP/WLI4 (1993) (Anexo 1). c) Ubicación del perfil topográfico obtenido A-B. d) Dimensiones de la deformación, obtenida a través de CloudCompare.

La deformación presenta pendientes mínimas que van de 2 a 9 ° en las partes medias de los PRM secundarios (PRMs), y pendientes máximas de 37 a 81° en los escarpes y pie de los mismos. Cabe mencionar que delimitar los flancos de este cuerpo fue complicado, a pesar de que se encuentra en un estado activo, las fracturas son camuflajeadas por la actividad agrícola y re-encarpetamiento frecuente de la carretera.

Al interior del cuerpo principal se desarrollan al menos cuatro PRM secundarios (Figura 30) de tipo traslacional y rotacional. Dos de estos son bastante extensos, ocupando un área aproximada de 156,065 m² entre los dos, dicha área representa el 40% del área total del cuerpo inestable. Cabe mencionar que cada PRM presenta diferente dirección preferencial: NE-SW y el otro NW-SE, las cuales se pueden observar en la Figura 32. También presentan fracturas distribuidas en todo el cuerpo inestable, con direcciones perpendiculares a la dirección de desplazamiento de dichos cuerpos. Algunas de estas fracturas fueron cartografiadas en campo en 2012 y proporcionadas por Hernández-Madriral, otras fueron obtenidas de un informe realizado por Triada (2000), y otras se obtuvieron a través de la técnica LiDAR; sin embargo, no se corroboraron en campo debido a que la vegetación no lo permitió (Figura 30).

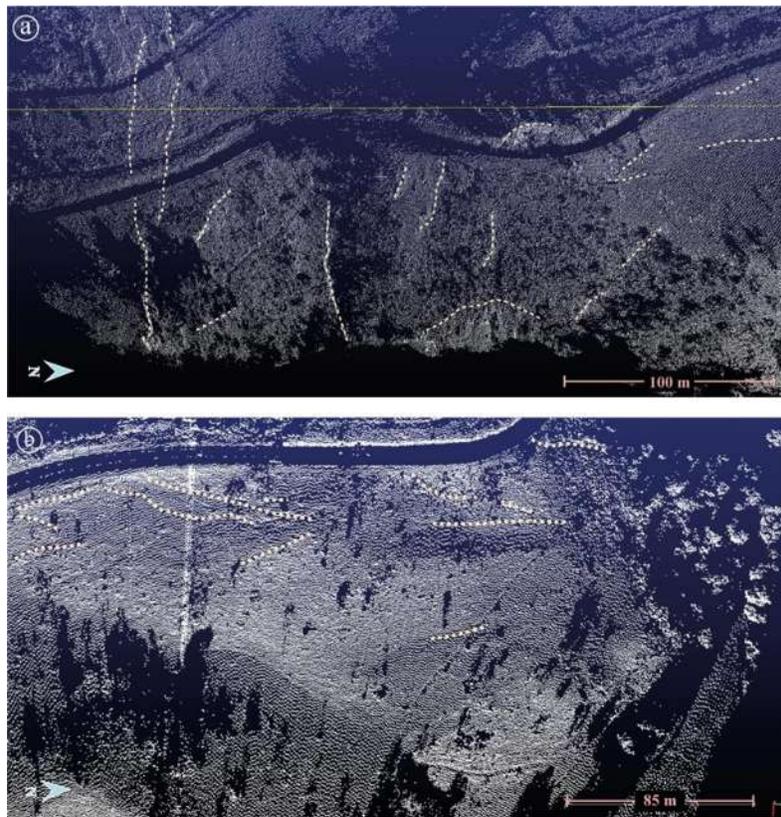


Figura 30. Nubes de puntos de Turundeo. a) Fracturas de flanco izquierdo, delimitadas con líneas punteadas blancas. b) Fracturas del PRMs del centro, delimitadas con líneas punteadas amarillas.

A continuación, se describen con mayor detalle los PRMs mencionados anteriormente:

- 1) El PRMs número 1, fue descrito por primera vez por Triada (2000), el cual ha sido modificado y corroborado en este estudio. Tiene un área aproximada de 59,684 m², el flanco izquierdo presenta la mayor cantidad de fracturas, estas fueron identificadas con gran precisión. Así como las fracturas que comienzan a formarse en la corona del cuerpo por encima del banco de material el cual está en funcionamiento y puede ser el causante de estas fracturas. Otras, se identificaron en el pie del cuerpo en las cuales el mayor desplazamiento se asocia con el desplazamiento de la parte baja del PRMs. Se clasifica como deslizamiento traslacional, generado por el límite entre el depósito del deslizamiento antiguo y la brecha volcánica.
- 2) Se propone la formación de un segundo y tercer PRMs, con una extensión de 67,442 y 88,633 m², respectivamente. Se clasifican como deslizamiento rotacional múltiple. Se identifican dos coronas, una más grande que la otra. La actividad de estos cuerpos se ve reflejada en el basculamiento de la parte central del segundo bloque, y en las fracturas que presenta todo el cuerpo. La corona del segundo presenta algunas fracturas, en cambio la corona del PRMs 3, comienza a formarse y presenta la mayor acumulación de fracturas (Figura 30); dicho movimiento también se ve reflejado en el constante agrietamiento que presenta la carretera (Figura 31). Este deslizamiento presenta una componente rotacional en la parte superior, que, al encontrarse con el depósito del deslizamiento antiguo, cambia a una componente traslacional, generando el basculamiento del bloque del centro. A su vez este segundo bloque del deslizamiento desarrolla un deslizamiento de menor tamaño (12,421 m²), en este se identifica una superficie cóncava, generando rotación en la corona y el cuerpo.
- 3) Además, se propone un cuarto PRMs, que se forma cerca del flanco derecho del cuerpo. Este cuerpo se clasifica como deslizamiento rotacional, ya que presenta una superficie convoca en la corona y una rotación en el cuerpo, tiene un área aproximada de 25,120 m² (Figura 32). De acuerdo con las personas que trabajan en huertas, la zona en la que se propone la corona de este cuerpo presenta facturas que han ido aumentando su tamaño con el tiempo.
- 4) Por último, se sugiere la formación de un quinto PRM, de tipo flujo, generado por el uso de suelo (cultivo de chayote). La técnica no permitió delimitar completamente este cuerpo, sin embargo, en el perfil topográfico de la Figura 37, se infiere una estructura alargada y poco profunda, relacionada con un flujo.



Figura 31. a) b) Fracturas sobre la carretera Morelia-Toluca. c) Porción de asfalto de color más oscuro, indicando un ejemplo de los arreglos constantes de la carretera. d), e) y f) Fracturas en el canal inferior.

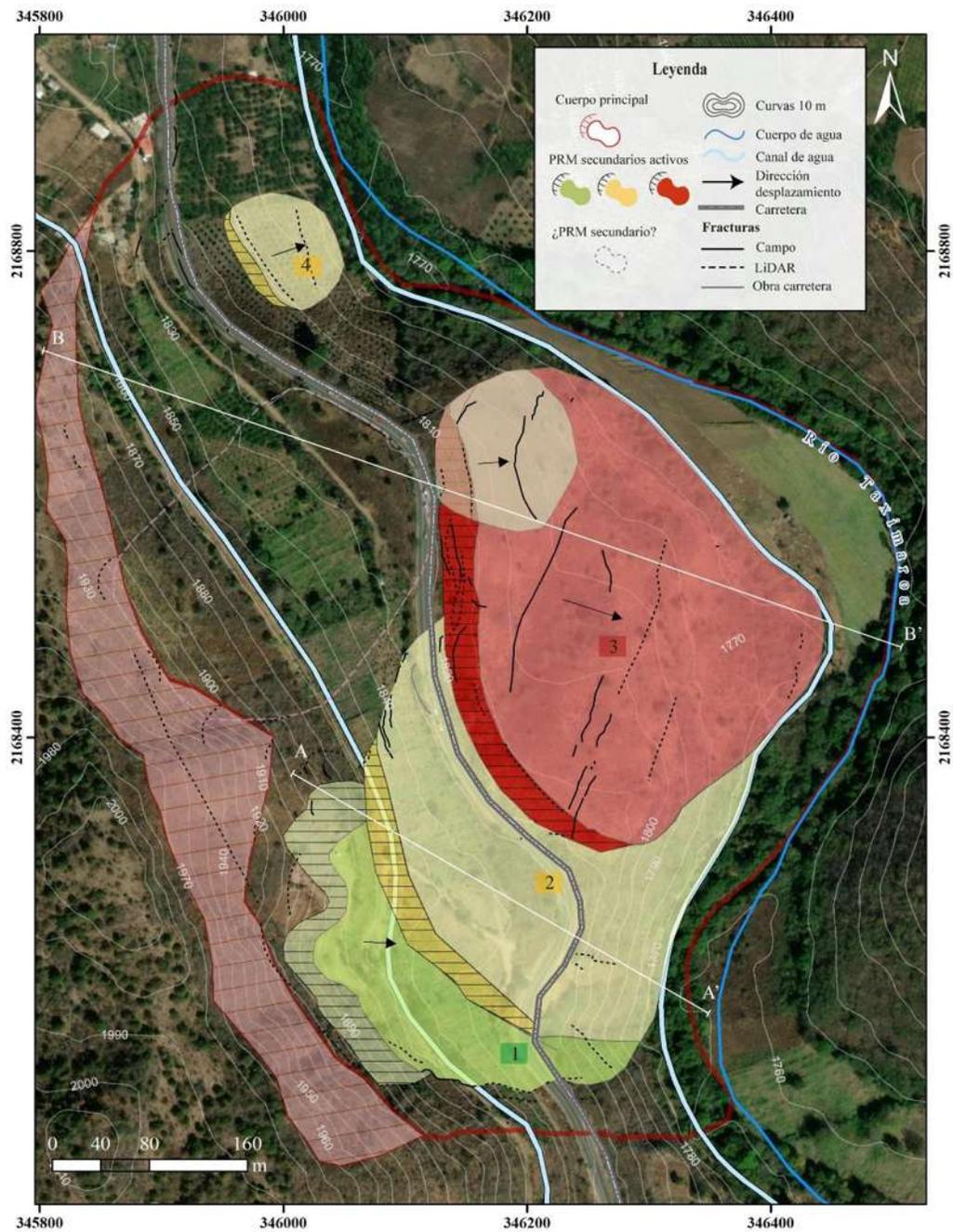


Figura 32. Mapa inventario del cuerpo inestable de Turundeo, en el cual se delimitan los PRMs que se desarrollan dentro de este. El PRM1 corresponde al verde, PRM2 color amarillo, PRM3 color rojo y PRM4 el amarillo de menor dimensión.

6.2.2 Cinemática

La cinemática de este cuerpo está condicionada por el desplazamiento que presentan tres PRMs que se desplazan en diferentes direcciones y a diferentes velocidades, de acuerdo con el tiempo total monitoreado de un año, dos meses.

El primero monitoreo se realizó en noviembre de 2020, y el segundo en mayo 2021. Por lo que el primer análisis de datos se realizó con las nubes de puntos de estos monitoreos, con una diferencia de 6 meses. En el cual se obtuvo que gran parte del cuerpo no presenta actividad. Sin embargo, algunas zonas presentan desplazamientos absolutos que van de 0.25 a 0.9 m; en X y Y de -0.15 a 3 m; y en Z de -0.5 a 0.6 m (Figura 34). Estos desplazamientos se concentran en la parte central del cuerpo, así como en el banco de material, zonas cercanas al canal de agua inferior y en fracturas de los diferentes PRMs. El primer, segundo y cuarto PRMs presentan poco desplazamiento, mientras que el tercero es el cuerpo más activo.

El tercer monitoreo se realizó en enero 2022, con una diferencia de 8 meses, respecto al segundo monitoreo y el análisis de datos se realizó respecto al primer monitoreo. Este análisis nos permitió obtener que el movimiento disminuyó respecto a los datos arrojados en el primer análisis. Obteniendo un desplazamiento absoluto de 1.2 m; en X e Y de -0.5 a 0.5 m; y en Z de -0.9 a 0.9 m (Figura 35).

Posteriormente se analizó nuevamente el primer monitoreo contra el tercero, para obtener datos con mayor fiabilidad. Se analizaron las velocidades de desplazamiento presentadas por los PRMs y se compararon entre sí, así como con respecto al monitoreo realizado en 2014 por Medina (Tabla 9). Esto permitió corroborar que en el segundo monitoreo disminuyó la velocidad de desplazamiento en el primer, segundo y cuarto PRMs; caso contrario para el tercer PRMs, el cual aumentó su velocidad de desplazamiento en un 40%.

Se analizaron los datos de tal forma que se pudieran comparar entre sí de una forma más clara, por lo que se obtuvo la velocidad de desplazamiento anual, con los valores de cada monitoreo y se compararon contra los de Medina (2014) (Tabla 10). La diferencia entre ambos trabajos es que Medina obtuvo una velocidad promedio; mientras que en este trabajo el desplazamiento no se toma como homogéneo, debido a que cada PRMs presenta características diferentes como: área, velocidades y direcciones de desplazamiento, poniendo en mayor o menor riesgo a la población de la zona.

Por último, se graficaron las velocidades de desplazamiento conforme a los datos ajustados. En la

Figura 33, se observan los valores mínimos y máximos de velocidad de desplazamiento de cada PRMs, y el aumento y disminución de estos. De acuerdo con Dikau *et al.*, (1996) (Anexo 2), las velocidades obtenidas corresponden a una clase 2 y 3 de desplazamiento que va de lento a muy lento; estas clases, generan reparación de obras frecuentemente debido a los desplazamientos más continuos.

Tabla 9. Velocidad de desplazamiento obtenidas por Medina (2014), comparadas con rangos de desplazamientos totales obtenidos en los monitoreos de este trabajo. Se utilizaron los PRMs como parámetro principal, debido a que corresponden a las zonas con mayores desplazamientos.

PRMs	Velocidad 1 (Medina, 2014)	Velocidad 2 (ABS) Nov 2020 -may 2021	Velocidad 3 (ABS) May 2021- feb 2022
1	3.5 cm / año	0.7 – 0.2 m	0.08 – 0.2 m
2		0.15 – 0.35 m	0.09 – 0.5 m
3		0 – 0.1 m	0 – 0.1 m

Tabla 10. Velocidades anuales obtenidas a partir de los monitoreos realizados en este trabajo, así como en el monitoreo de Medina (2014).

PRMs	Velocidad 1 (Medina, 2014)	Velocidad 2 (ABS) Nov 2020 -may 2021	Velocidad 3 (ABS) May 2021- feb 2022
1	0.035 m / año	0.12 – 0.4 m	0.12 – 0.3 m
2		0.24 – 0.28 m	0.12 – 0.7 m
3		0 – 0.12 m	0 – 0.12 m

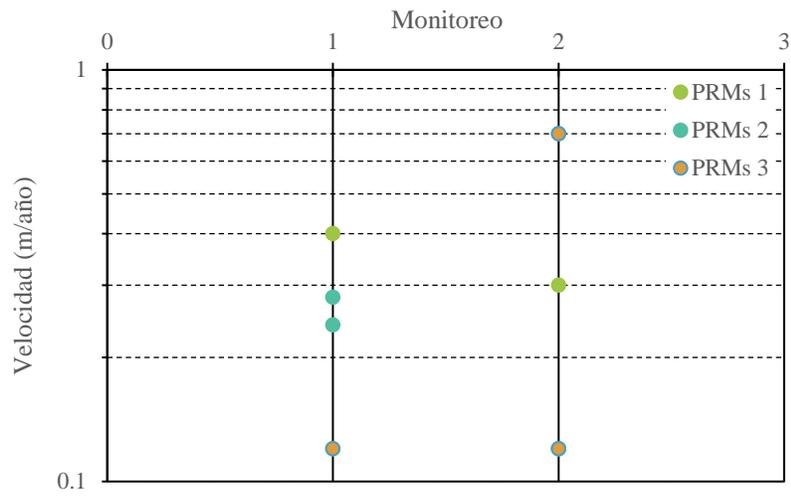


Figura 33. Velocidades de desplazamiento mínimos y máximos de los tres PRMs del cuerpo de Turundeo, con las velocidades obtenidas en los dos monitoreos.

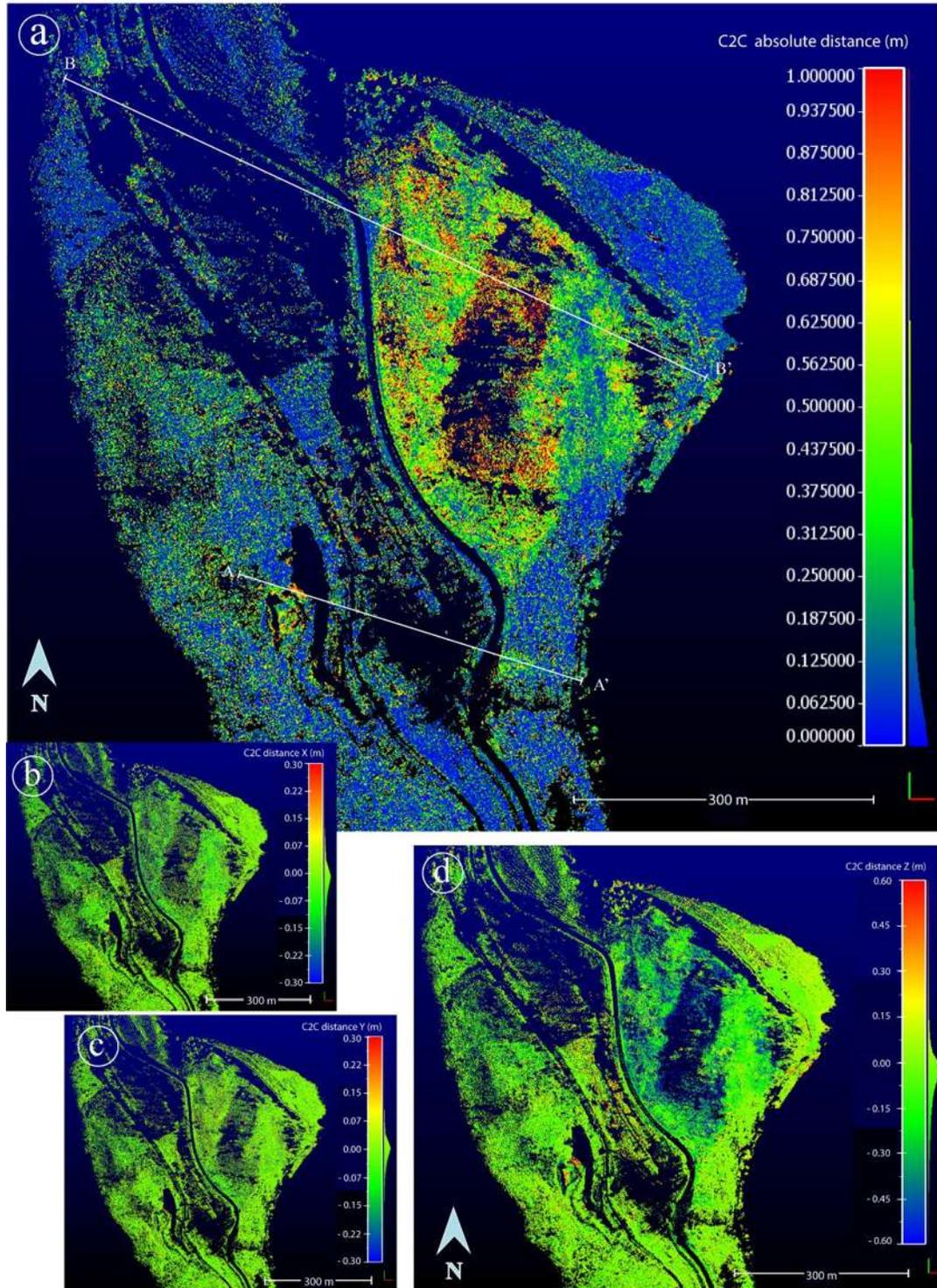


Figura 34. Análisis de distancias de Turundeo, mediante el método C2C, entre las nubes de 2020 y 2021. En los incisos b, c, y d, los colores verdes indican zonas estables, los colores rojos zonas mayor desplazamiento. a) Distancia absoluta, los colores azules indican zonas estables, y los colores rojos zonas con mayor desplazamiento. b) Distancia en X. c) Distancia en Y. d) Distancia en Z.

