



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

CARACTERIZACIÓN
DENDROGEOMORFOLÓGICA DEL
FLUJO COMPLEJO EN EL RÍO
RANCHO VERDE, RESERVA DE LA
BIOSFERA MARIPOSA MONARCA,
ESTADO DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

ERIC GARCÍA-CALDERÓN

DIRECTOR DE TESIS: DR. MANUEL EDUARDO MENDOZA-CANTÚ
CO-DIRECTORA DE TESIS: DRA. KARLA AURORA DE LA PEÑA-GUILLEN

MORELIA, MICHOACÁN

NOVIEMBRE, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 02** del **Comité Académico de la Licenciatura en Geociencias** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **23 de marzo de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Eric García Calderón** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **417066811**, con el trabajo titulado: **"Caracterización dendrogeomorfológica del flujo complejo en el Río Rancho Verde, Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, Estado de México"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Manuel Eduardo Mendoza Cantú** y como co-tutora la **Mtra. Karla Aurora De la Peña Guillén**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Gabriel Vázquez Castro
Vocal:	Dr. Antonio Pola Villaseñor
Secretario:	Dr. Manuel Eduardo Mendoza Cantú
Suplente:	Dr. Teodoro Carlón Allende
Suplente:	Dra. Diana Cinthia Soria Caballero

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 11 de enero de 2024.

DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

Reconocimientos

A la licenciatura en Geociencias de la Escuela Nacional de Estudios Superiores unidad Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al proyecto: Dendrogeomorfología: desarrollo e implementación de un esquema para cartografiar y evaluar peligros geomorfológicos en zonas montañosas intertropicales de México. Financiado por DGAPA-PAPIIT IN110222.

Al laboratorio de la Unidad de Petrofísica de la Escuela Nacional de Estudios Superiores unidad Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Laboratorio Universitario de Drones (LUD) del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y la Escuela Nacional de Estudios Superiores unidad Morelia.

Al laboratorio de cronología del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán.

A los miembros del jurado revisor:

- Dr. Gabriel Vázquez-Castro.
- Dr. Antonio Pola-Villaseñor.
- Dr. Manuel Eduardo Mendoza-Cantú.
- Dr. Teodoro Carlón-Allende.
- Dra. Diana Cinthia Soria-Caballero.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, ya que cada uno a su manera me apoyaron y motivaron a continuar por más que me sentí derrotado muchas veces.

Agradecimientos institucionales

A la Dra. Karla Aurora De la Peña-Guillén quien me apoyó y orientó enormemente. Incluso antes de formalmente ser mi co-tutora.

Al Dr. Manuel Eduardo Mendoza-Cantú por su apoyo y guía durante todo el proceso.

Al Dr. Teodoro Carlón-Allende por su invaluable participación en el trabajo de campo, por el material para lijado, equipo de laboratorio y orientación en los procesos llevados relacionados a las técnicas dendrocronológicas.

Al Dr. Antonio Pola-Villaseñor por su disponibilidad y apoyo brindado en los procesos relacionados a granulometría.

A la Dra. Diana Cinthia Soria-Caballero por el apoyo brindado en las dudas respecto a la interpretación estructural de la zona.

A la Mtra. Paz Del Carmen Coba-Pérez, por el apoyo en todo el proceso relacionado a los vuelos de dron y generación del Modelo Digital de Superficies.

Agradecimientos personales

A la población de la comunidad de Canoas por su cooperación, especialmente al Sr. Juan Manuel De Jesús por su gran desempeño como guía en la zona.

A las grandes amistades que siempre me apoyaron y motivaron a continuar, especialmente a Karla Azucena García-Jiménez, María Guadalupe Mateos-López, Mariana Michel Flores-Monroy y Concepción Viridiana Galeote-Núñez.

Al Dr. Sinhué Amos Refugio Haro-Corzo por haber ido más allá de sus deberes como profesor al darme apoyo, aumentar mi interés en la ciencia y siempre animarme a mejorar en la vida.