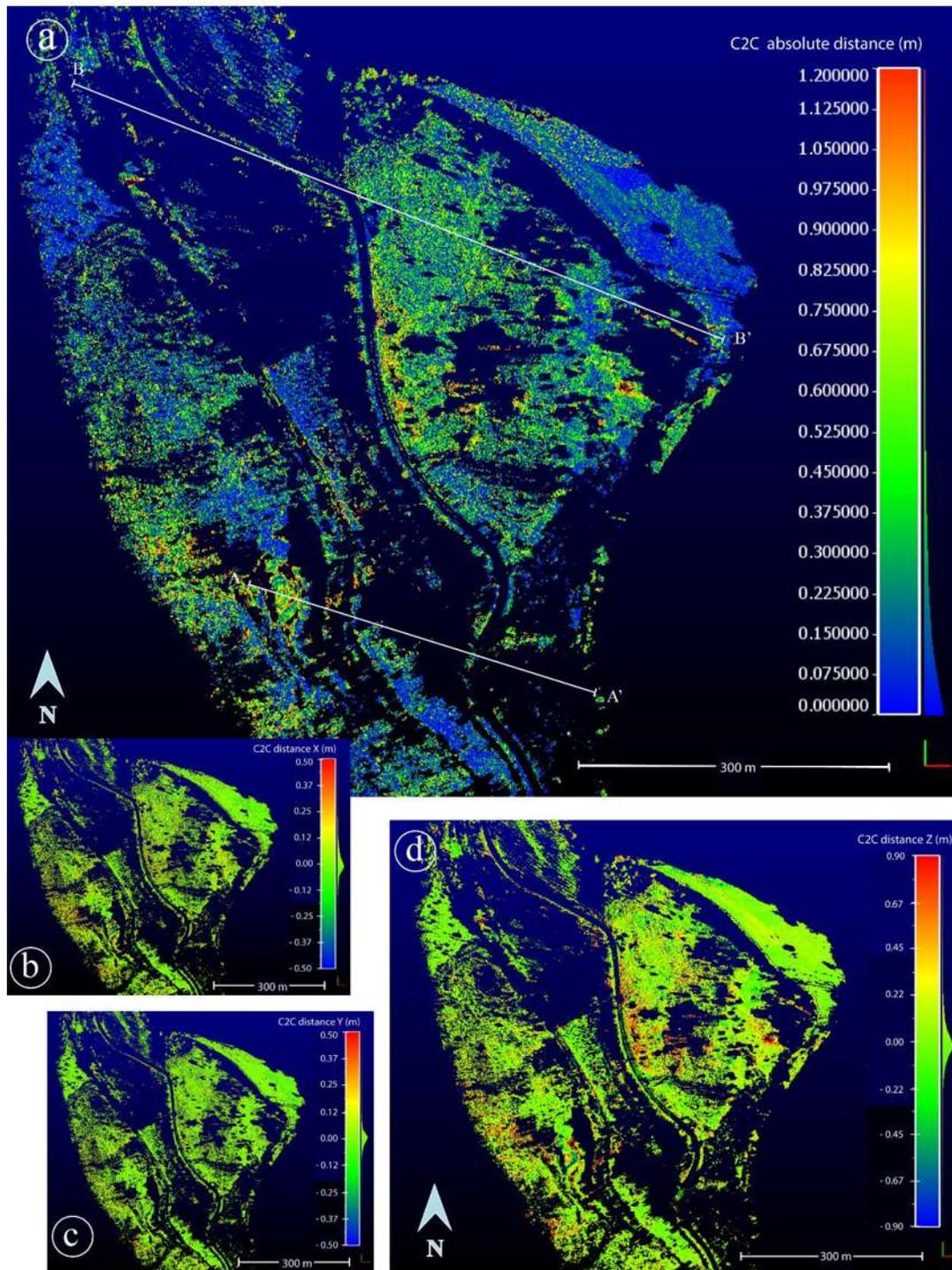


Figura 35. Análisis de distancias de Turundeo, mediante el método C2C, entre las nubes de 2021 y 2022. En los incisos b, c, y d, los colores verdes indican zonas estables, los colores rojos zonas mayor desplazamiento. a) Distancia absoluta, los colores verdes son zonas estables y las rojas zonas con mayor desplazamiento. b) Distancia en X. c) Distancia en Y. d) Distancia en Z.

Lo anterior, nos permitió realizar un análisis más detallado, tomando en cuenta la topografía a partir de las nubes de puntos en los tres monitoreos. Se realizaron dos perfiles, en los sitios con mayor desplazamiento. El perfil A-A' corresponde al primer PMRs, en el cual se proponen dos superficies de desplazamiento de este cuerpo (Figura 36):

- 1) La primera corresponde a un deslizamiento traslacional, el cual comienza en la corona del banco de material y termina en el canal de agua inferior. El escarpe principal de este cuerpo se distingue claramente en el modelo 3D, MDE y en este perfil.
- 2) El segundo corresponde a un deslizamiento superficial, comienza en el canal de agua superior y termina a 40 m de la carretera. Este cuerpo se asocia al desplazamiento que presenta el talud de la carretera, varía hasta 0.6 m entre el primero y último monitoreo. Asimismo, se relaciona con el desplazamiento que presenta una fractura que se encuentra entre la carretera y el canal inferior.

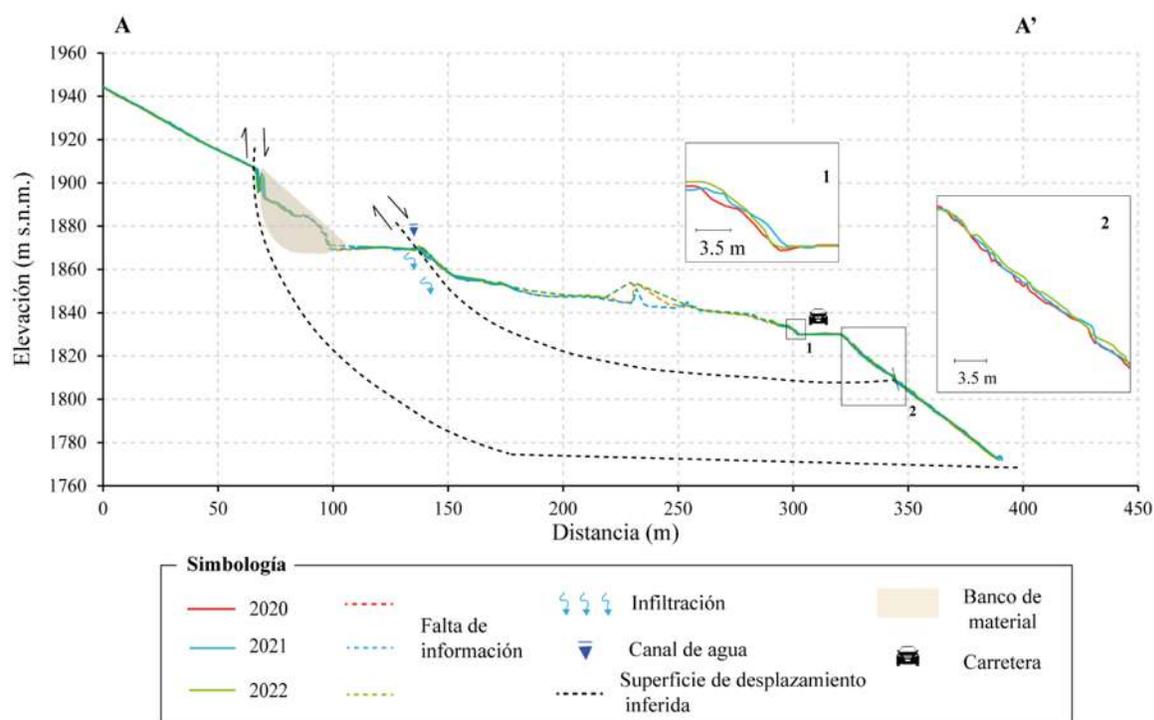


Figura 36. Perfil topográfico A-A' de Turundeo, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

El perfil B-B' está delimitado desde el escarpe principal del flujo de rocas, hasta la parte más baja de este mismo. Dentro de este perfil, se puede observar el desarrollo de varios PRMs y en la [Figura 37](#), se puede observar diferentes superficies de desplazamiento inferidas:

- 1) La primera corresponde al cuerpo principal, abarca desde escarpe principal hasta el río Taximaroa.
- 2) Posteriormente, se observa una superficie de falla con menor profundidad (aparentemente), este cuerpo no se distingue con claridad en los mapas de distancia, sin embargo, en los perfiles topográficos se pudo observar de mejor forma y así comparar con los perfiles de los otros monitoreos. Esto permitió observar un deslizamiento traslacional superficial, denotado por el tipo de riego usado en los cultivos de chayote, que a su vez ha generado constante infiltración del agua utilizada durante esta actividad. Una parte de esta agua escurre superficialmente, y otra se infiltra.
- 3) Por último, desde la carretera hasta el canal de agua se infiere una secuencia de superficies de deslizamientos, que se atribuyen al PRMs 3, clasificándose como un deslizamiento rotacional múltiple. Además, presenta desplazamientos de -1 m en la vertical (hundimiento) entre el primer y tercer monitoreo en el carril derecho de la carretera. Así como 0.6 m en horizontal.

En la parte central de este cuerpo se está desarrollando el mayor desplazamiento: - 0.7 m en la vertical (hundimiento) y 1.2 m horizontal ([Figura 37 zoom 2](#)); y - 0.8 vertical (hundimiento) y 0.6 m horizontal ([Figura 37 zoom 3](#)).

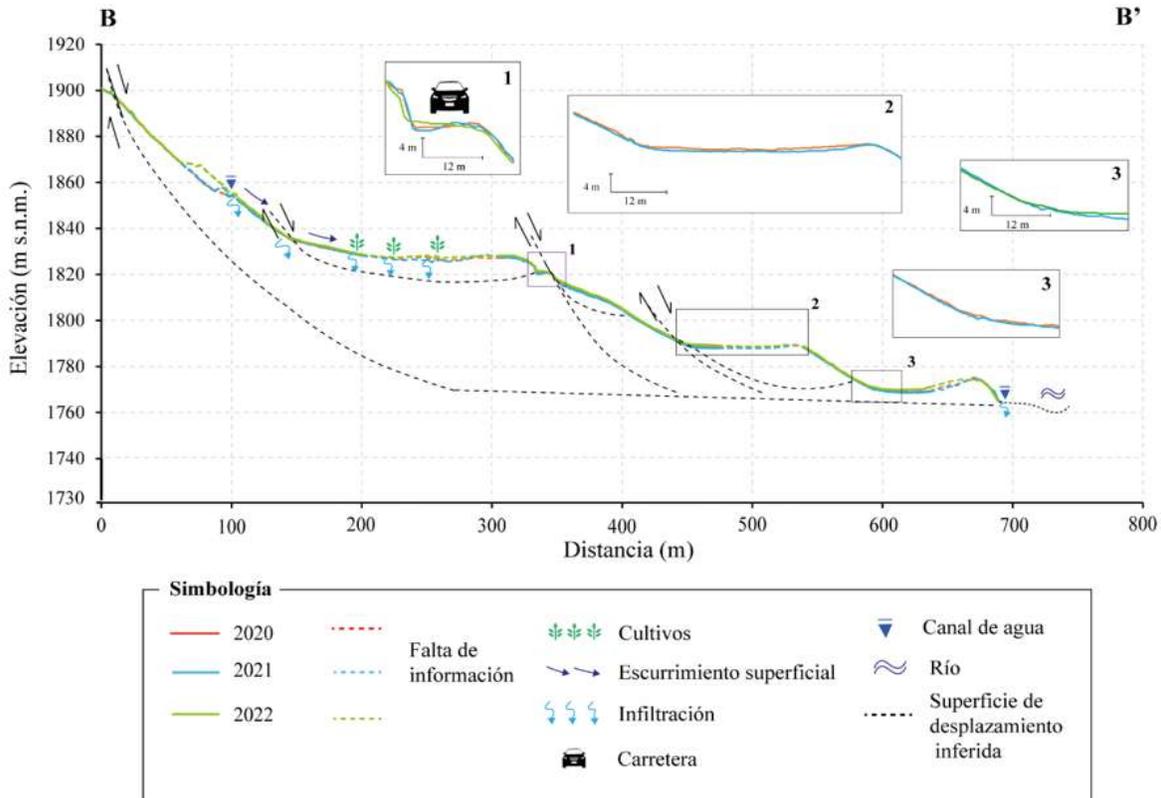


Figura 37. Perfil topográfico B-B' de Turundeo, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

6.2.3 Discusión

Las nubes de puntos obtenidas mediante el ELT, permitieron delimitar características del terreno, como fracturas, escarpes, cuerpos secundarios, zonas de hundimiento y abultamiento con mayor detalle en comparación con la información que estaba disponible, como los MDE a 5 m de INEGI. También permitió actualizar la información cartográfica y evolución del cuerpo inestable, ya presentada anteriormente por Triada (2000) y Medina (2014).

El uso de ELT contra otras técnicas de monitoreo, presenta ventajas en cuando a la precisión y distribución de datos. Al compararlo con el GPS, a pesar de ser un sistema eficaz en el seguimiento en el movimiento de masas (Althuwaynee y Pradhan, 2018), este suele arrojar información de pocos puntos en comparación del ELT, que obtiene información de millones de puntos. Esto nos permitió actualizar la información reportada por Medina (2014), en donde se obtuvo una tasa de

desplazamiento 3.5 cm/año en 2013 y para 2019 – 2020, el desplazamiento aumento de 0.08 y 0.35 m/año.

Los datos obtenidos a partir de la comparación de nubes de puntos nos indican que el cuerpo no se desplaza de manera homogénea, siendo los PRM secundarios los que presentan mayor desplazamiento, así como los flancos de estos cuerpos y fracturas que se han generado a partir de su movimiento (Figura 39 y Figura 40).

El PRMs con mayor desplazamiento se encuentra en la parte central. Su movimiento genera fracturamiento constante en la carretera, la cual es arreglada con la misma frecuencia (Figura 31). Es importante que se tome en cuenta el origen de este fracturamiento para la toma de decisiones al momento de arreglarla, así como conocimiento del fenómeno en general.

De los tres monitoreos, el segundo monitoreo correspondiente al intervalo de noviembre 2020 a mayo 2021, presentó mayor desplazamiento, con menor precipitación media mensual (min. 0, máx. 26 mm) en comparación con el 2022 (precipitación min. 1.1 y máx. 245 mm) (Figura 6), por lo que el desplazamiento no se correlaciona con este factor, si no con el tipo de riego que se usa para los cultivos de la parte alta del cuerpo inestable. Este tipo de riego es de tipo agua rodada, en el cual abren el canal de riego de tal forma que el agua cae por gravedad en grandes cantidades. Esta agua escurre hasta una porción de los cultivos, por lo que se infiere que gran parte se infiltra hasta otras fracturas más profundas, favoreciendo el desplazamiento de este cuerpo.

Otro factor importante en este desplazamiento, lo tiene las relaciones geológicas, ya que de acuerdo a lo descrito en el capítulo 4 (Figura 38). Se encontró un depósito de deslizamiento, que podría estar funcionando como superficie de desplazamiento en la parte baja y asimismo favoreciendo al desplazamiento del cuerpo en superficie. Este depósito se distribuye la parte baja del cuerpo inestable, entre la cuota 1760 y 1770, y tiene mejor exposición cerca de los flancos.

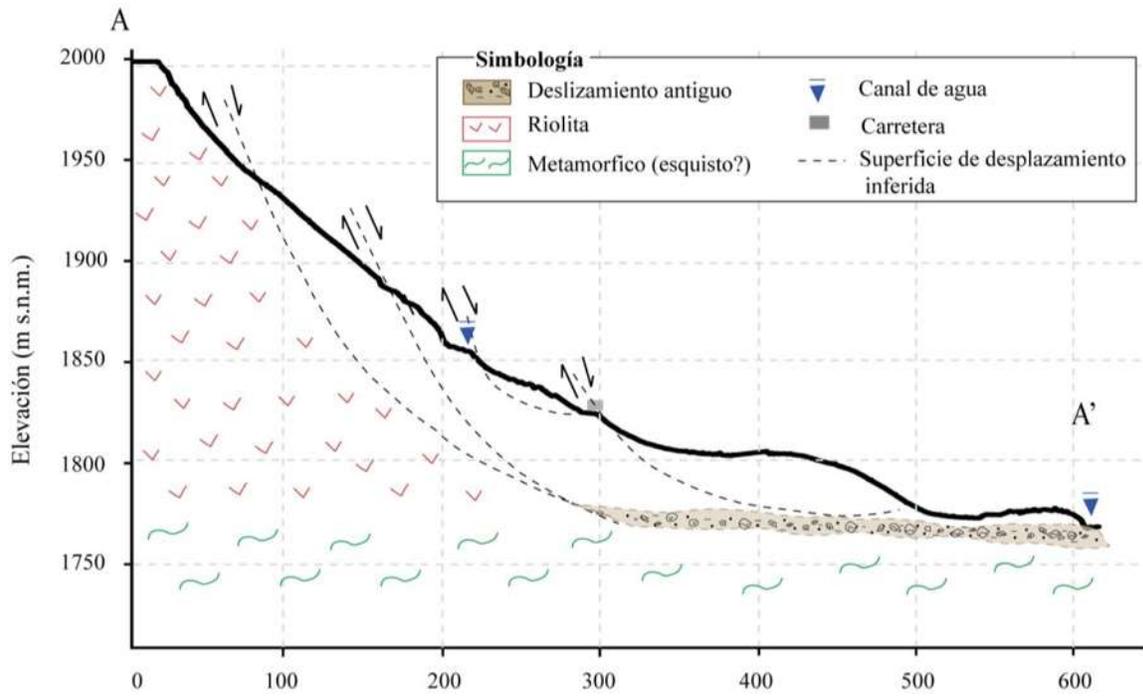


Figura 38. Perfil topográfico desde base a cima del cuerpo de Turundeo, en el cual se aprecia la geología del sitio.

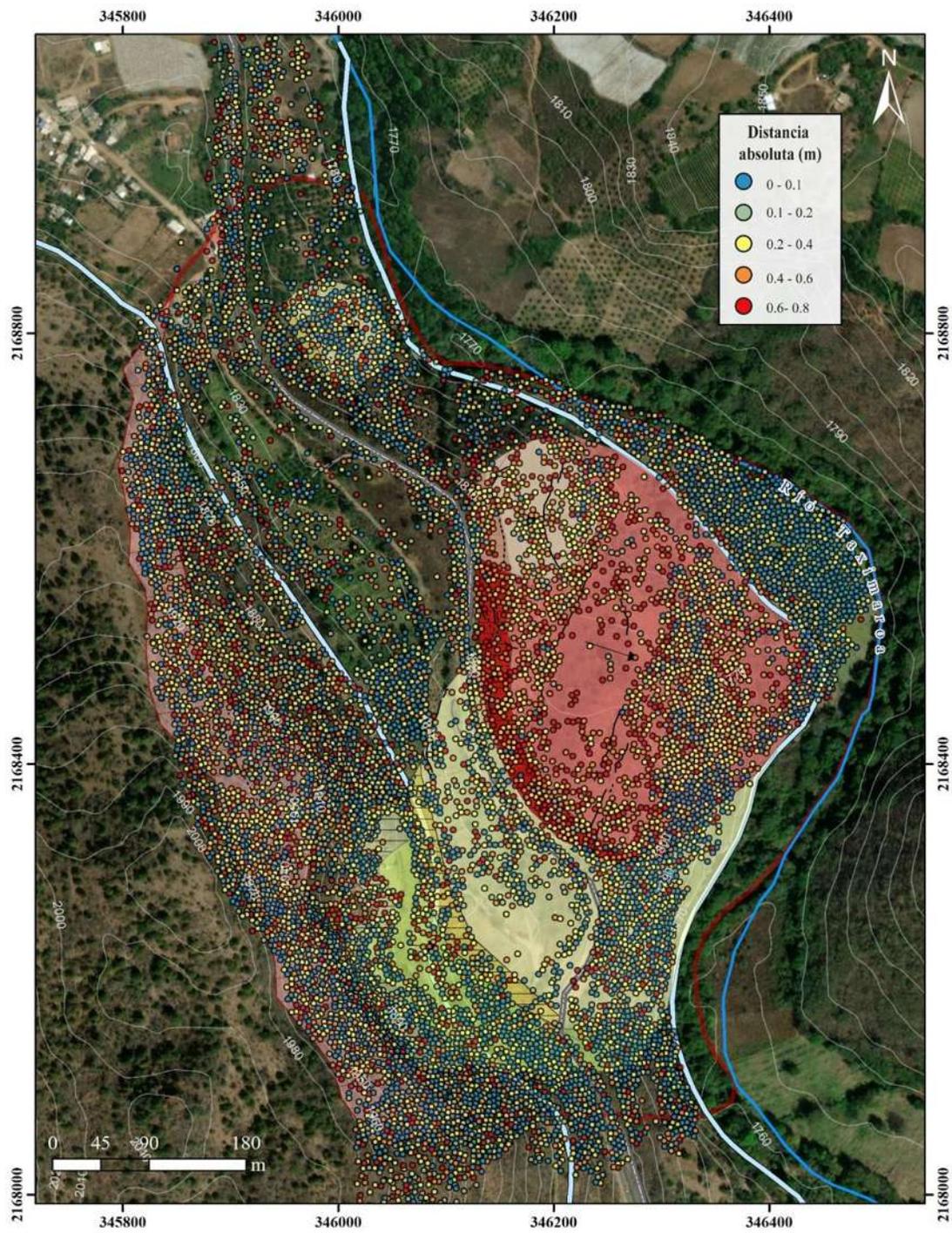


Figura 39. Comparación de desplazamiento 2020 -2021 vs mapa inventario de Turundeo. Se realizó tomando solo una parte de puntos de la nube original.

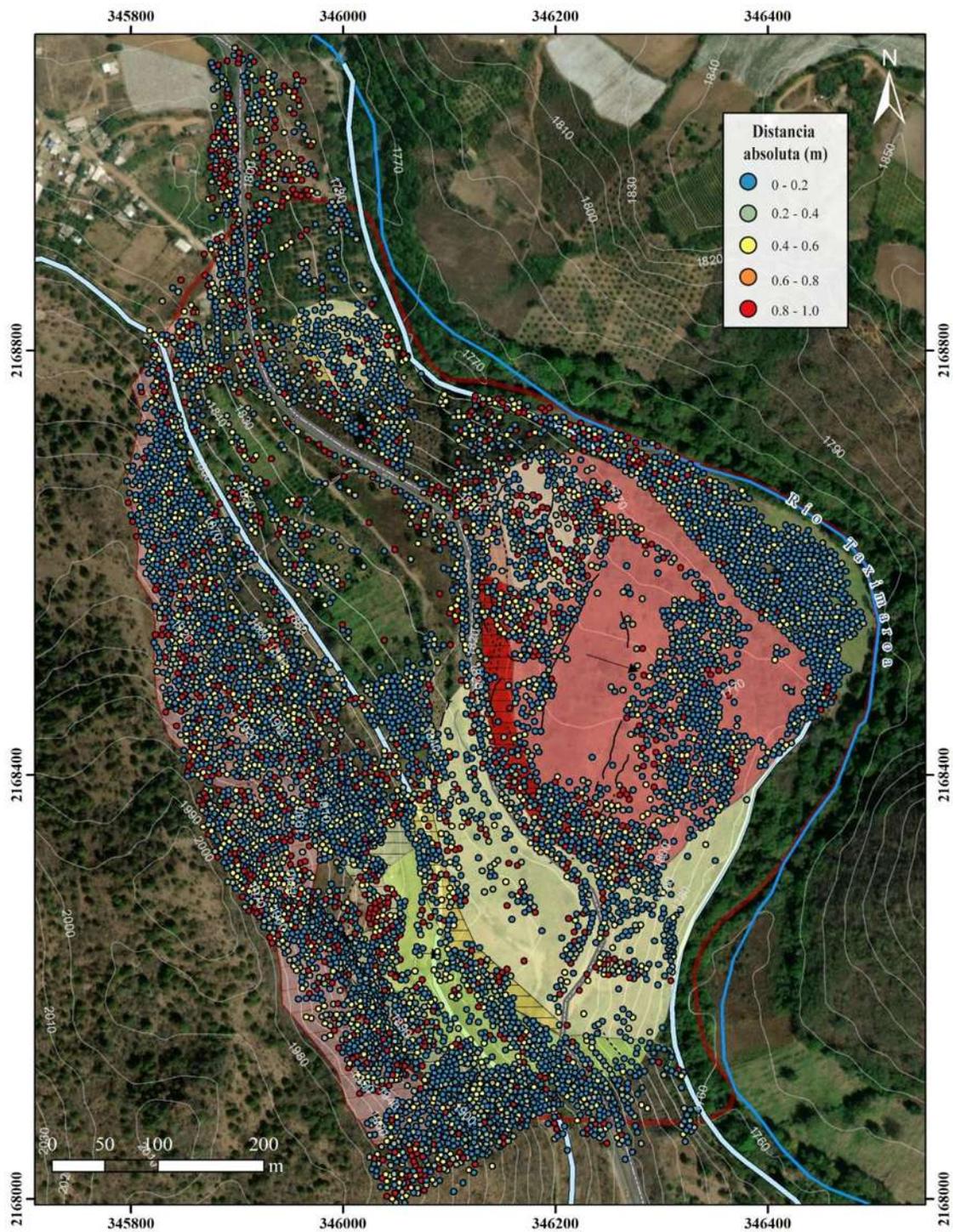


Figura 40. Comparación de desplazamiento 2020 -2022 vs mapa inventario de Turundeo. Se realizó tomando solo una parte de puntos de la nube original.

6.3 Deslizamiento rocoso Jungapeo

El flujo de rocas Jungapeo se encuentra al SE de la localidad del mismo nombre, en la ladera NW del C. El Tamarindo o flanco poniente de la Mesa La Virgen. En la parte baja de esta ladera inestable se encuentran instalaciones de la Unidad Deportiva de la localidad, y su frente de avance o pé coincide con arroyo sin nombre y Río Tuxpan (Figura 41).



Figura 41. Vista del cuerpo inestable de Jungapeo.

6.3.1 Morfología y morfometría

El cuerpo inestable de Jungapeo presenta un ancho de 521 m, longitud de 355 m, con un desnivel topográfico de 150 m de base a cima, se infiere el desarrollo de una superficie de desplazamiento a una profundidad de 50 m, y comprende un área total de 187, 571 m². Así como pendientes que van de 5 a 8° en las áreas con menor pendiente que usualmente son zonas medias de PRM secundarios, y pendientes máximas de 43 a 86° en los escarpes de los mismos y en las zonas más cercanas al río.

Este cuerpo se clasifica como deslizamiento rocoso o *rock slide* (Dikau et al., 1996), se infiere que la superficie de desplazamiento es de tipo traslacional, controlado por el bajo ángulo de buzamiento que presentan los estratos litológicos (Figura 42). Estos, están siendo afectados por la deformación del cuerpo inestable, además, están enriquecidos en material arcilloso, lo que ha favorecido a la

formación de fracturas, y que el cuerpo se disgregue en diferentes unidades, las cuales se desplazan en diferentes direcciones a través de todo el deslizamiento principal.

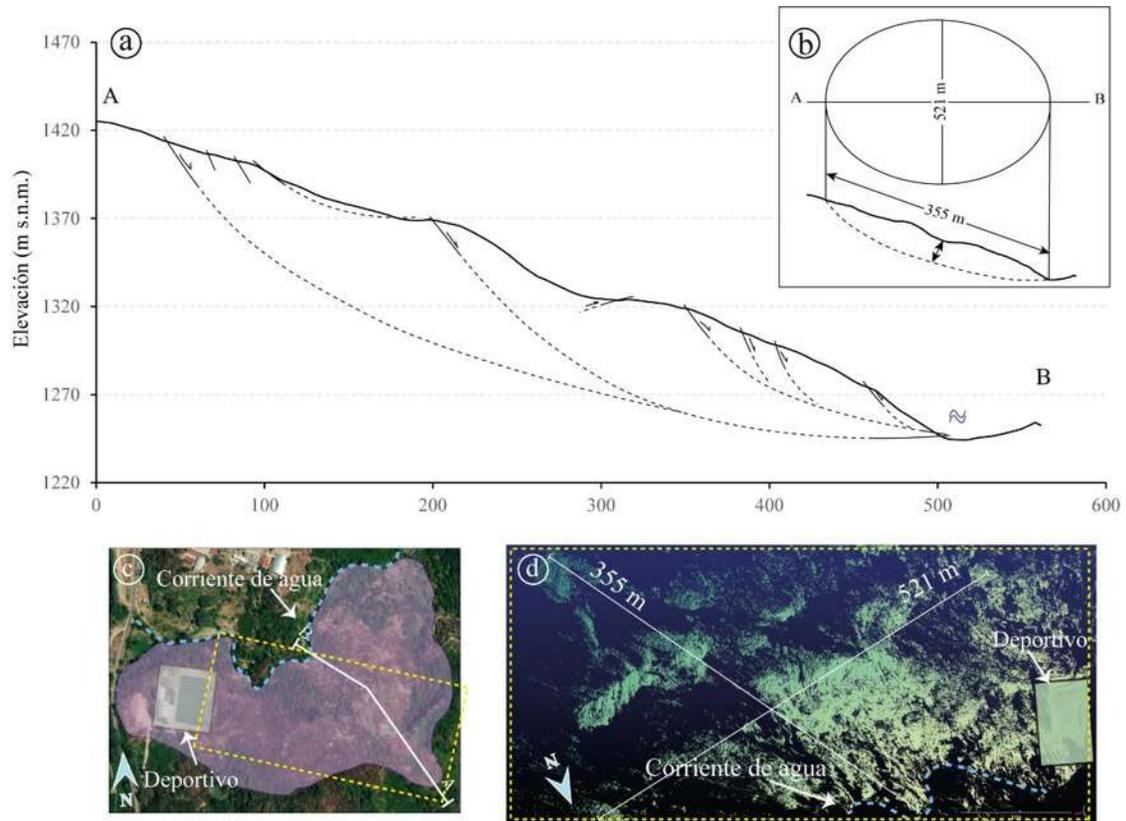


Figura 42. Deslizamiento rocoso de Jungapeo. a) Perfil topográfico, muestra las características estructurales: fracturas, superficies de deslizamiento inferidas y corriente de agua secundaria en la parte inferior. b) Dimensiones aproximadas del cuerpo inestable, tomando de referencia el trabajo de WP/WL14 (1993) (Anexo 1). c) Ubicación del perfil topográfico obtenido A-B. d) Dimensiones de la deformación, obtenida a través de CloudCompare.

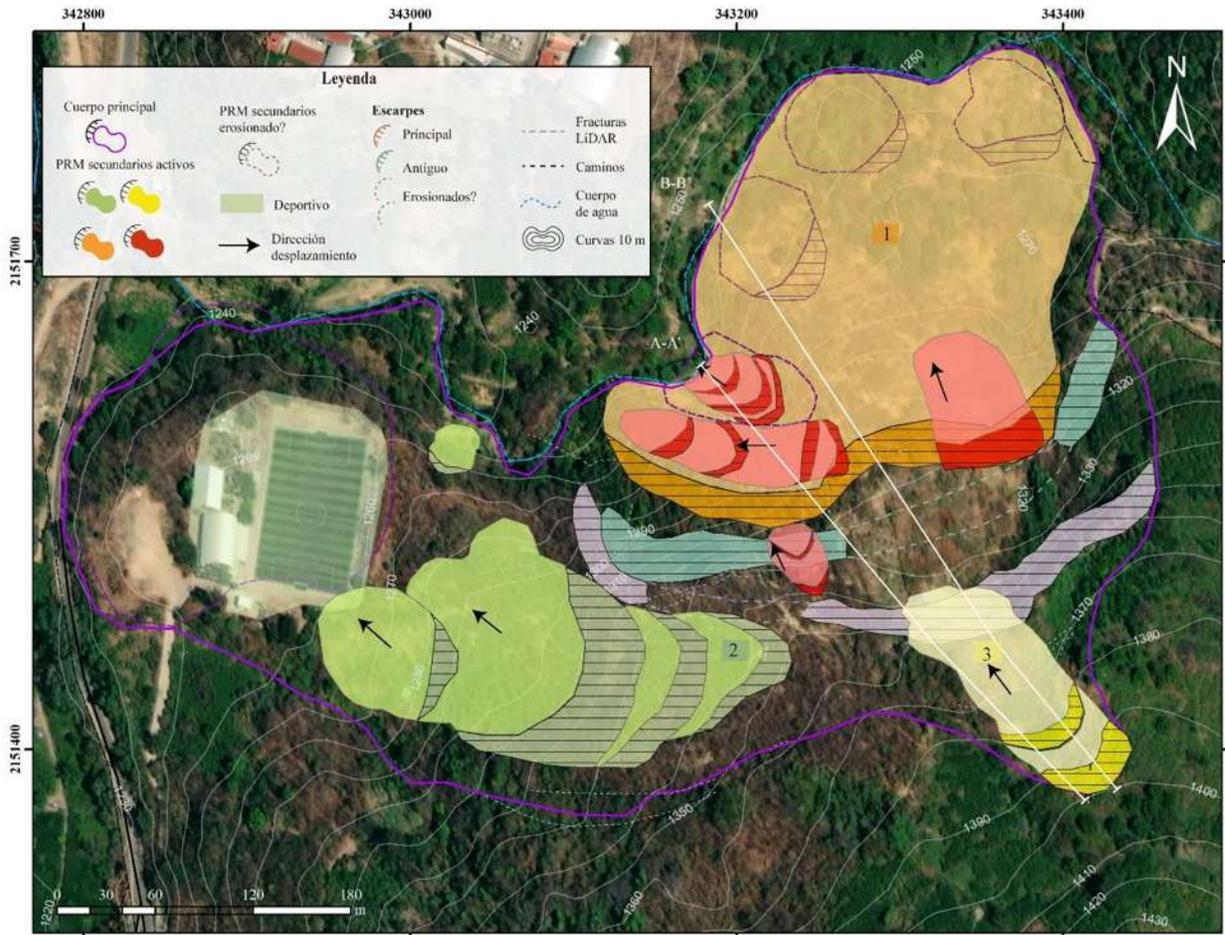


Figura 43. Mapa inventario del cuerpo inestable de Jungapeo, en el cual se delimitan los PRMs que se desarrollan dentro de este, así como vectores de desplazamiento. El PRM 1 corresponde al cuerpo de color naranja, el PRM 2 color verde, PRM 3 color amarillo; mientras que, lo de color rojo pertenecen a cuerpos generados dentro del PRM 1.

Al interior del cuerpo principal se desarrollan al menos tres grandes PRMs y diferentes escarpes. A continuación, se describen de acuerdo a la temporalidad que se le da a cada uno:

- 1) Se propone un escarpe antiguo y erosionado (Figura 43) con una dirección SW-NE, con una longitud aproximada de 380 m.
- 2) Posteriormente se propone la formación de un segundo escarpe, considerándolo como principal, con una dirección preferencial similar al escarpe anterior (SW-NE), con una longitud aproximada de 520 m (Figura 43).
- 3) Como consecuencia del escarpe anterior, se propone la formación del primer cuerpo, desarrolla un escarpe principal dirección SW-NE, tiene un área de 51,534 m², es uno de los

cuerpos principales que conforman el deslizamiento, se clasifica de tipo traslacional, controlado principalmente por la intercalación de lutitas, areniscas y calizas. Al pie de este, se identificaron tres PRMs erosionados y cubiertos por vegetación. Cerca del flanco Oeste se identificó la mayor actividad de este cuerpo, con la formación de dos PRMs, clasificados como deslizamiento múltiple, con un vector de desplazamiento hacia el NW. Por otro lado, cerca del flanco Este se identificó solo un PRMs, esto no significa que solo exista ese, sino que la técnica solo permitió identificar dicho cuerpo; el cual presenta una dirección preferencial hacia el N y se clasifica como traslacional.

- 4) El segundo cuerpo, se ubica en la parte superior SW del cuerpo principal, con una dirección preferencial hacia NE, desarrollando un deslizamiento múltiple, conformado por al menos cuatro eventos, abarcando un área de 24,096 m². De tal forma que el último de estos, afecta una de las esquinas de la cancha de fútbol del deportivo.
- 5) El tercer cuerpo, se desarrolla un PRMs en la parte superior del cuerpo, clasificado como flujo de detritos, compuesto de materiales finos (p.ej., arena y arcilla) y gruesos (p. ej., grava y cantos rodados), tiene una profundidad aproximada de 3 m, con un área de 8431 m². El deslizamiento presenta movimiento en dirección NW, y se sobrepone al escarpe principal. Se infiere que fue detonado y saturado por las lluvias, debido a que su escarpe principal se desarrolla en zona de recarga en temporada de lluvias.
- 6) Por último, se propone la existencia de un PRMs en el área en donde se encuentra el deportivo, y podría tener una componente rotacional, generando la elevación del bloque sobre el que se encuentra el deportivo.

6.3.2 Cinemática

La cinemática de este cuerpo está condicionada por el desplazamiento que presentan al menos tres PRMs que se desplazan en diferentes direcciones y a diferentes velocidades, de acuerdo con el tiempo total monitoreado de 4 años y 11 meses (diciembre 2015 a noviembre 2020) (Figura 45).

El primer monitoreo tomado para este cuerpo fue en 2015 y el segundo en 2016 (Figura 45), con una diferencia de seis meses entre estos. En este primer análisis se identificó que las zonas más estables son los escarpes (antiguo y principal) y el mayor desplazamiento en la parte media y baja del flujo de rocas presentando un desplazamiento absoluto de 0.2 a 1.5 m; en Z de -0.7 a 1 m; en Y de 0.1 a 1 m; y en X de 0.2 a 1 m.

El tercer monitoreo se realizó en 2020, con una diferencia de 4 años y 5 meses, respecto al segundo (Figura 46). Este monitoreo nos permitió identificar nuevamente, que las zonas más estables corresponden a los escarpes ya mencionados anteriormente, y las zonas con mayor actividad al primer PRMs descrito en el subcapítulo 6.3.1. En este análisis se obtuvo que el desplazamiento absoluto va de 0.1 a 2 m; en Z de 0.6 a 2 m; en Y de -0.9 a 1.5; y en X de 0.3 a 1.5 m.

Posteriormente se analizó el primer monitoreo contra el segundo y el segundo contra el tercero, para obtener datos con mayor fiabilidad. Se analizaron las velocidades de desplazamiento presentadas por los PRMs y se compararon entre sí, y respecto al monitoreo realizado de 2015 a 2017 por Villaseñor-Reyes, (2019) (Tabla 11). Lo que permitió corroborar que en los monitoreos realizados en 2015 y 2016, el deslizamiento presentó mayor actividad, que en los últimos tres años. Se obtuvo la velocidad de desplazamiento anual, con los valores de cada monitoreo y se compararon contra los de Villaseñor-Reyes (2019) (

Tabla 12).

Los valores mencionados anteriormente, entran dentro de los obtenidos en este trabajo, la diferencia es que para el trabajo de Villaseñor-Reyes, (2019) se obtuvo una velocidad promedio en la horizontal y la vertical; mientras que, en este trabajo, el desplazamiento se puede apreciar las componentes X, Y, Z y absoluta. Pero para fines prácticos, en las tablas se utilizaron velocidades de desplazamiento absoluto, permitiéndonos delimitar rangos de desplazamiento de cada PRMs. Ya que estos al igual que en el caso de Turundeo, no se desplazan a velocidades homogéneas y todos abarcan áreas muy grandes. Por lo que dichas velocidades nos indican mayor o menor actividad, que debe ser tomada en cuenta por las personas que transitan la zona en caso de que estas aumentaran su actividad.

Por último, se graficaron las velocidades de desplazamiento conforme a los datos ajustados. En la Figura 44, se observan los valores mínimos y máximos de velocidad de desplazamiento de cada PRMs, y el aumento y disminución de estos en los monitoreos de este trabajo. De acuerdo a Dikau *et al.*, (1996) (Anexo 2), las velocidades obtenidas corresponden a una clase 2 y 3 de desplazamiento que va de lento a muy lento; predominando la clase 3 en los PRMs uno y dos.

Tabla 11. Velocidad de desplazamiento obtenidas anteriormente por Villaseñor-Reyes (2019), comparadas con rangos de desplazamientos absolutos obtenidos en los monitoreos de este trabajo. Se utilizaron los PRMs como parámetro principal, debido a que corresponden a las zonas con mayores desplazamientos.

PRMs	Velocidad 1 (Villaseñor-Reyes, 2019)	Velocidad 2 (ABS) Dic 2015 – jun 2016	Velocidad 3 (ABS) Jun 2016- nov 2020
1	6 m horizontal 2 m vertical	0.2 – 1.5 m	0.2 – 2 m
2		0.1 – 0.5 m	0.25 – 1.5 m
3		0.2 – 0.3 m	0.1 – 0.9 m

Tabla 12. Velocidades anuales obtenidas a partir de los monitoreos realizados en este trabajo, así como en el monitoreo de Villaseñor-Reyes (2019).

PRMs	Velocidad 1 (Villaseñor-Reyes, 2019)	Velocidad 2 (ABS) Dic 2015 – jun 2016	Velocidad 3 (ABS) Jun 2016- nov 2020
1	3 m/año horizontal 2 m/ año vertical	0.36 – 3 m/año	0.036 – 0.36 m/año
2		0.12 – 0.96 m/año	0.036 – 0.1 m/año
3		0.36 – 0.6 m/año	0.012 – 0.12 m/año

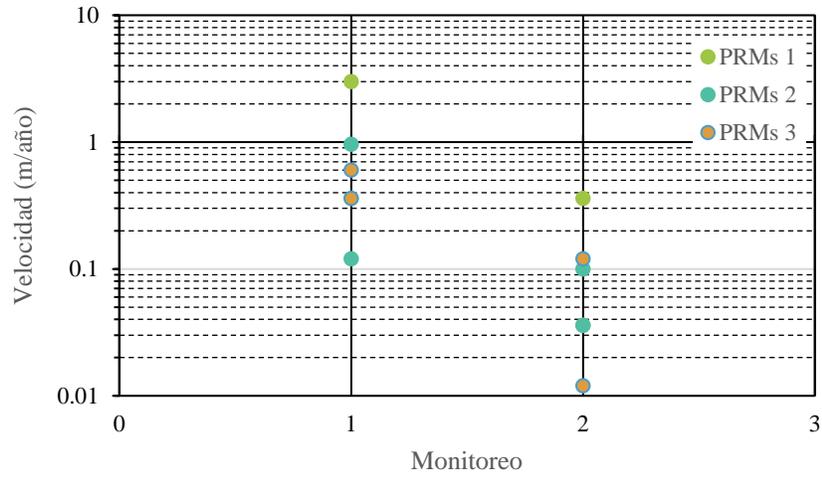


Figura 44. Velocidades de desplazamiento mínimos y máximos de los tres PRMs del cuerpo de Jungapeo, con las velocidades obtenidas en los dos monitoreos.