Índice

Índice.....	I
Índice de figuras.....	III
Índice de tablas.....	XI
Índice de anexos.....	XII
Resumen.....	XIII
Abstract.....	XIV
Introducción.....	1
Justificación.....	4
Objetivos.....	4
General.....	4
Particulares.....	4
Capítulo 1 Antecedentes.....	5
Capítulo 2 Marco teórico y conceptos generales.....	9
2.1 Geología.....	9
2.2 Granulometría.....	10
2.3 Geomorfología.....	10
2.3.1 Procesos de Remoción en Masa.....	11
2.4 Dendrocronología.....	19
2.4.1 Fundamentos de la dendrocronología.....	19
2.5 Dendrogeomorfología.....	21
2.5.1 Disturbios o alteraciones macroscópicas.....	21
2.5.2 Disturbios o alteraciones microscópicas.....	22
Capítulo 3 Área de estudio.....	25
3.1 Geología.....	26
3.2 Hidrología.....	27
3.3 Clima, edafología y vegetación.....	27
Capítulo 4 Materiales y métodos.....	28
4.1 Programas de cómputo empleados.....	28
4.1.1 <i>Dips</i> versión 5.103.....	28

4.1.2 Measure J2X	29
4.1.3 COFECHA.....	29
4.2 Generación de modelo digital de superficie.....	30
4.3 Caracterización geológica	31
4.4 Caracterización geomorfológica	32
4.5 Caracterización de los bloques rodados y granulometría.....	36
4.6 Caracterización dendrogeomorfológica	41
4.6.1 Muestreo	41
4.6.2 Montado y preparación de muestras dendrocronológicas	43
4.6.3 Pre-fechado.....	44
4.7 Identificación de la frecuencia de altura de cicatrices	47
4.8 Caracterización de precipitación	48
Capítulo 5 Resultados	50
5.1 Caracterización geológica	50
5.2 Caracterización geomorfológica	57
5.3 Caracterización de los bloques rodados y granulometría.....	77
5.4 Caracterización dendrogeomorfológica	89
5.5 Identificación de la frecuencia de altura de cicatrices	91
5.6 Caracterización de precipitación	93
Capítulo 6 Discusión	94
Capítulo 7 Conclusiones	97
Referencias	98
Anexos	110

Índice de figuras

Figura 1. Partes características de a) Una ladera y b) Una ladera afectada por un PRM. Dónde: 1) corona, 2) superficie original del terreno, 3) hombro, 4) pie de la ladera, 5) pie de la superficie de falla, 6) escarpe principal de falla, 7) superficie de falla, 8) cuerpo principal, 9) flanco, 10) zona de acumulación, 11) plataforma, 12) punta o uña. Tomado de Mendoza y Domínguez (2004).	12
Figura 2. Esquema representativo de una caída de rocas. Tomado de Novotný (2013).	13
Figura 3. Esquema representativo de un derrumbe. Tomado de Novotný (2013).	14
Figura 4. Esquema representativo de un deslizamiento rotacional. Tomado de Novotný (2013).	14
Figura 5. Esquema representativo de un deslizamiento traslacional. Modificado de Novotný (2013).	15
Figura 6. Esquema representativo de un deslizamiento de bloque. Modificado de Novotný (2013).	15
Figura 7. Esquema representativo de una extensión lateral. Modificado de Novotný (2013).	16
Figura 8. Esquema representativo de un flujo de escombros. Tomado de Novotný (2013).	16
Figura 9. Esquema representativo de una avalancha de escombros. Tomado de Novotný (2013).	17
Figura 10. Esquema representativo de un flujo de tierra. Modificado de Novotný (2013).	17
Figura 11. Esquema representativo de una ladera afectada por la reptación. Modificado de Novotný (2013).	18
Figura 12. Esquema representativo de un deslizamiento complejo en el que se observa un deslizamiento con escombros de una caída de rocas. Tomado de Novotný (2013).	18
Figura 13. Esquema de la madera temprana y tardía en anillos de crecimiento anual. Las flechas indican el ancho del anillo, madera tardía y temprana, respectivamente, la línea negra indica dónde termina e inicia un nuevo anillo y la	