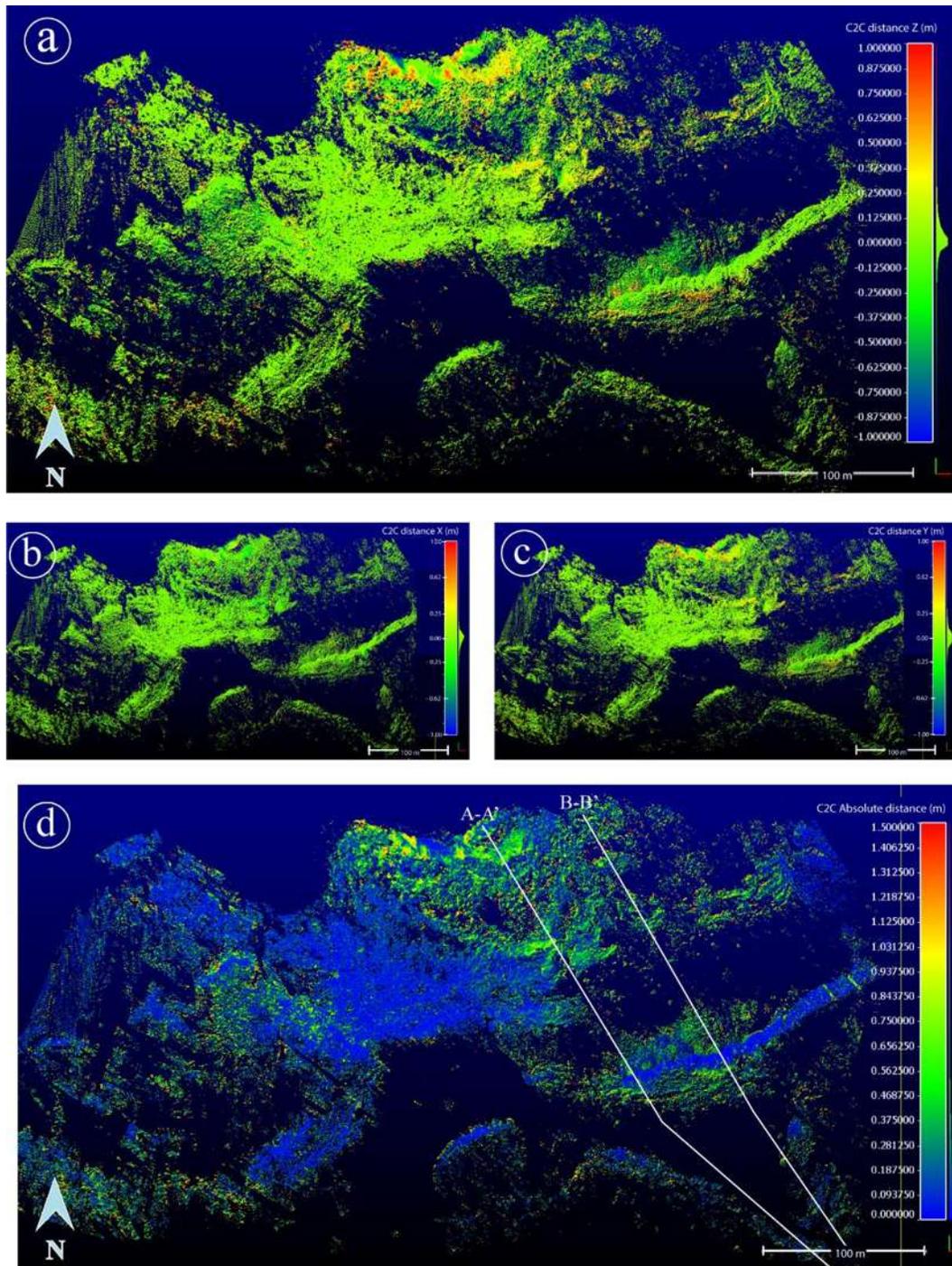


Figura 45. Análisis de distancias de Jungapeo, mediante el método C2C, entre las nubes de 2015 y 2016. En los incisos a, b y c, los colores verdes corresponden a zonas estables y los colores rojos a zonas con mayor desplazamiento. a) Distancia en Z. b) Distancia en X. c) Distancia en Y. d) Distancia absoluta, los colores azules corresponden a zonas estables y los colores rojos a zonas con mayor desplazamiento.

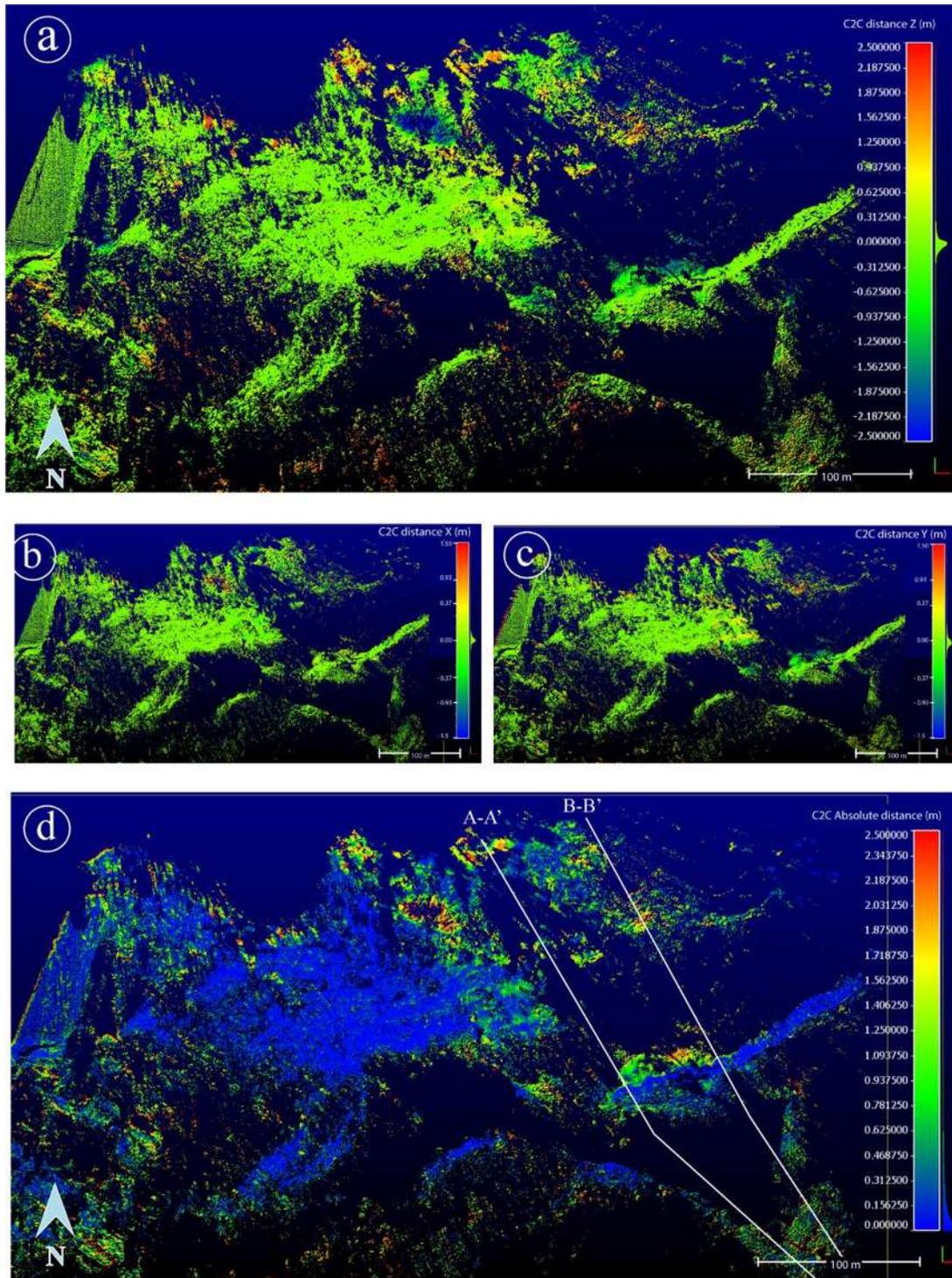


Figura 46. Análisis de distancias de Jungapeo, mediante el método C2C, entre las nubes de 2016 y 2020. En los incisos a, b y c, los colores verdes corresponden a zonas estables y los colores rojos a zonas con mayor desplazamiento. a) Distancia en Z. b) Distancia en X. c) Distancia en Y. d) Distancia en Z, los colores azules corresponden a zonas estables y los colores rojos a zonas con mayor desplazamiento.

Lo anterior, nos permitió realizar un análisis más detallado, tomando en cuenta la topografía a partir de las nubes de puntos en los tres monitoreos. Se realizaron dos perfiles, en los sitios con mayor desplazamiento. El perfil A-A' (Figura 47) corresponde al flanco izquierdo del primer PMRs, en el cual se proponen dos superficies de desplazamiento importantes:

- 1) En la parte superior se identifica un flujo poco superficial y se infiere una superficie de desplazamiento de tipo traslacional (Figura 47 zoom 1).
- 2) En la parte inferior, se infieren dos principales escarpes. El primero corresponde al escarpe principal, en el cual se identifican caída de rocas y empujadas por el deslizamiento superior.
- 3) Por último, se infiere la superficie de deslizamiento de los cuerpos múltiples que se encuentran al pie del cuerpo. Estos presentan un desplazamiento de - 0.71 a -2.1 m en a horizontal (ausencia de material) y 1.2 m en la vertical (Figura 37 zoom 2).

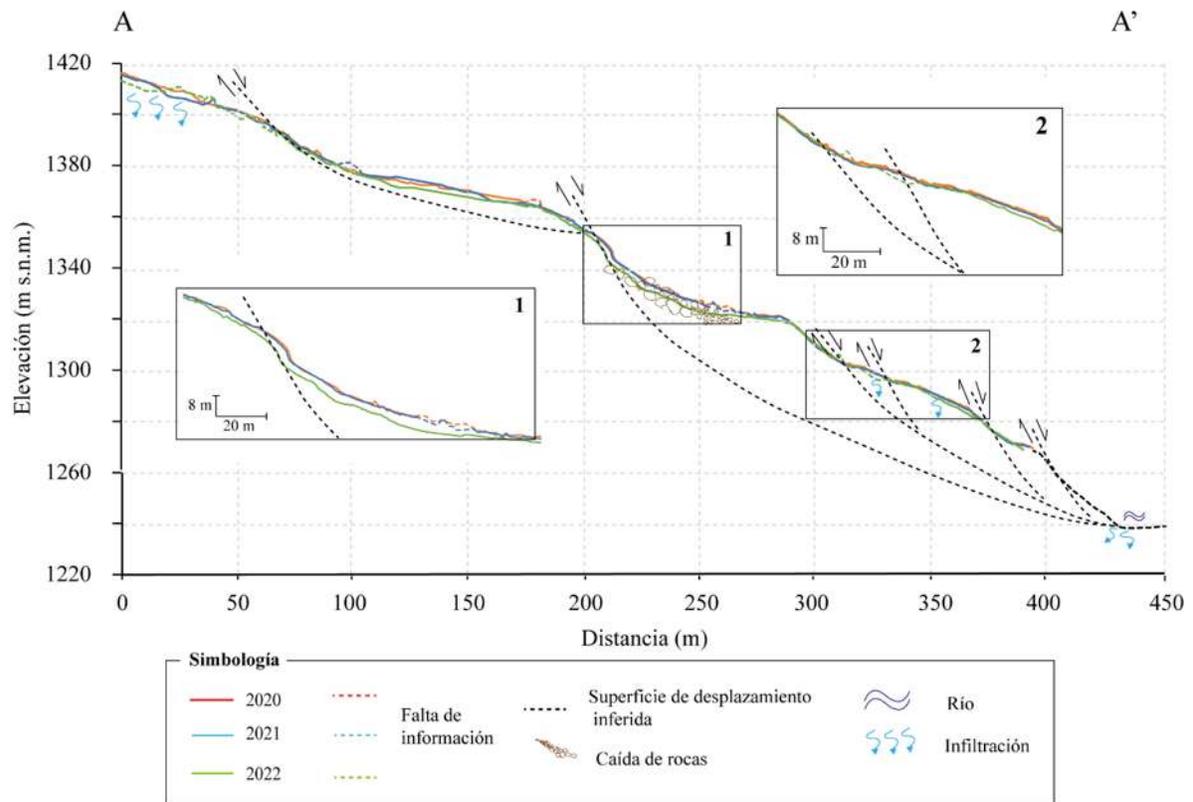


Figura 47. Perfil topográfico A-A' de Jungapeo, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

El perfil B-B', está delimitado desde la cima al pie del deslizamiento, muy similar al perfil anterior. En este cuerpo se delimitó en dirección al flanco derecho, cerca del PRMs que se delimita en la [Figura 48](#). Al igual que en el perfil anterior, se proponen tres cuerpos principales: deslizamiento superficial traslacional, escarpe del cuerpo principal y un deslizamiento sucesivo.

Por otra parte, se infiere que este desplazamiento está siendo intensificado por las diferentes actividades de cultivos de la zona y el tipo de riego que se utiliza el cual contribuye ligeramente a la infiltración del agua.

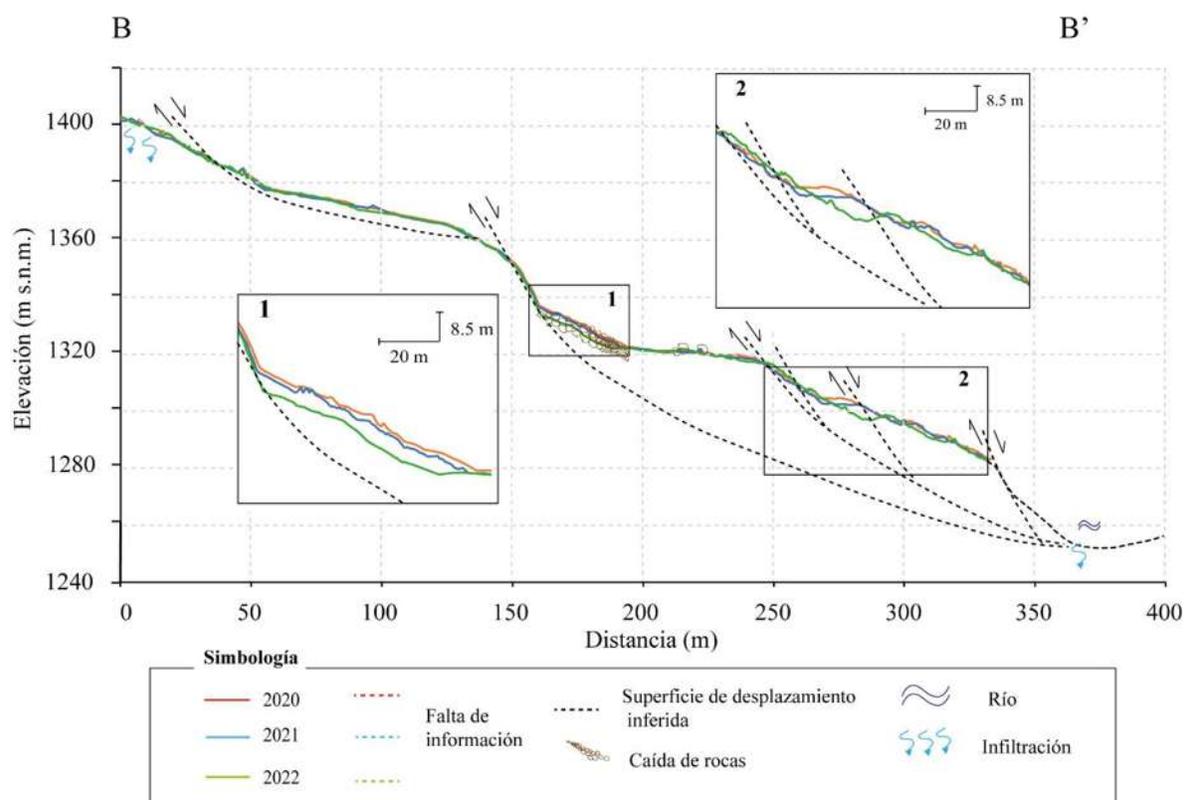


Figura 48. Perfil topográfico B-B' de Jungapeo, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

6.3.3 Discusión

El ELT permitió delimitar características del terreno, como fracturas, escarpes y cuerpos secundarios con más detalle en comparación con otros insumos (MDE y curvas de nivel) utilizados para delimitar estas características en el sitio en otros años (Villaseñor-Reyes, 2019). Además, tiene una ventaja sobre otras técnicas como la fotogrametría (Lin et al., 2013), ya que nos permitió obtener detalle a pesar de la vegetación, lo cual suele ser una limitante en el estudio de PRM. Por esta razón,

es una de las mejores técnicas para el monitoreo de desplazamientos en áreas pequeñas (Jaboyedoff *et al.*, 2010), permitiendo observar con mayor detalle la dirección y patrones de deformación, debido a la cantidad de datos que se obtuvieron en cada uno de los escaneos.

Los datos obtenidos a partir de la comparación de nubes de puntos nos permitieron obtener mayor cantidad de puntos del PRMs 1 en comparación con los demás PRMs asociados a este cuerpo inestable. Aun así, los resultados fueron satisfactorios, ya que permitió determinar los desplazamientos y su relación con la dinámica de todo el cuerpo. Además de actualizar la información reportada por Villaseñor-Reyes en 2019, en donde se obtuvieron tasas de desplazamiento de 2 y 3 m/año en la horizontal y vertical, respectivamente. Siendo que, para el año de 2020, éstas tasas disminuyeron a un rango de 0.012 y 0.1 m /año.

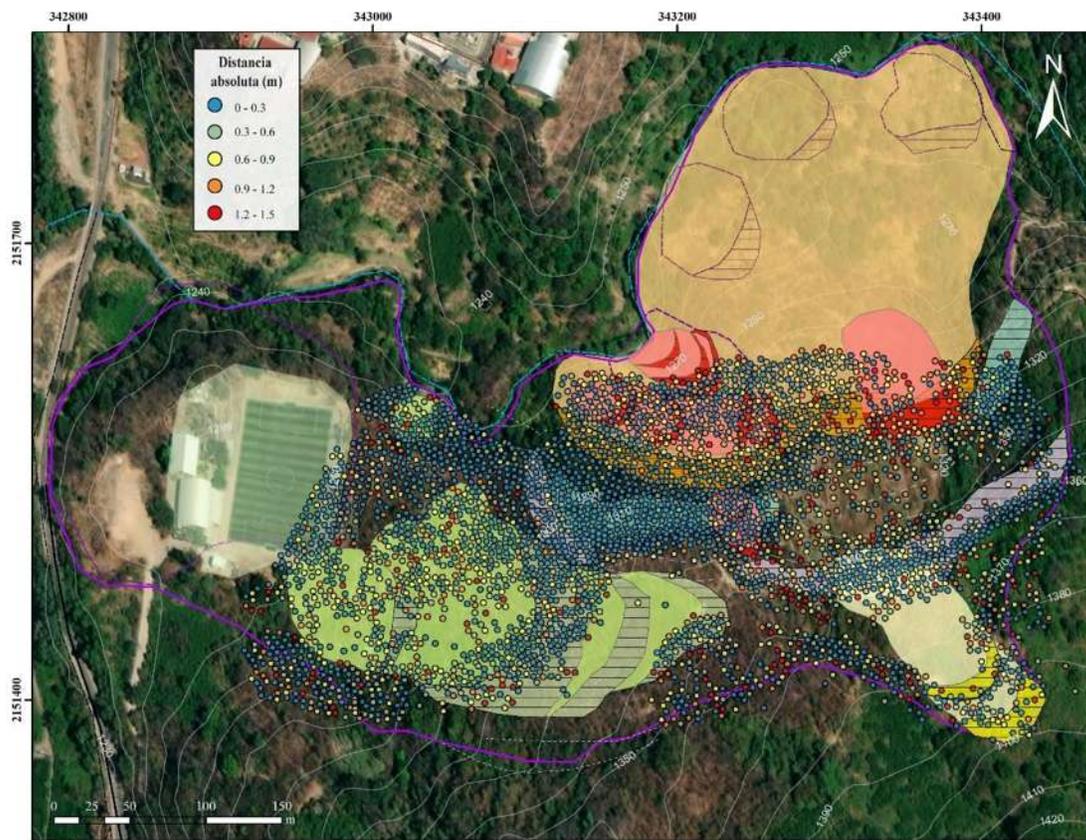


Figura 49. Comparación de desplazamiento 2015 -2016 vs mapa inventario de Jungapeo. La simbología del mapa inventario puede ser consultada en la Figura 43. Los puntos se obtuvieron de la nube original, exportando una nube con menor cantidad de puntos.