línea punteada señala el límite entre madera temprana y tardía. Modificado de Figueroa-García (2020).	20
Figura 14. Tipologías de los principales disturbios macroscópicos individuales. 1 crecimientos en candelabro, 2 inclinaciones, 3 pérdida de copa, 4 cicatrices de impactos, 5 rozamiento por caídas de otros troncos, 6 pérdida de ramas, 7 erosiones, 8 troncos con codo, 9 estrechamientos bruscos, 10 bifurcaciones, 11 codos en ramas, 12 rebrotes desde troncos enterrados, 13 raíces descortezadas, 14 raíces flotantes sin contacto con el sustrato, 15 nuevas raíces desde tronco enterrado. Modificado de Díez-Herrero et al. (2007).	22
Figura 15. Ejemplo de un árbol que generó madera de reacción para mantener la verticalidad. a) Se aprecia macroscópicamente al árbol; b) Se observa el aumento en el ancho de los anillos al formarse madera de reacción; c) Grafica de la evolución del ancho del anillo en la zona cargada (línea negra) y la zona no cargada (línea gris) como consecuencia de un evento que tumbó el árbol. Modificado de Ballesteros et al. (2010).	23
Figura 16. Sección transversal que muestra cómo varía el crecimiento de los anillos anuales en una raíz luego de ser expuesta. a) Se observa el cambio durante 4 años que se mantuvo parcialmente desenterrada la raíz; b) Se observa el cambio durante 15 años que se mantuvo parcialmente desenterrada la raíz. Modificado de Ballesteros-Cánovas et al. (2012).	24
Figura 17. Ejemplificación de la reacción de un árbol por un daño mecánico. a) Se observa heridas en el tronco; b) Se aprecia una sección de la herida donde se ha cubierto parcialmente la herida; c) Se muestra, mediante un corte anatómico, la formación de tejido calloso; d) La formación de canales resiníferos traumáticos. Modificada de Ballesteros et al. (2010).	25
Figura 18. Ubicación de la zona de estudio dentro de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. En la imagen inferior izquierda se ve el territorio de México, las líneas negras que llevan a la imagen inferior derecha indican el acercamiento a la RBMM que está representada con las líneas grises diagonales, las líneas negras que llevan a la imagen superior señalan el acercamiento al Río Rancho Verde y con la línea roja se delimita la zona de estudio, que se encuentra principalmente dentro de la RBMM.	26

Figura 19. Zona de estudio delimitada mediante el ortomosaico generado por los vuelos de dron.....	31
Figura 20. Delimitación preliminar de unidades geomorfológicas con base a la literatura consultada.....	34
Figura 21. Delimitación de unidades geomorfológicas con base a los datos tomados en el trabajo de campo.....	35
Figura 22. Esquema de la jerarquía de órdenes de ríos de Strahler (1957) en el cual los ríos del mismo orden al encontrarse unir sus cauces aumentan de orden.	36
Figura 23. Distribución geográfica de las zonas donde se tomaron las mediciones de los bloques de roca rodados y las muestras tomadas para tamizado.	36
Figura 24. Proceso de tamizado de una muestra. a) Muestra homogeneizada y con los extremos faltantes por el método de cuarteo; b) Tamices montados siendo agitados para separar las partículas por su tamaño mediante las mallas de los tamices; c) Pesado de las partículas retenidas en cada tamiz.....	39
Figura 25. Toma de muestras. a) Toma de muestra con motosierra; b) Toma de muestra con el taladro <i>Pressler</i>	42
Figura 26. Distribución espacial de los árboles muestreados en la zona de estudio.	43
Figura 27. Técnica de montaje de las muestras. Se aprecia la base de madera sobre la cual se colocan y se asegura su adhesión mediante el uso de pegamento y cinta.....	44
Figura 28. Proceso del preparado de las muestras. a) Montado de los núcleos en las bases de madera; b) Lijado de una cuña usando una lija del número 80; c) Lijado de una cuña usando una lija del número 320; d) Lijado de un núcleo usando una lija del número 320.	44
Figura 29. Muestra tipo cuña lijada, pulida y pre-fecha.....	45
Figura 30. Esquema de <i>skeleton plot</i> ejemplo en el que se observa cómo se registran los anillos más anchos y angostos de una muestra que abarca entre el año 1220 y 1280. Modificado de Nash (2002).....	46

Figura 31. Medición del ancho de los anillos de crecimiento en las muestras empleando un estereoscopio conectado a una platina deslizante (VELMEX) para su registro mediante el programa <i>MeasureJ2X</i>	47
Figura 32. Muestras de la geología en la zona de estudio. a) Andesita en la que se observan grandes cristales de plagioclasas en una matriz gris oscura con minerales solo visibles con microscopio; b) Cuarzo botroidal con coloración azul celeste que se puede encontrar rellenando las grietas de la andesita; c) Brecha andesítica con líticos sub redondeados de color café en una matriz rojiza; d) Cuarzo botroidal más presente en las grietas de la andesita.	51
Figura 33. Diagrama de alineación. Donde, la línea roja representa a la Fi1 en el perfil a-a', la línea azul claro a la Fi2 en el perfil a-a', la línea azul oscuro a la F1 en el perfil a-a', la línea amarilla a la Fi3 en el perfil a-a', la línea naranja a la Fi4 en el perfil a-a', la línea gris claro a la Fi5 en el perfil a-a', la línea gris oscuro a la Fi6 en el perfil a-a', la línea rosa a la Fi3 en el perfil e-e', la línea verde claro a la Fi3 en el perfil f-f', la línea verde oscuro a la Fi4 en el perfil i-i', la línea café a la Fi5 en el perfil m-m' y la línea morada a la Fi5 en el perfil n-n'. Modificado de Camargo (2011).	52
Figura 34. Mapa geológico de la zona de estudio, las edades de las unidades fueron basadas en lo descrito por Servicio Geológico Mexicano (2000) y Servicio Geológico Mexicano (2007).....	53
Figura 35. Fracturas rellenas en andesitas. a) Cuarzo botroidal; b) Cuarzo botroidal con una tonalidad azul; c) Finos de color crema-café con una costra oxidada con tonalidad	54
Figura 36. Distribución geográfica de las zonas donde se muestran los perfiles realizados.....	54
Figura 37. Comparación entre las fracturas reportadas por INEGI (1978) vs las fracturas encontradas en el presente trabajo.	55
Figura 38. Representación gráfica elaborada en Dips de los datos estructurales tomados de las fracturas presentes en el macizo rocoso de la Andesita de Anganguero en la zona de estudio. a) Se observan los datos ploteados como polos; b) Se refiere a la concentración de los polos; c) Concentración de polos con los	

planos de las fracturas inferidas y la fractura encontrada en la zona de estudio; d)	
Diagrama de rosa de los datos tomados en campo.	56
Figura 39. Mapa de las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio.....	58
Figura 40. Clasificación de los órdenes de Strahler de los cauces, desde su origen, que cruzan por la zona de estudio.	60
Figura 41. Perfil de la sección a-a´, la cual recorre la zona de estudio siguiendo de manera general el cauce del Río Rancho Verde, donde el color café representa andesita, naranja brecha andesítica, amarillo aluvión, la línea negra la fractura en la zona, las líneas negras punteadas corresponden a las fracturas inferidas en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los a contactos geológicos inferidos.	61
Figura 42. Fotografías de la zona de estudio, donde la línea negra señala los límites de la unidad geomorfológica. a) Delimitación del lóbulo de deslizamiento; b) Delimitación del deslizamiento superficial.	62
Figura 43. Perfil de la sección b-b´, donde el color café representa andesita, el color amarillo indica el aluvión, la línea morada representa la estimación del terreno previa al PRM y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.....	63
Figura 44. Perfil de la sección c-c´, donde el color café representa andesita, el color amarillo indica el aluvión, la línea morada representa la estimación del terreno previa al PRM y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.....	63
Figura 45. Perfil de la sección d-d´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.	64
Figura 46. Perfil de la sección e-e´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión, la línea negra punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los a contactos geológicos inferidos.....	65
Figura 47. Perfil de la sección f-f´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica aluvión, la línea negra	

punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los a contactos geológicos inferidos.....	66
Figura 48. Perfil de la sección g-g´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.	66
Figura 49. Depósito de un deslizamiento de ladera, presumiblemente, más antiguo que el PRM ocurrido en el 2010.....	68
Figura 50. Perfil de la sección h-h´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.	68
Figura 51. Perfil de la sección i-i´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión, la línea negra punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los a contactos geológicos inferidos.....	69
Figura 52. Perfil de la sección j-j´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.	69
Figura 53. Perfil de la sección k-k´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.	70
Figura 54. Perfil de la sección l-l´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo inidca el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.	71
Figura 55. Troncos de árboles juveniles con curvatura. a) Se observa un arqueamiento más pronunciado (en isleta); b) Se observa un ligero arqueamiento que afecta solo la base del tronco (en terraza de baja erosión).	72
Figura 56. Perfil de la sección m-m´, d donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión, la línea negra punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los a contactos geológicos inferidos.....	73
Figura 57. Perfil de la sección n-n´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión, la línea	

negra punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los a contactos geológicos inferidos.....	73
Figura 58. Perfil de la sección ñ-ñ´, donde el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.....	75
Figura 59. Perfil de la sección o-o´, donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.	76
Figura 60. Perfil de la sección p-p´, donde el color café representa andesita, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.....	76
Figura 61. Perfil de la sección q-q´, donde el color café representa andesita, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.....	77
Figura 62. Gráfica de las mediciones del tamaño de los bloques medidos en el trabajo de campo (Tabla 5). La línea azul representa las medidas promedio de los bloques de roca rodados, mientras que la línea naranja representa las medidas de los bloques de mayor tamaño.	80
Figura 63. Bloques rodados que fueron depositados por el PRM y que fueron medidos en distintos puntos de la zona de estudio. a) y b) en el punto BRM16; c) en BRM19; d) en BRM18.	80
Figura 64. Curvas granulométricas de las muestras, donde la línea azul indica la GRM1, la línea naranja indica la GRM2, la línea verde indica la GRM3, la línea amarilla indica la GRM4 y la línea roja indica la GRM5.....	88
Figura 65. Gráfica comparativa de la estimación de precipitación acumulada anual en la zona de estudio en los años que presentan disturbios los anillos de crecimiento de las muestras.....	90
Figura 66. Representación espacial de las alturas de cicatrices medidas, con respecto a las unidades geomorfológicas.	93
Figura 67. Gráfico de la estimación de la precipitación acumulada anual en la zona de estudio. Donde, la línea negra son los datos de la precipitación acumulada	

anual en la zona de estudio, la línea roja es la línea de tendencia, la amarilla es la media móvil cada 5 años y la azul tendencia polinómica cada 5 años..... 94

Índice de tablas

Tabla 1. Pesos mínimos de muestra por partícula de mayor tamaño (ASTM D422-63, 2007).	38
Tabla 2. Formato de campo para las muestras recolectadas de los árboles muestreados. Realizado por la Dra. Karla Aurora De la Peña-Guillen.	41
Tabla 3. Estaciones climáticas utilizadas y sus periodos de almacenamiento de datos.	49
Tabla 4. Tamaño de las unidades geomórficas en la zona de estudio y su porcentaje en superficie.	59
Tabla 5. Mediciones tomadas en la zona de estudio.....	79
Tabla 6. Distribución de granulometría de la muestra GRM1.....	83
Tabla 7. Distribución de granulometría de la muestra GRM2.....	84
Tabla 8. Distribución de granulometría de la muestra GRM3.....	85
Tabla 9. Distribución de granulometría de la muestra GRM4.....	86
Tabla 10. Distribución de granulometría de la muestra GRM5.....	87
Tabla 11. Datos obtenidos a partir de la gráfica de la Figura en la cual se incluye la clasificación de cada muestra basada en la SUCS del Anexo 6.	88
Tabla 12. Perturbaciones encontradas en los anillos de crecimiento de las muestras analizadas.	90
Tabla 13. Distribución en las unidades geomorfológicas de las muestras tomadas para dendrocronología.	91