Lo anterior nos indica, que al igual que en el caso de Turundeo, el cuerpo no se desplaza con velocidades homogéneas, los mayores desplazamientos se observan en los PRMs, que se desarrollan en la parte central-baja y en fracturas (Figura 49 y Figura 50). Y el flanco derecho del deslizamiento, además de presentar estructuras fuera del deslizamiento, pero que podría estar asociado a dicho movimiento.

Los desplazamientos de estos cuerpos, están siendo afectados por la erosión del río al pie de estos. Otro factor importante, es la actividad antropogénica. Dado por la actividad de los cultivos de aguacate y ciruela, los cuales se riegan constantemente y a pesar de que es por goteo, podría estar favoreciendo al desplazamiento de las rocas sobre las que se encuentran (intercalación de areniscas, lutitas y limolitas), que están meteorizadas y ya han sido desplazadas anteriormente por otros PRMs. Además de la falta de información de los pobladores, que según mencionan, en algunos casos ellos mismos quitan la vegetación de las zonas bajas.

Debido a la diferencia entre los periodos de escaneo, no se podría inferir si la precipitación ha influido en estos desplazamientos, pero sin duda, el cuerpo ha disminuido su desplazamiento en los últimos cuatro años. Sin embargo, es importante seguir monitoreando estos cuerpos, ya que es un cuerpo muy activo, no solo en la parte analizada en este trabajo, sino en todo el cuerpo.

Por lo anterior, este cuerpo es dinámicamente complejo, por los diferentes cuerpos que lo integran, con diferentes direcciones de desplazamiento. Su desplazamiento está siendo afectado por dos factores principalmente: el tipo de litología y la erosión del río.

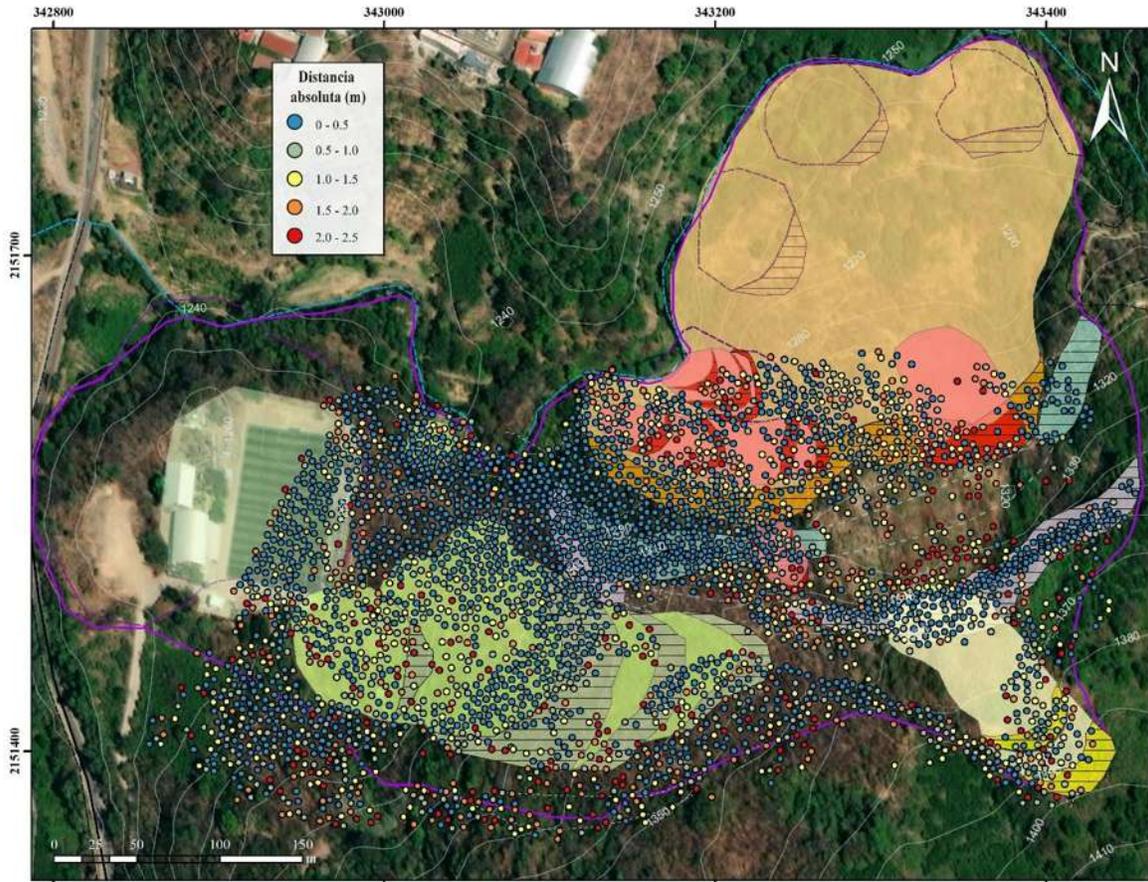


Figura 50. Comparación de desplazamiento 2016 -2020 vs mapa inventario de Jungapeo. La simbología del mapa inventario puede ser consultada en Figura 43. Los puntos se obtuvieron de la nube original, exportando una nube con menor cantidad de puntos.

6.4 Deslizamiento complejo Las Pilas

Por último, el caso de Las Pilas, se encuentra en la localidad del mismo nombre y pertenece al municipio de Zitácuaro. Se ubica entre la Mesas Virgen y Copándaro. La altura mínima y máxima en toda la zona varía entre 1670 y 1790 m s.n.m, respectivamente (Figura 51).

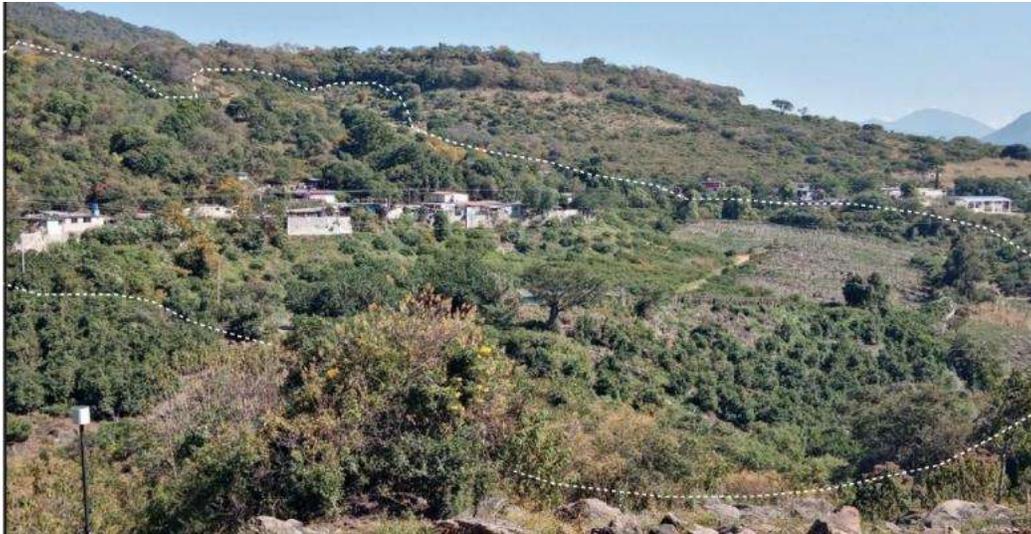


Figura 51. Vista del cuerpo inestable de Las Pilas.

6.4.1 Morfología y morfometría

El deslizamiento complejo de Las Pilas presenta un ancho de 348 m, longitud de 770 m y una diferencia topográfica de base a cima de 140 m y un área de 231, 140 m². Así como pendientes mínimas de 0 a 9° en las zonas medias de los PRM secundarios y de 45 a 67° en los escarpes de estos mismos y en zonas cercanas al cauce del río, principalmente en los PRM que se cartografiaron con más detalle en este trabajo.

Este cuerpo se clasifica como deslizamiento rocoso o *rock slide* (Dikau *et al.*, 1996), de acuerdo a Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy (2012), la superficie de desplazamiento es más o menos planar (a una profundidad de 20 m), sobre una litología más competente que la constituye el deslizamiento (brecha volcánica inmersa en una matriz de lutitas). Se encuentra integrado por múltiples colapsos de tipo traslacional y flujos (Figura 52).

Se presenta un mapa inventario, en el que se delimitaron PRM secundarios (PRMs) inactivos a partir del informe realizado por Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy (2012), en el cual se identifican al menos 7 PRM secundarios, los cuales no se pudieron obtener a partir de las nubes de puntos obtenidas en este trabajo. Sin embargo, se delimitaron con mayor precisión, tres de estos (Figura 54), en la parte inferior, cerca del flanco derecho, los cuales presentan considerable actividad, la cual se refleja en algunas estructuras que presentan fracturas (Figura 53).

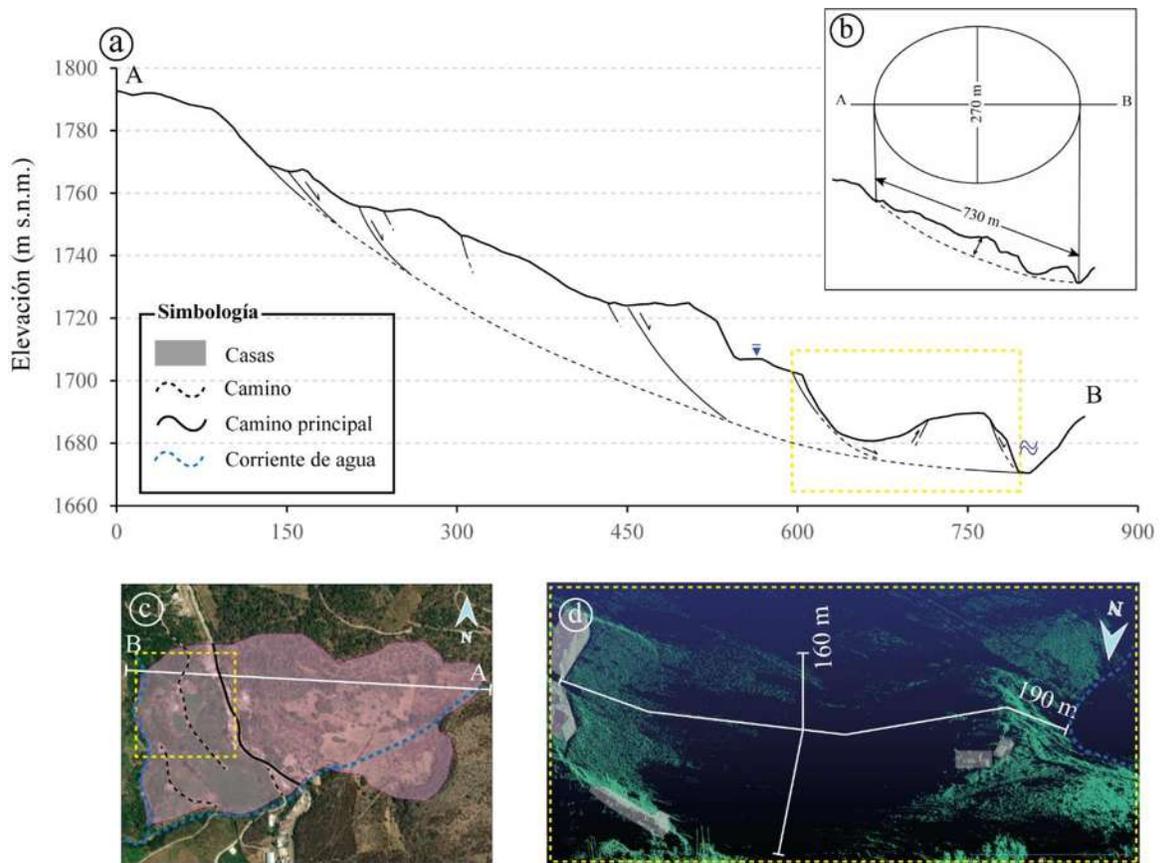


Figura 52. Deslizamiento complejo de Las Pilas. a) Perfil topográfico, muestra las características estructurales: fracturas, superficies de deslizamiento inferidas, canal de agua (triángulo invertido) y río Grande en la parte inferior (Modificado de Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy, 2012). b) Dimensiones aproximadas del cuerpo inestable, tomando de referencia el trabajo de WP/WLI4 (1993) (Anexo 1). c) Ubicación del perfil topográfico obtenido A-B. d) Dimensiones de la deformación, obtenida a través de CloudCompare.



Figura 53. *Fracturas que se observan en el cuerpo de Las Pilas. a) y b) Fracturas sobre casas en la parte superior del escarpe principal del PRMs estudiado en este trabajo. c) Fractura sobre casa en el bloque en rotación del PRMs. d) Grietas sobre el terreno perteneciente a la iglesia de la localidad. e) Fractura sobre el escarpe del PRMs.*

Los tres cuerpos que se delimitaron este trabajo, se mencionan a continuación de acuerdo a la actividad reportada en el subcapítulo 6.3.2:

- 1) El PRMs 1 de color naranja (Figura 54), con un área de 27, 883 m², se desarrolla a espaldas de al menos ocho viviendas. Se identificaron fracturas en el escarpe principal de este cuerpo con una dirección preferencial NE-SW. Se clasifica como deslizamiento de tipo rotacional, presenta basculamiento, generando una superficie cóncava al centro y al pie de este se desprenden dos bloques de menor extensión
- 2) En la parte baja del PRMs mencionado en el punto anterior (Figura 54), se desarrollan dos deslizamientos más, con un área de 3004 m² y 5,009 m², respectivamente. Se clasifican como

un movimiento de tipo traslacional, detonado principalmente por la erosión del río, sobre el pie de estos cuerpos y la tensión generada por el PRMs 1.

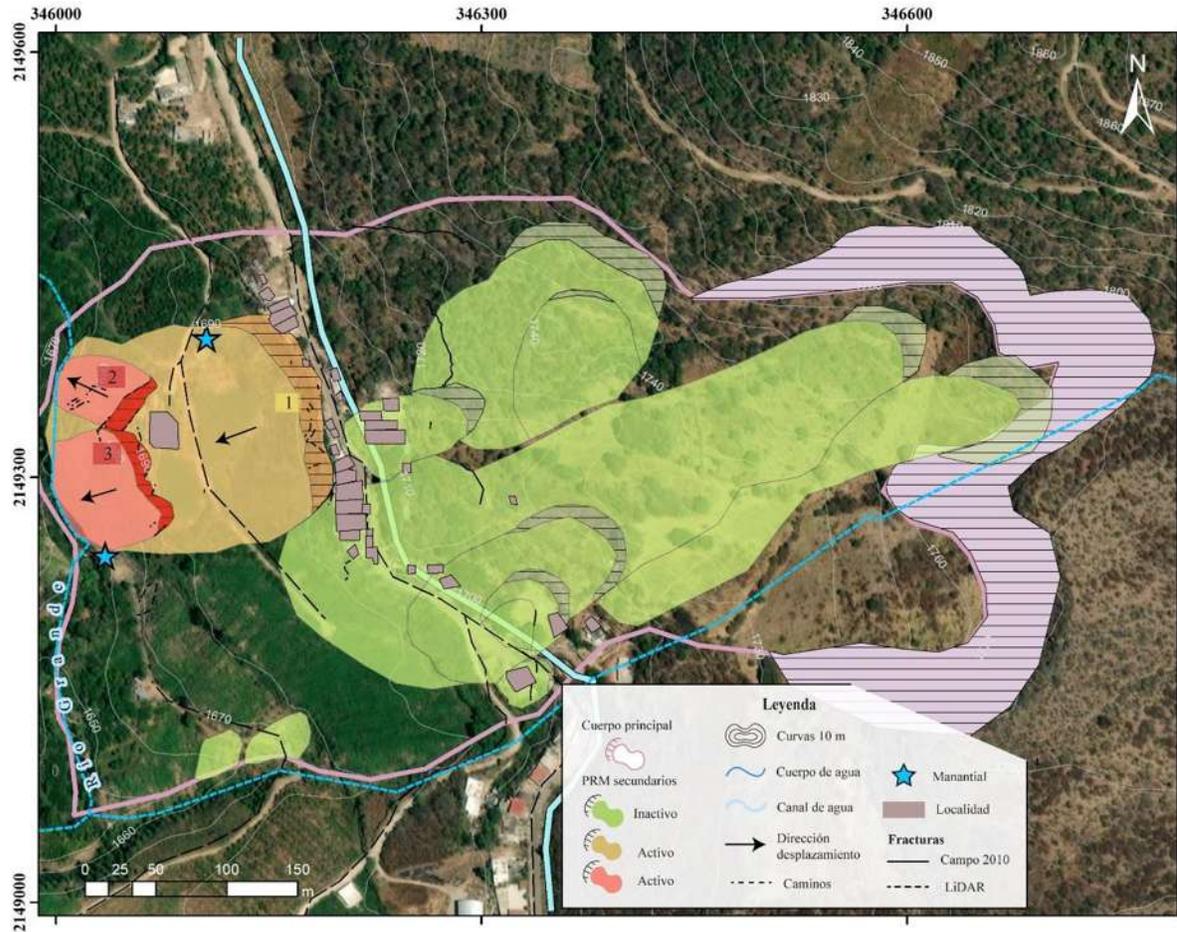


Figura 54. Mapa inventario del cuerpo inestable de Las Pilas, en el cual se delimitan los PRMs que se desarrollan dentro de este, así como vectores de desplazamiento. Los PRM verdes corresponden a cuerpos cartografiados por Hernández-Madrigal y Garduño-Monrroy, 2012, mientras que los cuerpos de color naranja (PRM 1) y rojos (PRM 2 Y 3) corresponden a los analizados en este trabajo.

6.4.2 Cinemática

La cinemática de este cuerpo está condicionada por el desplazamiento que presentan tres PRMs descritos anteriormente, estos se desplazan en diferentes direcciones y a diferentes velocidades, de acuerdo con el monitoreo de 1 año dos meses (noviembre 2020 a febrero 2022).

El primer monitoreo tomado para este cuerpo fue en 2020 y el segundo en 2021 (Figura 56), con una diferencia de seis meses entre estos. En este primer análisis, se obtuvieron zonas estables en la mayoría de las viviendas que se encuentran al borde del escarpe principal del PRMs 1, con algunos desplazamientos en la parte media, presentando un desplazamiento absoluto de 0.05 a 0.2 m; Z de -0.05 a 0.1 m; en Y de -0.07 a 0.1 m; y en X de 0.05 a 0.1 m.

El tercer monitoreo se realizó en enero de 2022, el cual se analizó respecto al primer monitoreo con una diferencia de 1 año y dos meses. Las nubes de puntos del tercer monitoreo nos permitieron analizar una menor cantidad de puntos (Figura 57). Sin embargo, se logró identificar algunas zonas de interés como viviendas que presentaron desplazamiento en el eje X e Y, en el primer análisis. Se obtuvo que las viviendas siguen estando considerablemente estables. Sin embargo, las zonas que se ubican en la parte media y al pie de los PRMs 2 y 3 presentan desplazamiento absoluto de 0.01 a 0.13 m; en Z de -0.13 a 0.2; en Y de 0.05 a 0.3 m; y en X de -0.15 a 0.13 m.

Posteriormente se analizó el primer monitoreo contra el segundo y el segundo contra el tercero, para obtener datos con mayor fiabilidad. Se analizaron las velocidades de desplazamiento presentadas por los PRMs y se compararon entre sí, y respecto al monitoreo realizado de 2015 a 2017 por Villaseñor-Reyes, (2019) (Tabla 13). Lo que permitió corroborar que en los monitoreos realizados en 2020 y 2021, presentaron ligeramente mayor actividad, que en el monitoreo de 2022.

Se obtuvo la velocidad de desplazamiento anual, con los valores de cada monitoreo y se compararon contra los de Villaseñor-Reyes (2019) (Tabla 14). Dichos valores, entran dentro de los obtenidos en este trabajo, aunque estos se relacionan con los valores mínimos. Además, para el trabajo de Villaseñor-Reyes, se obtuvo una velocidad promedio en la horizontal y la vertical; mientras que, en este trabajo, el desplazamiento se puede apreciar en las componentes X, Y, Z y absoluta. Pero para fines prácticos, en las tablas se utilizaron velocidades de desplazamiento absoluto, permitiéndonos delimitar rangos de desplazamiento del PRMs de este sitio, el cual afecta directamente a la localidad de las Pilas. Al desplazarse a velocidades heterogéneas, es importante tener conocimiento de las zonas con mayor actividad, para que la población esté alerta ante cualquier aumento de velocidad de desplazamiento, el cual podría afectar sus viviendas.