Índice de anexos

Anexo 1. Diagrama de alineación. Tomado de Camargo (2011).....	110
Anexo 2. Formato base para llenado de tamizados	111
Anexo 3. Esquema base para trazar la curva granulométrica.....	112
Anexo 4. Hipervínculo al mapa geológico (Figura 34) en mayor resolución.....	112
Anexo 5. Hipervínculo al mapa geomorfológico (Figura 39) en mayor resolución.	112
Anexo 6. Clasificación SUCS, donde para suelos de grano grueso la G significa grava, S arena, W bien graduado, P mal graduado, M limoso y C arcilloso tomada de Das (2015).....	113

Resumen

Durante el año 2010 se generaron lluvias extremas en el centro-occidente del país, las condiciones de humedad desencadenaron una serie de Procesos de Remoción en Masa (PRM) en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), los cuales han sido analizados principalmente al suroeste de esta, mientras que al este los estudios han sido muy limitados, por lo que se consideró necesario estudiar más esta zona para tener un entendimiento integral de la dinámica de los PRM ocurridos en la RBMM.

El objetivo principal de este trabajo fue caracterizar las unidades geomorfológicas resultante del PRM en la cañada del Río Rancho Verde, así como determinar mediante técnicas dendrocronológicas el año de ocurrencia, y así responder las siguientes preguntas: ¿Cuáles son las características geomorfológicas del evento ocurrido en la zona de estudio? y ¿hay evidencias registradas de PRM previos al 2010 en los árboles de la zona de estudio?

Se generó un Modelo Digital de Superficies (MDS) con una resolución de 10 cm, a partir del procesamiento de los datos obtenidos con vuelos de dron. Posteriormente con este modelo se realizó una caracterización geomorfológica preliminar, la cual fue verificada y corregida mediante trabajo de campo, donde también se tomaron muestras de núcleos y cuñas de árboles. Además, se realizaron mediciones de los bloques rodados y de las alturas de cicatrices en árboles impactados por el PRM. Adicionalmente, se tomaron muestras de roca para realizar una caracterización de la geología en la zona. También, se tomaron muestras de los depósitos dejados por el flujo, estas muestras se tamizaron para su posterior clasificación de acuerdo con las normas del Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS).

En la zona se encontraron dos unidades geológicas (la andesita de Anganguero y brecha andesítica), en las cuales se encontró una fractura regional y se infirieron 6 más. Además, se interpretaron 17 unidades geomorfológicas, en la zona del PRM predominando las laderas medias erosivas, las terrazas de alta y baja erosión. Así mismo, se destaca que, en el área se encontraron depósitos de PRM previos, interpretando 7 posibles PRM. La tendencia en las mediciones de los bloques fue la esperada, es decir que los bloques rodados de mayor tamaño

estén en la zona superior y de menor tamaño en la zona inferior, a excepción de tres puntos de medición que se encontraron en la parte media de la zona de estudio. De igual manera, en las clasificaciones de las muestras tamizadas hubo dos muestras cuya clasificación están fuera de lo esperado, es decir se esperaba encontrar gravas en la zona superior de la zona de estudio y arenas o partículas finas en la zona inferior, encontrando una muestra clasificada como arena en la zona superior y una como grava en la zona inferior de la zona de estudio.

Mediante técnicas dendrocronológicas se fechó el PRM en el año 2010, no se encontraron evidencias de otros PRM en los anillos de crecimiento. El promedio de altura de las cicatrices en los árboles fue mayor en los depósitos de flujo lateral erosionado, teniendo casi un metro de diferencia con respecto a la terraza de alta erosión.

Se contribuye a la conclusión de que el PRM ocurrido en el año 2010, se trató de un proceso complejo, específicamente un flujo complejo (FC) que inició con un deslizamiento rotacional y dos deslizamientos traslacionales, cuyos materiales fueron saturados como consecuencia de las intensas precipitaciones provocadas por los eventos hidrometeorológicos de ese año. Además, este trabajo ofrece una base geológica y contribuye con más elementos a la geomorfología previamente analizada, con lo cual es posible generar estudios a futuro sobre evaluación de susceptibilidad y peligro a PRM en este sitio. Finalmente, resalta la necesidad de generar más cartografía geológica detallada en la RBMM.