Por último, se graficaron las velocidades de desplazamiento conforme a los datos ajustados. En la Figura 55, se observan los valores mínimos y máximos de velocidad de desplazamiento de cada PRMs, y el aumento y disminución de estos. De acuerdo a Dikau et al., 1996 (Anexo 2), las velocidades obtenidas corresponden una clase 2 y 3 de desplazamiento que va de lento a muy lento;

predominando la clase 2 (muy lento). Esta clase considera que las construcciones usualmente no presentan daños por el desplazamiento, pero en cuanto más se acerque a la clase 3, tendrá mayor probabilidad que generar daños permanentes.

Tabla 13. Velocidad de desplazamientos obtenidos anteriormente por Villaseñor-Reyes, (2019) comparadas con rangos de desplazamientos absolutos obtenidos en los monitoreos de este trabajo. Se utilizaron los PRMs como parámetro principal, debido a que corresponden a las zonas con mayores desplazamientos.

PRMs	Velocidad 1	Velocidad 2 (ABS)	Velocidad 3 (ABS)
	(Villaseñor-Reyes, 2019)	Nov 2020 -may 2021	May 2021 – feb 2022
1	34 cm horizontal 16 cm vertical	0.05-0.2 m	0.02 – 0.13 m
2		0.05 -0.2 m	0.01 -0.12 m
3		0.05-0.15 m	0.02 – 0.13 m

Tabla 14. Velocidades anuales obtenidas a partir de los monitoreos realizados en este trabajo, así como en el monitoreo de Villaseñor-Reyes (2019).

PRMs	Velocidad 1	Velocidad 2 (ABS)	Velocidad 3 (ABS)
	(Villaseñor-Reyes, 2019)	Nov 2020 -may 2021	May 2021 – feb 2022
1	0.04 m/año horizontal 0.08 m/año vertical	0.096 – 0.36 m/año	0.024 – 0.12 m/año
2		0.096 – 0.36 m/año	0.012 – 0.18 m/año
3		0.096 – 0.24 m/año	0.024 – 0.12 m/año

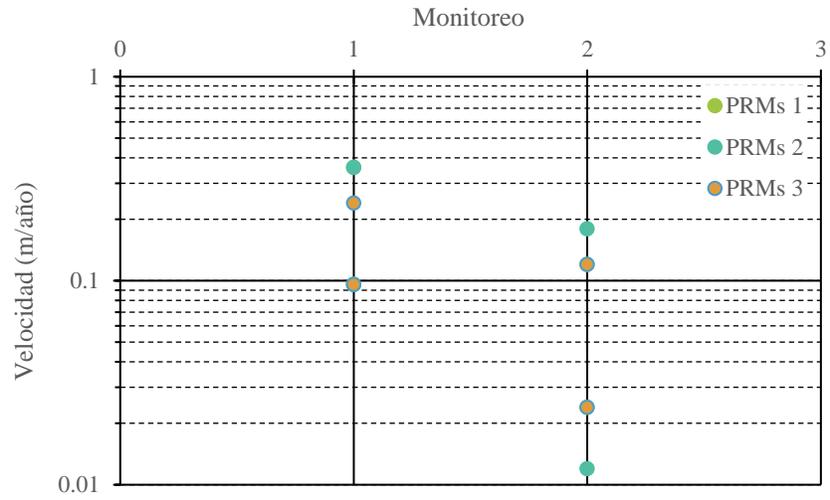


Figura 55. Velocidades de desplazamiento mínimos y máximos de los tres PRMs del cuerpo de Las Pilas con las velocidades obtenidas en los dos monitoreos. En el caso del PRMs 1 se traslapa con los datos del PRMs 2.

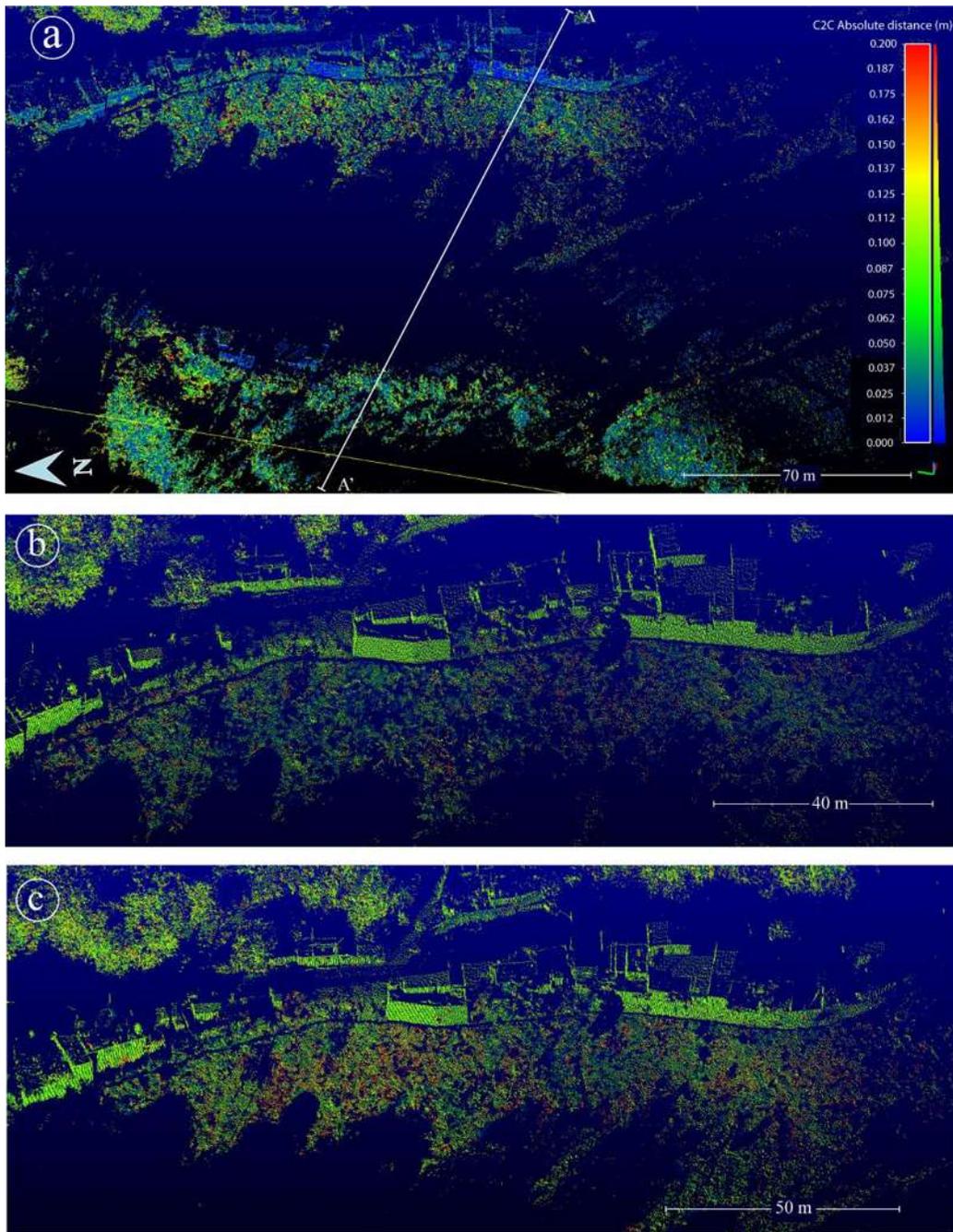


Figura 56. Análisis de distancias de Las Pilas, mediante el método C2C, entre las nubes de 2020 y 2021. Para los incisos b y c, los colores verdes indican zonas estables, sin desplazamiento, y los colores rojos mayor desplazamiento. a) distancia absoluta, los colores azules indican estabilidad y los colores rojos mayor desplazamiento. b) distancia en Z. c) distancia en X.

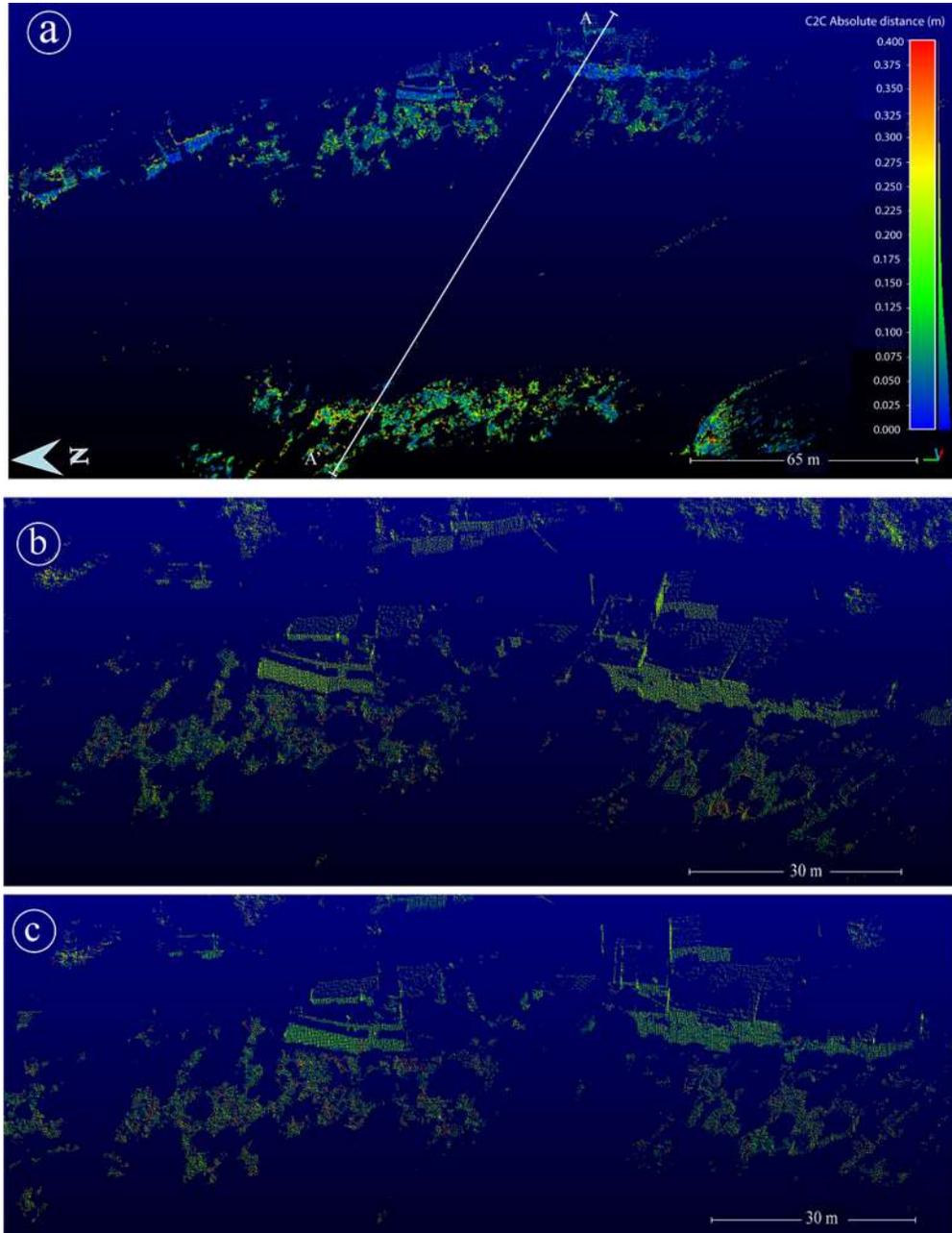


Figura 57. Análisis de distancias de Las Pilas, mediante el método C2C, entre las nubes de 2021 y 2022. Para los incisos b y c, los colores verdes indican zonas estables, sin desplazamiento, y los colores rojos mayor desplazamiento. a) distancia absoluta, los colores azules indican estabilidad y los colores rojos mayor desplazamiento. b) distancia en Z. c) distancia en X.

Lo anterior, nos permitió realizar un análisis más detallado, tomando en cuenta la topografía a partir de las nubes de puntos en los tres monitoreos. Se delimitó un perfil en el sitio con mayor desplazamiento:

1. El perfil A-A' se infiere la superficie de deslizamiento general de todo el cuerpo, que describen Hernández-Madrigal y Garduño-Monrroy, (2012) (Figura 58).
2. Este perfil (Figura 58) nos permite observar un basculamiento importante del PRMs 1, por lo que se clasifica como deslizamiento rotacional. Se propone una superficie de desplazamiento, que va de espaldas a las viviendas (Figura 58, zoom 1) hasta el cauce del río. En la Figura 58, se observa un desplazamiento en la horizontal de 0.5 m, entre el 2020 y 2021.
3. También nos ha permitido inferir superficies de deslizamiento de los PRMs 2 y 3 que se encuentran cerca del río, estos se clasifican como deslizamientos sucesivos. Se obtuvo un desplazamiento en esta zona desde 0.4 m en la horizontal y 0.2 m en la vertical (Figura 58, zoom 2). Y cerca de las casas en donde se desarrollan los cuerpos sucesivos (Figura 58, zoom 3), un desplazamiento de 0.4 m en la horizontal.

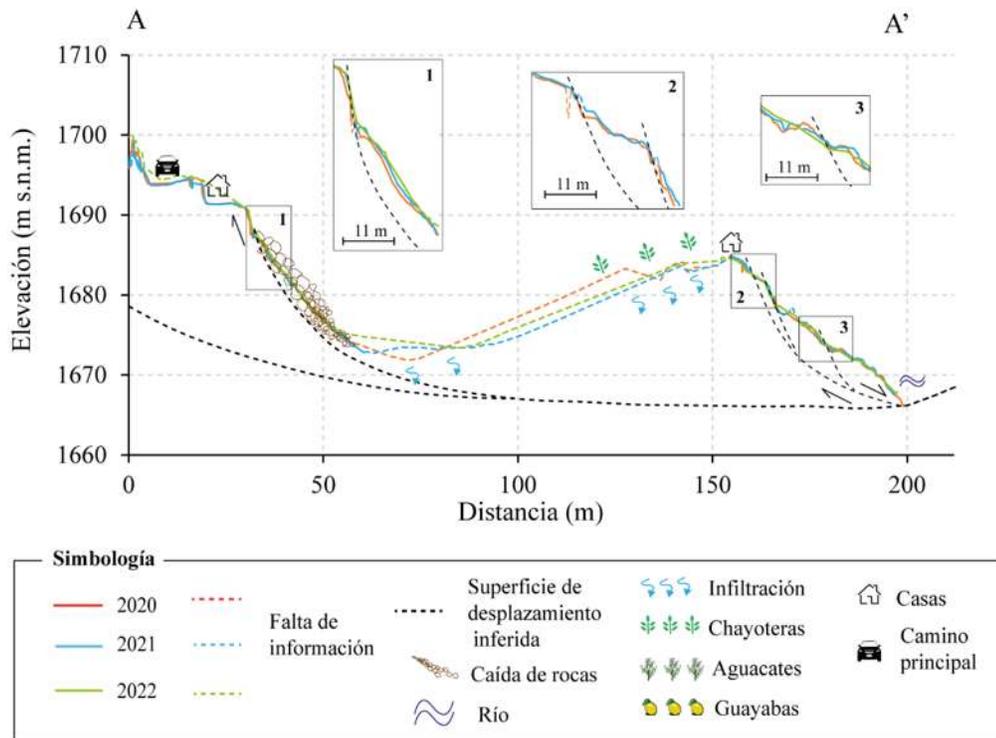


Figura 58. Perfil topográfico A-A' de Las Pilas, a partir de las nubes de puntos de los tres monitoreos.

Debido a la falta de información obtenida en las nubes de puntos anteriores de las Pilas, se analizó el flanco izquierdo de este deslizamiento. Los escaneos se realizaron sobre el camino principal, mediante dos monitoreos, el primero en mayo de 2021 y el segundo en enero de 2022, con una diferencia de ocho meses. Se obtuvo un desplazamiento absoluto de 0.07 a 0.25 m y en Z de - 0.07 a - 0.15 m (Figura 59 a y b).

Estos desplazamientos se pueden observar desde otro punto, en el perfil topográfico de la Figura 60, en donde se identifica la zona de mayor desplazamiento de este flanco, con desplazamientos en Z de 0.06 a 0.13 m, indicando un hundimiento. En la Figura 59 c y d, se pueden observar las grietas que presenta el flanco izquierdo, con ocho meses de diferencia.

En la Figura 59 a y b, se puede observar una zona con hundimiento fuera de lo que se delimita como el cuerpo principal, en el límite con el flanco izquierdo. Este hundimiento presenta un desplazamiento absoluto que va de 0.07 a 0.13 m, y en Z de - 0.03 a -0.13 m, sin identificar las posibles causas de este hundimiento, pero que claramente puede estar relacionado con el desplazamiento de este cuerpo.

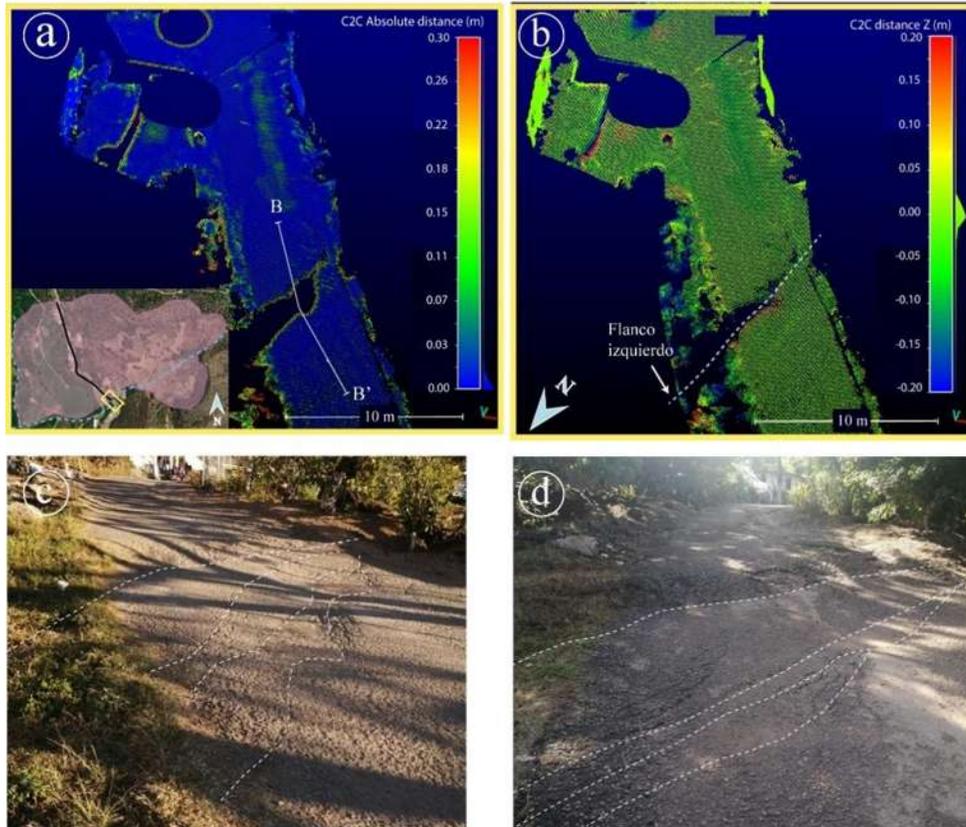


Figura 59. Análisis de distancias del flanco izquierdo de Las Pilas, mediante el método C2C, entre las nubes de 2021 y 2022. a) Distancia absoluta, en la figura miniatura se observa con un recuadro amarillo el sitio en el cual se obtuvo el escaneo, así misma muestra de donde se obtiene el perfil de la Figura 61. Los colores azules indican zonas estables y los colores rojos zonas con mayor desplazamiento. b) Distancia en Z, los colores verdes indican zonas estables y los colores rojos zonas con mayor desplazamiento. c) Flanco en enero de 2022. d) Flanco en septiembre de 2022.

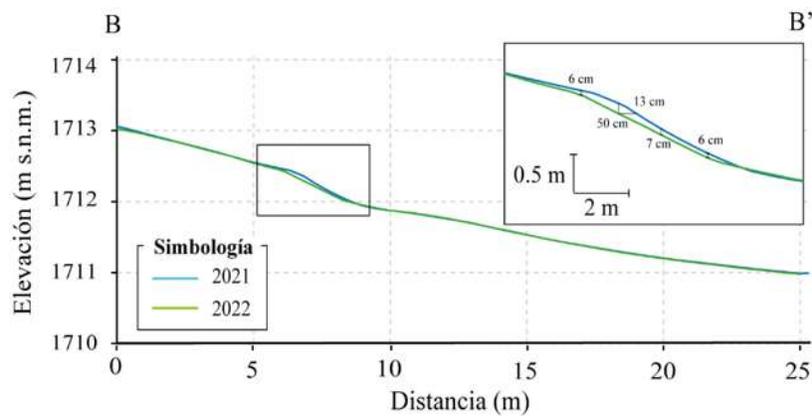


Figura 60. Perfil topográfico del flanco de las Pilas a partir de las nubes de puntos de 2021 y 2022. En la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* se observa el sitio del cual se obtuvo este perfil.

6.4.3 Discusión

Los resultados obtenidos a partir de las nubes de puntos fueron satisfactorios, sin embargo, en este cuerpo el área escaneada fue más pequeña en comparación con Turundeo y Jungapeo, debido a que el punto de escaneo no nos permitió obtener buena visión de todo el cuerpo. Otro factor importante fue la vegetación, la cual era más densa que en otros cuerpos inestables, esto nos generó mayor ruido y menor información de la superficie. A pesar de eso, las nubes de puntos obtenidas mediante el ELT, permitieron delimitar características del terreno, como fracturas, escarpes, cuerpos secundarios y basculamiento con mayor detalle de lo que se habían descrito anteriormente por autores como Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy (2012), y Villaseñor-Reyes (2019).

Además, el ELT permitió actualizar la información obtenida por Villaseñor-Reyes, quien reportó una tasa de desplazamiento de 0.04 y 0.08 m/año en la horizontal y vertical, respectivamente. De acuerdo a los datos adquiridos en este trabajo, las velocidades se mantienen en algunos sitios y en otros aumenta, con una tasa de 0.024 a 0.36 m/año. Además de identificar nuevos desplazamientos, que no habían sido descritos por otros autores, tal es el caso del flanco derecho del deslizamiento con un desplazamiento de 0.13 m en ocho meses. Asimismo, se identificó una zona de hundimiento de hasta 0.13 fuera del límite del deslizamiento.

De los datos procesados, se obtuvieron mejores resultados en las nubes del año 2020 y 2021. La comparación de dichos escaneos permitió obtener valores de desplazamiento de centímetros (Figura 61 y Figura 62), lo cual nos indica que este cuerpo es el de menor actividad, respecto a Turundeo y Jungapeo. Sin embargo, es importante resaltar que la rotación que está desarrollando el bloque del PRMs 1 está favoreciendo al desarrollo de otros PRMs al pie de este. Estos pequeños PRMs, están siendo afectados por la erosión del río.

En el centro de este bloque en rotación hay sembradíos de guayabas y chayotes, que usualmente son regados con el tipo de riego de agua rodada, el cual podría estar favoreciendo la infiltración, que a su vez estaría acumulándose cerca de las superficies de desplazamiento de otros PRMs, a través de la brecha volcánica que los constituyen.

La precipitación no juega un papel importante en este desplazamiento, ya que los habitantes de la localidad mencionan que los manantiales que los abastecen de agua, les proporcionan mayor cantidad en época de secas (riego de los cultivos ladera arriba), que en época de lluvia. Lo que nos podría indicar que el agua que se distribuye en los cultivos en época de secas, se infiltra y desplaza ladera

abajo a través de las fracturas o espacios porosos que se forman entre los flujos de lava y la brecha volcánica. Esto se puede corroborar con los desplazamientos que se obtuvieron de noviembre de 2020 a mayo de 2021 (precipitación min. 0, máx. 26 mm) en comparación con los obtenidos en mayo de 2021 a febrero de 2022 (precipitación min. 1.1 y máx. 245 mm) (Figura 6).

Por otra parte, el río socava la parte baja del PRM 1 (Figura 32), erosionando la brecha volcánica, generando susceptibilidad a la formación de fracturas y nuevos PRMs. Por lo tanto, se propone que los factores más importantes en estos desplazamientos, son el sistema de riego, la litología y la erosión que genera el río.

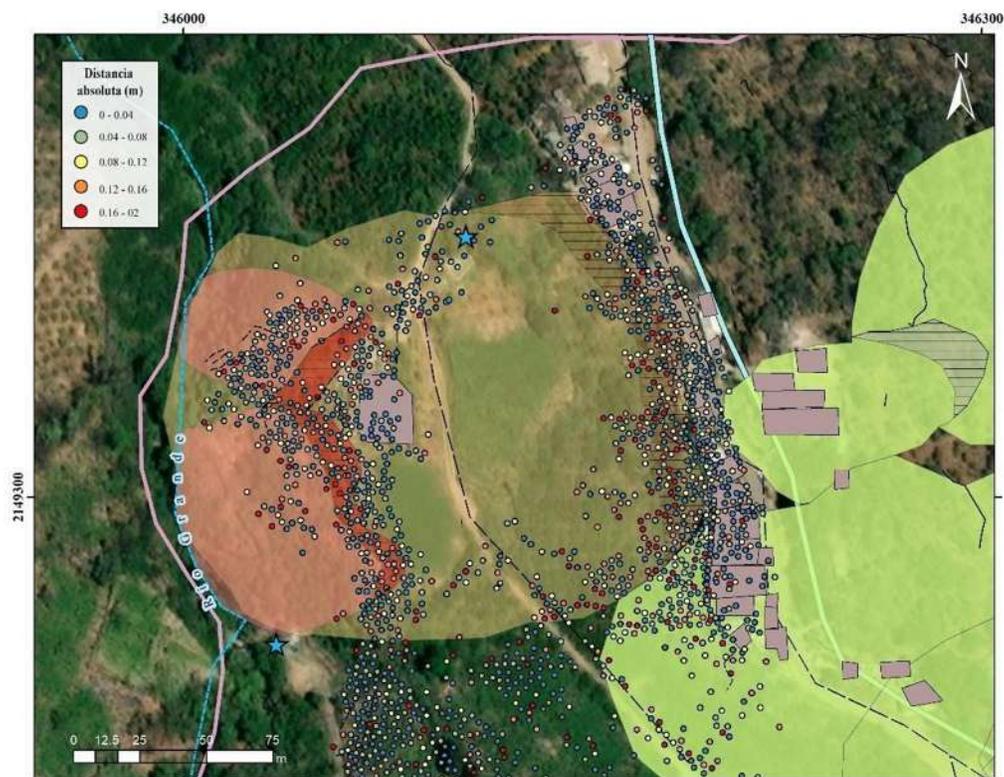


Figura 61. Comparación de desplazamiento 2020 -2021 vs inventario de Las Pilas. La simbología del mapa inventario puede ser consultada en la Figura 32. Las nubes de puntos son una muestra de la nube de puntos original.

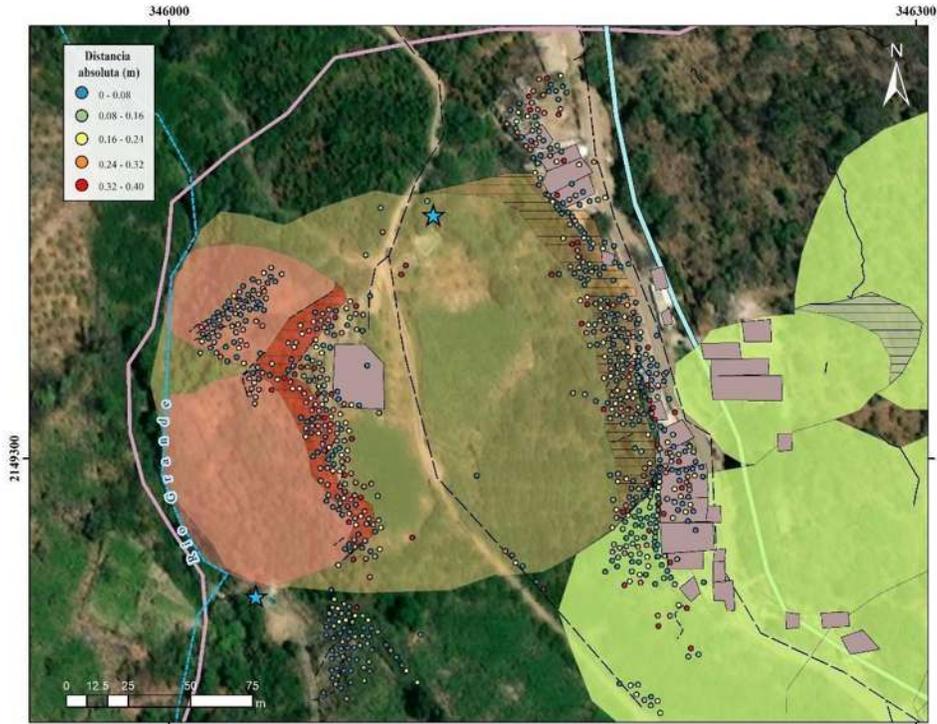


Figura 62. Comparación de desplazamiento 2021 -2022 vs mapa inventario de Las Pilas. La simbología del mapa inventario puede ser consultada en la Figura 32. Las nubes de puntos son una muestra de la nube de puntos original.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El monitoreo mediante el Escáner Laser Terrestre (ELT), permitió obtener monitoreos con gran resolución espacial de los cuerpos inestables. La cinemática de los cuerpos inestables fue registrada con gran precisión arrojando valores de desplazamiento absolutos, en dirección X, Y, y Z, con errores milimétricos.

Los tres cuerpos inestables, se desplazan con velocidades heterogéneas en todo el cuerpo. Presentan mayor desplazamiento en los Procesos de Remoción en Masa secundarios (PRMs) que se han desarrollado sobre estos. La velocidad con la que estos se desplazan se clasifica de tipo lento a muy lento. El lento, genera daños en carretera, casas y terrenos, provocando la necesidad de realizar mantenimiento frecuentemente como en el caso de la carretera de Morelia-Toluca en Turundeo; mientras que el muy lento, las estructuras usualmente no presentan daños a corto plazo como en el caso de en las casas que se encuentran en la localidad de las Pilas.

Los perfiles topográficos, permitieron relacionar la morfología con los factores que influyen en el desplazamiento de todo el cuerpo y desarrollo de PRMs. En Turundeo y en las Pilas el tipo de cultivo (chayotes y guayaba) y riego (rodado) del sitio son los factores que están favoreciendo a este desplazamiento. Mientras que en Jungapeo, la litología (intercalación de lutitas, areniscas y calizas) y la actividad antropogénica (retirando la vegetación en la base del cuerpo), son los factores que facilitan al desplazamiento del terreno.

El cuerpo más activo es Turundeo, con desplazamiento absoluto de 0.07 a 0.35 m en los primeros seis meses, en los siguientes ocho meses se desplazó 0.08 a 0.8 m. Le sigue Jungapeo con un desplazamiento absoluto de 1.5 m de 2015 a 2016 (6 meses) y de 2016 a 2020 (cuatro años y cinco meses) se desplazó 0.1 a 2 m. Por último, Las Pilas se desplazó de 0.05 a 0.2 m en seis meses, y en los siguientes ocho meses de 0.02 a 0.13 m.

Recomendaciones

Las dimensiones y pendientes de los PRM, no permitieron obtener información de las zonas más altas de los cuerpos inestables de Jungapeo y Las Pilas, por lo que se recomienda un sitio más alto o

escaneos desde diferentes puntos para obtener nubes de puntos que abarquen mayor área de los cuerpos inestables.

Modificar los sistemas de riego en los cuerpos inestables de Turundeo y Las Pilas, que están favoreciendo al desplazamiento de los cuerpos. El cuerpo de Turundeo es zona muy transitada y el colapso del cuerpo podría exponer a la población de Tuxpan a otros riesgos como formación de dique sobre el río Taximaroa e incluso colapso de este.

Por último, se recomienda continuar con monitoreos de los tres cuerpos, especialmente en el caso de las Pilas, que, a pesar de presentar menores desplazamientos, estos son importantes para mantener informados a los habitantes de la localidad, que serían los más afectados en caso de que aumentaran los desplazamientos. Además, el tipo de precipitación de la zona, históricamente han presentado lluvias atípicas y detonado aumento en la actividad de los cuerpos de este estudio.

ANEXO 1

Características del deslizamiento

- 1) Corona: el material prácticamente sin desplazar que sigue en su lugar y adyacente a las partes más altas del escarpe principal (2).
- 2) Escarpe principal: Superficie escarpada en el terreno inalterado en el borde superior del deslizamiento, causada por el movimiento del material desplazado (13) lejos del terreno inalterado. Es la parte visible de la superficie de ruptura (10).
- 3) Parte superior: El punto de contacto más alto entre el material desplazado (13) y el escarpe principal (2).
- 4) Cabeza: Las partes superiores del deslizamiento a lo largo del contacto entre el material desplazado y el material principal.
- 5) Escarpe menor: Superficie escarpada sobre el material desplazado del deslizamiento producido por movimientos diferenciales dentro del material desplazado.
- 6) Cuerpo principal: La parte del material desplazado del deslizamiento que recubre la superficie de rupturas. Entre el escarpe principal (2) y el punto de la superficie de ruptura (11).
- 7) Pie: La parte del deslizamiento que se ha desplazado más allá del punto de la superficie de ruptura (11) y que recubre la superficie original del terreno (20).
- 8) Punta: El punto de la punta (9) más alejado de la parte superior (2) del deslizamiento.
- 9) Puntera: Margen inferior, generalmente curvado del material desplazado de un deslizamiento, es el más distante del escarpe principal (2).
- 10) Superficie de ruptura: La superficie que forma (o ha formado) el límite inferior del material desplazado (13) por debajo de la superficie original del terreno (20).
- 11) Punta de la superficie de ruptura: La intersección (generalmente enterrada) entre la parte inferior de la superficie de ruptura (10) de un deslizamiento y la superficie original del terreno (20).
- 12) Superficie de separación: La parte de la superficie original del terreno (20) superpuesta por el pie (7) del deslizamiento.
- 13) Material desplazado. Material desplazado de su posición original en la ladera por el movimiento en el deslizamiento. Forma tanto la masa agotada (17) como la acumulación (18).
- 14) Zona de agotamiento: Zona del deslizamiento dentro de la cual el material desplazado se encuentra por debajo de la superficie original (20).
- 15) Zona de acumulación: Zona del deslizamiento dentro de la cual el material desplazado se encuentra por encima de la superficie original del terreno (20).

- 16) Agotamiento: El volumen delimitado por el escarpe principal (2), la masa agotada (17) y la superficie original del terreno (20).
- 17) Masa agotada: Volumen del material desplazado que recubre la superficie de ruptura (10) pero que subyace a la superficie original del terreno (20).
- 18) Acumulación: Volumen del material desplazado (13) que se encuentra por encima de la superficie original del terreno (20).
- 19) Flanco: El material no desplazado adyacente a los lados de la superficie de ruptura. Para describir los flancos son preferibles las direcciones de la brújula, pero si se utilizan izquierda y derecha, se refieren a los flancos vistos desde la corona (1).
- 20) Superficie original del terreno: La superficie del talud que existía antes de que se produjera el deslizamiento.

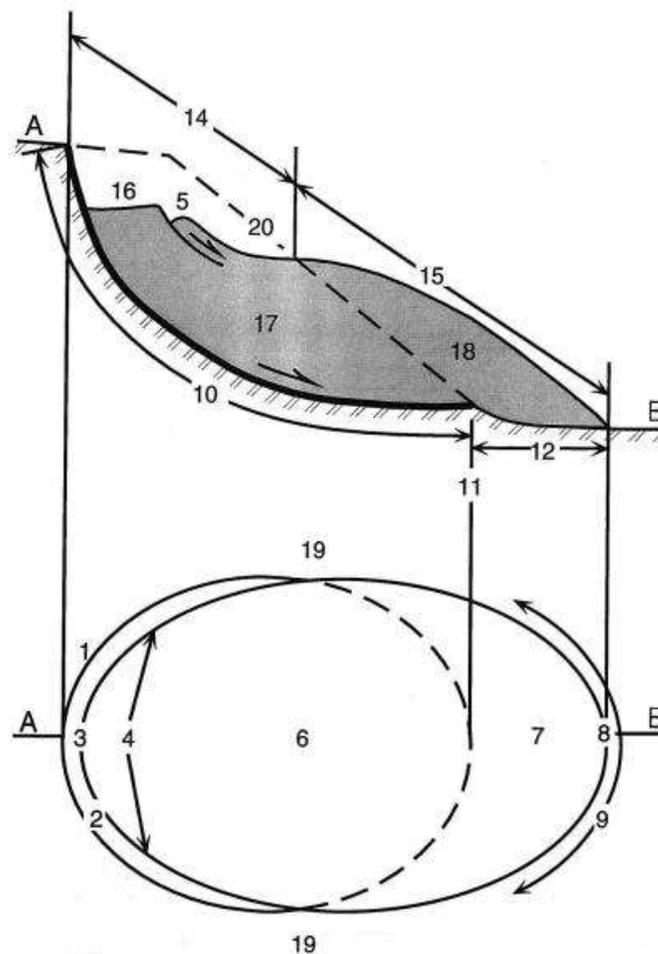


Figura A1.1. Características del deslizamiento, tomada de WP/WLI,1993.

Dimensiones del deslizamiento

- 1) Anchura de la masa desplazada (W_d): es la anchura máxima de la masa desplazada perpendicular a la longitud (L_d).
- 2) Anchura de la superficie de ruptura (W_r): es la anchura máxima entre los flancos del deslizamiento, perpendicular a la longitud (L_r).
- 3) Longitud total (L): es la distancia mínima desde la punta del deslizamiento hasta su corona.
- 4) Longitud de la masa desplazada (L_d): es la distancia mínima desde la punta hasta la cima.
- 5) Longitud de la superficie de ruptura (L_r): es la distancia mínima desde la punta de la superficie de ruptura hasta la corona.
- 6) Profundidad de la masa desplazada (D_d): es la profundidad máxima de la masa desplazada, medida perpendicularmente al plano que contiene W_d y L_d .
- 7) Profundidad de la superficie de ruptura (D_r): es la profundidad máxima de la superficie de ruptura por debajo de la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plan que contiene W_r y L_r .

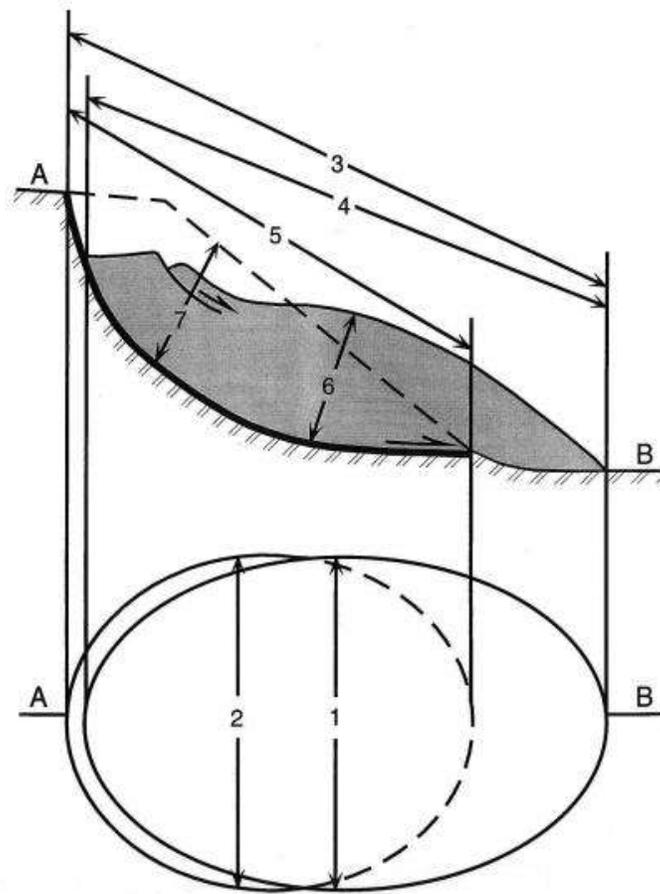


Figura A1.2. Dimensiones del deslizamiento, tomada de WP/WLI,1993.

ANEXO 2

Clase de velocidad	Descripción	Velocidad	Probable impacto
7	Extremadamente rápido	5 m/ sec	Catástrofe de gran violencia; edificios destruidos por el impacto del material desplazado; muchos muertos; huida poco probable.
6	Muy rápido	3 m/ min	Algunas vidas perdidas; velocidad demasiado grande para permitir que todas las personas escapen.
5	Rápido	1.8 m/hr	Evacuaciones de escape posibles; estructuras; posesiones y equipos destruidos.
4	Moderado	13 m/mes	Algunas estructuras temporales e insensibles pueden mantenerse temporalmente.
3	Lento	1.6 m/año	Se pueden realizar obras de reparación durante el movimiento; las estructuras insensibles se pueden mantener con trabajos de mantenimiento frecuentes si el movimiento total no es grande durante una fase de aceleración concreta.
2	Muy lento	15 mm/año	Algunas estructuras permanentes no resultan dañadas por el movimiento.
1	Extremadamente lento		Imperceptibles sin instrumentos; construcción. Posible precaución.