Abstract

During 2010, extreme rains were generated in the central-western part of the country; the resulting humidity conditions triggered a series of Mass Removal Processes (PRM by its acronym in Spanish) in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (RBMM by its acronym in Spanish), which were analyzed to the southwest of it, while to the east the studies have been very limited, so it was considered necessary to study this area more to have a comprehensive understanding of the dynamics of the PRM in the RBMM.

The main objective of this work was to characterize the geomorphological units resulting from the PRM in the Rancho Verde River ravine, as well as to determine the year of occurrence using dendrochronological techniques, and thus answer the following questions: What are the geomorphological characteristics of the event that occurred in the study area? And is there recorded evidence of PRM prior to 2010 in the trees in the study area?

A detailed Digital Surface Model (MDS by its acronym in Spanish) was generated with a resolution of 10 cm, from the processing of data obtained with drone flights. Subsequently, with this model, a preliminary geomorphological characterization was carried out, which was verified and corrected through a field campaign, where samples of tree cores and wedges were also taken. In addition, measurements were made of the rolled blocks and the heights of scars on trees shocked by the PRM. Additionally, rock samples were taken to carry out a characterization of the geology in the area and the deposits left by the flow, These samples were sieved for subsequent classification according to the standards of the Unified Soil Classification System (SUCS by its acronym in Spanish).

In the area, two geological units were found (the Anganguero andesite and andesitic breccia), in which a regional fracture was found and 6 more were inferred. In addition, 17 geomorphological units were interpreted. In the area of PRM, erosive middle slopes, strongly eroded terraces and moderately eroded terraces predominated. Furthermore, it is highlighted that previous PRM deposits were found, interpreting 7 possible PRM. The trend in the measurements of the blocks was as expected, that is, the largest rolled blocks are in the upper area and the smaller ones in the lower area, with the exception of three measurement points that were found in the middle part of the study area. Similarly, in the classifications of the sieved samples there were two samples whose classification was outside of what was expected, that is, it was expected to find gravel in the upper area of the study area and sand or fine particles in the lower area, finding a sample classified as sand in the upper zone and one as gravel in the lower zone of the study area.

Using dendrochronological techniques, the PRM was dated to the year 2010, no evidence of other PRM was found in the growth rings. The average scar

height was greater in the eroded lateral flow deposit, having almost a meter difference with the high erosion terrace.

This study contributes to the conclusion that the PRM that occurred in 2010 was a complex movement, specifically a complex flow (FC by its acronym in Spanish) that began with a rotational landslide and two translational landslides, whose materials were saturated as a consequence of the intense precipitation caused by the hydrometeorological events of that year, detonating a debris flow (FD by its acronym in Spanish). Furthermore, this work offers a geological basis and contributes more elements to the previously analyzed geomorphology, making it possible to generate future studies on the evaluation of susceptibility and hazard to PRM in this site. Finally, it highlights the need to generate more detailed geological cartography in the RBMM.

Introducción

Los fenómenos naturales son manifestaciones de la naturaleza que pueden ser percibidas por instrumentos científicos de detección (Lavell et al., 2003). Los fenómenos se pueden dividir en ordinarios (de alta frecuencia) y los extraordinarios (de baja frecuencia), por ejemplo sismos de magnitud 2 son fenómenos ordinarios y los sismos de magnitud 8 son fenómenos extraordinarios. Los fenómenos extraordinarios pueden ser previsibles o imprevisibles dependiendo de los conocimientos disponibles sobre el mismo (Maskrey, 1993). Los peligros naturales son fenómenos que por su tipo y magnitud representan una amenaza o peligro en un espacio y tiempo para las personas, infraestructura o recursos (Lavell et al., 2003).