Figura A2.1. Clasificación de velocidades de deslizamientos, de acuerdo a WP/WLI,1993.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara Ayala, I., 2000 Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones geográficas*, (41), 7-25.
- Alcántara-Ayala, I., y Murillo García, F. G., 2008. Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones geográficas*, (66), 47-64.
- Agliardi, F., Crosta, G., & Zanchi, A., 2001. Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology*, 59(1-2), 83-102.
- Agliardi, F., Crosta, G. B., & Frattini, P., 2009. Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1059-1073.
- Agliardi, F., Crosta, G.B., Frattini, P., 2012. Slow rock-slope deformation, en: Clague, J. J. & Stead D. (Eds) *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling*. Cambridge University Press, Cambridge, 207– 221 pp.
- Ahmad-Fuad, N., Yusoff, A. R., Ismail, Z., & Majid, Z., 2018. Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W9), 11–21.
- Althuwaynee, OF y Pradhan, B, 2018. Deslizamientos de tierra: causas, mapeo y monitoreo: ejemplos de Malasia. *Riesgos naturales*, 363-396.
- Ambrosi, C., & Crosta, G. B., 2006. Large sackung along major tectonic features in the Central Italian Alps. *Engineering geology*, 83(1-3), 183-200.
- Arce, J.L., Macías, J.L., Rangel, E., Layer, P., Garduño-Monroy, V.H., Saucedo, R., García, F., Castro, R., Pérez-Esquivias, H., 2012. Late Pleistocene rhyolitic explosive volcanism at Los Azufres Volcanic Field, central Mexico, en: *The Southern Cordillera and Beyond*. Geological

Society of America, pp. 45–82. [https://doi.org/10.1130/2012.0025\(04\)](https://doi.org/10.1130/2012.0025(04))

- Audemard, F., Beck, C., & Carrillo, E., 2011. Deformaciones Gravitatorias Profundas en Laderas a lo Largo de la Falla Activa de Boconó en el Sector Central de Los Andes de Mérida, Venezuela Occidental. *Tribuna del Investigador*, 12(2), 28-36.
- Barbarella, M., & Fiani, M., 2013. Monitoring of large landslides by Terrestrial Laser Scanning techniques: field data collection and processing. *European Journal of remote sensing*, 46(1), 126-151.
- Bisci, C., Dramis, F., & Sorriso-Valvo, M., 1996. Rock flow (sackung). Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen. ML (eds.), *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes: Gran Bretaña*, John Wiley and Sons, 150-160.
- Bird, J. F., & Bommer, J. J., 2004. Earthquake losses due to ground failure. *Engineering geology*, 75(2), 147-179.
- Blatter, D. L., Carmichael, I. S., Deino, A. L., & Renne, P. R., 2001. Neogene volcanism at the front of the central Mexican volcanic belt: basaltic andesites to dacites, with contemporaneous shoshonites and high-TiO₂ lava. *Geological Society of America Bulletin*, 113(10), 1324-1342.
- Cao, J., Zhang, Z., Wang, C., Liu, J. y Zhang, L., 2019. Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos de tierra provocados por terremotos en la meseta occidental de Sichuan. *Catena*, 175, 63-76.
- Carías, A., Rodríguez, M., Castellanos, Y., Sosa, Y., & Nonori, M., 2019. Análisis de visibilidad satelital y tiempo de viaje en cada centro regional de la red geodésica activa de la UNAH en el año 2018. *Ciencias Espaciales*, 12 (1), 17-27.
- Campa, M. F., & Coney, P. J., 1983. Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040-1051.
- Capra, L., Macías, J. L., & Garduño, V. H., 1997. The Zitácuaro Volcanic Complex, Michoacán, México: magmatic and eruptive history of a resurgent caldera. *Geofísica Internacional*, 36(3), 0
- Centeno García, E., Corona Chávez, P., Talavera Mendoza, O., & Iriondo, A., 2003. Geology and

tectonic evolution of the western Guerrero terrane a transect from Puerto Vallarta to Zihuatanejo, Mexico.

Centeno-García, E., 2008. The Guerrero composite terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone. *SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, 436, 279.

Chacón, F. F., Notti, D., Galve, J. P., Pérez, J. V., Azañón, J. M., Mateos, R. M., ... & Gómez-López, J. M., 2015. Técnicas remotas para el análisis multiescala y multitemporal de fenómenos superficiales. In *Una visión global del Cuaternario: el hombre como condicionante de procesos geológicos* (pp. 231-234). JP Galve.

Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M., & Chen, Y., 2018. Registration of laser scanning point clouds: A review. *Sensors*, 18(5), 1641.

CloudCompare. 2015. Cloud-to-Cloud Distance. Agosto 5, 2021, de CloudCompare Sitio web: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Cloud-to-Cloud_Distance

CONAGUA, 2001. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

CONAGUA, 2002. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

CONAGUA, 2003. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

CONAGUA, 2004. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

temperaturas-y-lluvias

CONAGUA, 2005. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

CONAGUA, 2006. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

CONAGUA, 2007. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

CONAGUA, 2008. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

CONAGUA, 2009. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

CONAGUA, 2010. Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

CONAGUA, 2014. Atlas del agua en México. México: Biblioteca Mexicana del Conocimiento. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

- CONAGUA., 2015. Atlas de Agua en México. Julio 28, 2021, de Comisión Nacional del Agua. Sitio web:<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>
- Corona-Chávez, P., Salgado-Soto, Z., Menella, L., Garduño, V.H., 2000. Carta geológico-minera AngangueoE14-A26. Secretaría de Economía, Servicio Geológico Mexicano.
- Crippa, C., Valbuzzi, E., Frattini, P., Crosta, G. B., Spreafico, M. C., & Agliardi, F., 2021. Semi-automated regional classification of the style of activity of slow rock-slope deformations using PS InSAR and SqueeSAR velocity data. *Landslides*, 1-19.
- Crosta, G. B., Frattini, P., & Agliardi, F., 2013. Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*, 605, 13-33.
- Comisión Estatal de Agua Jalisco, 2021. Regiones Hidrológicas de México. julio 25, 2021, de CEA Sitio web: https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/cuencas_jalisco/
- De la Luz, R., 2011. Análisis y definición de tipos de deslizamientos y sus zonas de susceptibilidad en la microcuenca el ventilador, Angangueo, Michoacán, México. Tesis doctoral.
- Del Cote, S., & Falorni, G., 2019. InSAR Monitoring of Subsidence Induced by Underground Mining Operations. RETC2019, Chicago, IL USA.
- Díaz, H. P., Jiménez, J. J. C., & Lancheros, E. O. G., 2014. Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, 18(41), 134-153.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen M. L., 1996, *Landslide recognition, identification, movement and causes*, Chinchester, U.K., John Wiley & Sons, 274 pp.
- Dramis, F., & Sorriso-Valvo, M., 1994. Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides and tectonics. *Engineering Geology*, 38(3-4), 231-243.
- Earthgonomic México A.C., 2017, Tipos de riego. Recuperado: noviembre 30, 2022, de Earthgonomic, Sitio web: <http://earthgonomic.com/noticias/tipos-de-riego/>
- EPOCH (European Community Programme), 1993. Temporal occurrence and forecasting of

- landslides In the European Communiy: Flageollet, J. C. (ed.), 3 volumes, Contract no 90 0025.
- Esteva, L., 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985—Consequences, lessons, and impact on research and practice. *Earthquake Spectra*, 4(3), 413-426.
- Expansión, 2010. La lluvia se ensaña con el Distrito Federal, Michoacán y Estado de México. Recuperado: junio 20, 2021, de Periódico expansión. Sitio web: <https://expansion.mx/nacional/2010/02/04/la-lluvia-se-ensana-con-el-distrito-federal-michoacan-y-estado-de-mexico>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics* 522–523, 122–149.
- Figuroa-Miranda, S., 2013. Estudio del peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas mediante simulación numérica en FLO-2D, caso de estudio: Angangueo, Mich.
- Fratini, P., Crosta, G. B., & Allievi, J., 2013. Damage to buildings in large slope rock instabilities monitored with the PSInSAR™ technique. *Remote sensing*, 5(10), 4753-4773.
- García-Davalillo, J. C., Herrera, G., Notti, D., Hernández-Ruiz, M., Fernández-Merodo, J. A., Álvarez-Fernández, I., ... & Mora, O., 2013. InSAR Data for Mapping and Monitoring Landslides in Tena Valley. In *Landslide Science and Practice* (pp. 243-249). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M., & Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la faja volcánica transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 227-283.
- Hernández-Bernal, M. D. S., Corona-Chávez, P., Solís-Pichardo, G., Schaaf, P., Solé-Viñas, J., & Molina, J. F., 2016. Miocene andesitic lavas of Sierra de Angangueo: a petrological, geochemical, and geochronological approach to arc magmatism in Central Mexico. *International Geology Review*, 58(5), 603-625.
- Hernández-Madrigal y Garduño-Monroy, 2012. Peligro por deslizamiento en la comunidad de las Pilas, Mpio. De Zitácuaro, Mich. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, informe técnico, 26 pp.

- Huang, R., Jiang, L., Shen, X., Dong, Z., Zhou, Q., Yang, B., & Wang, H., 2019. An efficient method of monitoring slow-moving landslides with long-range terrestrial laser scanning: a case study of the Dashu landslide in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Landslides*, 16(4), 839-855.
- Hubp, J., 1988. *Elementos de geomorfología aplicada*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hubp, J. L., 1990. El relieve de la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 9 (1), 82.
- Hubp, J., & Córdova, C., 1992. Regionalización geomorfológica de la República Mexicana. *Investigaciones geográficas*, (25), 25-63.
- Hutchinson, J. N., 1968. "Mass movement": In Fairbridge, R. W. (ed.), *Encyclopedia of Earth Sciences*, Reinhold, New York, 688-695 pp.
- Hutchinson, J. N., 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology: In Proc., Fifth international symposium on landslides, 1988. Lausanne, AA.
- Hungr, O., Leroueil, S., y Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- INEGI, 2001. *Diccionario de datos fisiográficos*. (Vectorial). Esc. 1:1 000 000. Sistema Nacional de Información Geográfica
- INEGI, 2009d. *Jungapeo, Michoacán de Ocampo Clave geoestadística 16047*. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos 9.
- INEGI, 2009f. *Tuxpan, Michoacán de Ocampo Clave geoestadística 16098*. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos 9.
- INEGI, 2009. *Zitácuaro, Michoacán de Ocampo Clave geoestadística 16098*. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos 9.
- INEGI, 2013. *Conjuntos de datos vectoriales edafológicos, escala 1:250 000 serie II (Continuo Nacional)*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

- INEGI, 2013. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo, escala 1:250 000 serie V. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Israde-Alcántara, I., & Martínez, L., 1986. Contribución al estudio geológico de la transición Pacífico-Tethys en el área de Zitácuaro, Michoacán (Doctoral dissertation, BS Thesis, Instituto Politecnico Nacional, Mexico City, Mexico).
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO. Roma. 2007.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, MH, Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A., 2012. Uso de LIDAR en investigaciones de deslizamientos de tierra: una revisión. Peligros naturales, 61, 5-28.
- Jafari B.M., 2016. Deflection Measurement Through 3D Point Cloud Analysis. Thesis. Master of Science Civil and Infrastructure Engineering. George Mason University. 2016.
- Jibson, R. W., Harp, E. L., Schulz, W., & Keefer, D. K., 2004. Landslides triggered by the 2002 Denali Fault, Alaska, earthquake and the inferred nature of the strong shaking. Earthquake spectra, 20(3), 669-691.
- Jomard, H., Lebourg, T., & Guglielmi, Y., 2014. Morphological analysis of deep-seated gravitational slope deformation (DSGSD) in the western part of the Argentera massif. A morpho-tectonic control?. Landslides, 11(1), 107-117.
- Keefer, D. K., Wartman, J., Ochoa, C. N., Rodriguez-Marek, A., & Wieczorek, G. F., 2006. Landslides caused by the M 7.6 Tecomán, Mexico earthquake of January 21, 2003. Engineering Geology, 86(2-3), 183-197.
- Lin, ML, Chen, TW, Lin, CW, Ho, DJ, Cheng, KP, Yin, HY y Chen, MC, 2013. Detección de deslizamientos de tierra a gran escala utilizando datos LiDar y fotografías aéreas en el área de Namasha-Liuogwey, Taiwán. Teledetección, 6 (1), 42-63.
- López-Martínez, M. R., & Mendoza, C., 2018. Caracterización de asperezas de sismos recientes en la zona de subducción de Michoacán-Colima-Jalisco, México. Geofísica internacional, 57(4), 289-306.

- Martínez- Marín, M. A., 2016. Apuntes sobre mi pueblo Jungapeo. Sitio web: https://issuu.com/mijungapeo/docs/apuntes_sobre_jungapeo_16_oct-2016 (accedido el 1.1.17)
- Medina, J. A., 2014. Monitoreo mediante GPS y caracterización geomorfológica de un deslizamiento en la ciudad de Tuxpan, Michoacán. Tacámbaro, Michoacán, Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, tesis licenciatura, 82 pp.
- Mencl, V., 1968. Plastizitätslehre und das wirklike Verhalten von Gebirgsmassen. Felsmech. Ing.-Geol. (Suppl.) IV, 1–8 pdf
- Montiel, J.E., Librad, J., Salazar, J., Sánchez, E. & Bustamante, J., 1997. Informe final de la carta Geológico-Minera y geoquímica hoja Morelia E14-1 escala 1:250 000 Estado de Michoacán. Pachuca, Hidalgo: Consejo de Recursos Mineros.
- Naciones Unidas, s.f. Data Application of the Month: Land Deformation Mapping Using DInSAR. Recuperado: junio 20, 2021. Sitio Web: <https://www.un-spider.org/links-and-resources/data-sources/daotm-land-deformation>
- Nava, A., 2011. Terremotos. Fondo de cultura económica.
- Oguchi, T., Yuichi, S. H., & Wasklewicz, T., 2011. Data sources. *Developments in Earth Surface Processes*, 15, 189-224.
- Panek, T. y Klimeš, J., 2016. Comportamiento temporal de deformaciones de pendientes gravitacionales profundas: una revisión. *Earth-Science Reviews*, 156 , 14-38.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., & Verón, S. R., 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*, 15(87), 14-23.
- Pasquarè, G., Ferrari, L., Covelli, P., & De Agostini, G., 1991. Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico. Geological Society of America.
- Prokop, A., & Panholzer, H., 2009. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6), 1921-1928.

- Rakotosaona, M. J., La Barbera, V., Guerrero, P., Mitra, N. J., & Ovsjanikov, M., 2020. Pointcleannet: Learning to denoise and remove outliers from dense point clouds. In Computer Graphics Forum (Vol. 39, No. 1, pp. 185-203).
- Rastrero-Seijas, J. F., 2014. Metodología de implantación y mantenimiento de una red geodésica local.
- RIEGL Laser Measurement Systems, 2011. V-Line Technology for Mining Applications: Long Range Terrestrial Laser Scanner RIEGL VZ-1000. Agosto 4, 2021, de RIEGL Sitio Web: <http://www.riegl.com/media-events/newsletter-archiv/0710-riegl-vz-1000/>
- RIEGL Laser Measurement Systems, 2017., 3D Terrestrial Laser Scanner with Online Waveform Processing: Horn, Austria. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, pp 4.
- Riego, 2022, Sistema de riego por goteo y sus beneficios. Recuperado: noviembre 30, 2022, de Riego, Sitio Web: <https://riego.com/blog/que-es-un-sistema-de-riego-por-goteo-y-sus-beneficios/>
- Ripoll, J. A. G., 2003. Instrumentación para el control de movimientos de ladera: sistema GPS y otros. Operatividad de la instrumentacion en aguas Subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos. IGME, Madrid.
- Sánchez, A. J., & Farreras, S. F., 1993. Estudio de tsunamis en la costa occidental de México. World Data Center for solid Earth Geophysics, Publication SE-50, NOAA. Boulder, Colorado, USA.
- Santana, M., De Bruyne, M., Poelman, R., Hankar, M., Barnes, S., Heine, E., Lerma, J.L., 2008. Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas. 3DRiskMapping, Versión 5, pp 254.
- Sarychikhina, O., Palacios, D. G., Argote, L. A. D., & Ortega, A. G., 2021. Application of satellite SAR interferometry for the detection and monitoring of landslides along the Tijuana-Ensenada Scenic Highway, Baja California, Mexico. Journal of South American Earth Sciences, 107, 103030.
- Secretaria de Gobernación, 2010., Declaratoria de desastre natural por la ocurrencia de lluvia severa los días 4 y 5 de febrero de 2010, en 3 municipios del estado de Michoacán. Recuperado: junio

20, 2021, de SEGOB. Sitio Web:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5132861&fecha=25/02/2010#gsc.tab=0

SEMARNAT, 2012. Informe de la situación del medio ambiente de México, Capítulo 3: Suelos. De SEMARNAT. Recuperado: junio 30, 2021. Sitio web:
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf

SEMARNAT., 2018. Informe del medio ambiente. Julio 22, 2021, de Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Sitio web:
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap2.html#tema1>

Servicio Geológico Mexicano., 1998. Carta Geológico- Minera Morelia E14-1, escala 1:250 000.

Servicio Geológico Mexicano., 2017. Sismología de México. julio 28, 2020, de Servicio Geológico Mexicano Sitio web: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>

Servicio Sismológico Nacional, 2021. Catálogo de sismos. Universidad Nacional Autónoma de México, I. d. G., Servicio. México. Extraído de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>

Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V., & Papini, M., 2014. Remote sensing for landslide investigations: An overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sensing*, 6(10), 9600-9652.

Silva-Sáenz, P., & Soto-González, J. T., 2016. Pteridoflora del bosque de Juniperus del cerro El Molcajete, de la comunidad Palmitas, municipio de Tuxpan, Michoacán. *Ciencia Nicolaita*, (68), 24-44.

Soldati, M., 2013. Deep-seated Gravitational Slope Deformation: in Bobrowsky P.T. (Eds) *Encyclopedia of Natural Hazards. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht, 151–155 pp.

Syahmi, M. Z., Aziz, W. W., Zulkarnaini, M. A., Anuar, A., & Othman, Z., 2011. The movement detection on the landslide surface by using terrestrial laser scanning. In 2011 IEEE control and system Graduate Research colloquium (pp. 175-180). IEEE.

- Torres, B. A. Z., 2011. Monitoreo de movimientos de ladera en el sector de San Pedro de Vilcabamba mediante procedimientos GPS. *Maskana*, 2(2), 17-25.
- Travelletti, J., Oppikofer, T., Delacourt, C., Malet, JP y Jaboyedoff, M., 2008. Monitoreo de desplazamientos de deslizamientos de tierra durante un experimento de lluvia controlada utilizando un escaneo láser terrestre de largo alcance (TLS). *Archivos Internacionales de Fotogrametría y Percepción Remota*, 37, 485-490.
- TRE-ALTAMIRA. (s.f.). InSAR at a glance. julio 31, 2021, de TRE-ALTAMIRA Sitio web: <https://site.tre-altamira.com/insar/>
- Triada, 2000. Estudios y proyectos ejecutivos para corregir fallas geotecnicas en tres sitios de la red federal de carreteras, en los estados de Chiapas y Michoacán: “Falla Turundeo”. Informe técnico.
- United States Geological Survey (USGS), 2018. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). Recuperado: julio 30, 2021. Sitio web: <https://www.usgs.gov/centers/land-subsidence-in-california/science/interferometric-synthetic-aperture-radar-insar>
- Vargas, M., 2019. Peligrosidad por caída de rocas en la falla geológica activa de Pajacuarán, Michoacán: Michoacán, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 204 pp.
- Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes, in Schuster, R. L., Krizek, R. J.(eds.), *Landslides-Analysis and control*. National Research Council: Washington D. C., Transportation Research Board, special report, 176, 11-33.
- Villaseñor-Reyes, C. I., 2019. Deformaciones gravitacionales profundas de ladera en México: detección y caracterización del fenómeno a través de la técnica PSI (Persistent Scatterer Interferometry): San Luis Potosí, México, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, tesis doctoral, 160 pp.
- Villaseñor-Reyes, C.I., Dávila-Harris, P. & Delgado-Rodríguez, O., 2021. Multidisciplinary approach for the characterization of a deep-seated landslide in a semi-arid region (Cañón de Yerbabuena, San Luis Potosí, Mexico). *Landslides* 18, 367–381. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01497-1>

Wu, C., Cui, P., Li, Y., Ayala, IA, Huang, C. y Yi, SJ., 2018. Control de fallas sismogénicas y topografía en los patrones espaciales de los deslizamientos de tierra desencadenados por el terremoto de Jiuzhaigou de 2017. *Revista de Ciencias de la Montaña*, 15 (4), 793-807.

WP/WLI, 1993. Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslides Inventory.