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) han sido estudiados desde hace varias décadas en Europa, Estados Unidos, y Canadá (Stewart y LaMarche, 1967, Alestalo, 1971). Los PRM son definidos como el movimiento de materiales rocosos, sedimentos, suelos y rellenos artificiales ladera abajo (Varnes, 1958). Estos fenómenos ocurren en la superficie terrestre en muchos lugares con distintas condiciones sociales, geológicas, geomorfológicas y climáticas; además, de manifestarse a distintas escalas (Alcántara-Ayala y Murillo-García, 2008). Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) son fenómenos que ocurren cuando se tiene la ruptura de la estabilidad del talud o ladera, detonados principalmente por: la precipitación, los sismos, la actividad volcánica y el deshielo (Mendoza y Domínguez, 2004; Cuanalo et al., 2006; Ocampo-Balleza, 2016).

La presente investigación se centra en el PRM ocurrido en el 2010 en la zona de estudio. Así mismo, se aborda el tema desde la dendrogeomorfología, la cual se encarga de analizar temporal y espacialmente procesos geomorfológicos (Miranda et al., 2007). Este análisis se basa en la relación entre los procesos geomorfológicos y los disturbios en los anillos de crecimiento de los árboles afectados (Ballesteros et al., 2010). El estudio de los anillos de crecimiento de los árboles permite ampliar los conocimientos sobre posibles periodos de retorno en PRM con potencial de pérdidas humanas y económicas; si estos datos dendrocronológicos se integran a registros históricos, pueden ser mejorados los

sistemas de prevención de desastres en zonas alto riesgo por una vulnerabilidad de la población, recursos o infraestructura (Stoffel y Bollschweiler, 2009)

Desde hace seis décadas se han usado técnicas dendrocronológicas en el estudio de estos PRM (LaMarche, 1963; Sifagos, 1964; Alestalo, 1971). En México, ha crecido el interés de aplicar estas técnicas en estudios debido a su eficiencia como método de fechamiento (Franco-Ramos et al., 2018). Sin embargo, estas han sido principalmente enfocadas a estudios climáticos (Villanueva-Díaz et al., 2004). La primera cronología de anillos de árboles realizada en México es de la década de los 40's (Schulman, 1944). Entre 2001 y 2016 en revistas indexadas se publicaron un total de 55 artículos de investigaciones dendrocronológicas en México, la mayoría siendo en bosques templados, principalmente en especies de pino y abeto (Acosta-Hernández et al., 2017).

En México se han estudiado procesos geomorfológicos en ambientes volcánicos, con base en métodos dendrogeomorfológicos. Por ejemplo, en la década pasada, se fecharon lahares en el volcán Popocatepetl (Bollschweiler et al., 2010), se ha analizado la frecuencia de caída de rocas en el volcán Iztaccíhuatl (Stoffel et al., 2011), se ha reconstruido la dinámica de lahares en el volcán de Colima (Franco-Ramos et al., 2013) y se ha evaluado el potencial de coníferas de bosque templado para estudios enfocados en las edades mínimas de relieve y de estabilización geomórfica (Franco-Ramos et al., 2017). De igual manera en la década actual, por ejemplo, se ha modelado un lahar mediante una combinación de modelos hídricos bidimensionales y evidencias dendrogeomorfológicas (Franco-Ramos et al., 2020) y más recientemente se ha realizado un análisis espacio temporal del PRM ocurrido en la RBMM en el que se utilizaron técnicas dendrocronológicas (De la Peña-Guillén, 2023)

Para la realización de un análisis dendrogeomorfológico a profundidad es necesario generar mapas geológicos y geomorfológicos, caracterizar las unidades geológicas, tomar y procesar muestras de núcleos de árboles, etc. (Figueroa-García, 2020; Pablo-Pablo et al., 2020).

El interés por realizar una investigación en la RBMM surgió a partir de observar, en las imágenes de satélite, las marcas dejadas en el paisaje por los

múltiples PRM ocurridos en el área. La zona suroeste de la RBMM ha sido estudiada en mayor medida, por lo que el interés se centró en la zona este, en particular la cañada del Río Rancho Verde por tener el PRM de mayor tamaño. La observación de las imágenes satelitales permitió generar la hipótesis de que se trataba de un FD de gran extensión. Las técnicas de percepción remota apoyaron la delimitación de la zona de estudio, donde se realizaría la cartografía geológica y geomorfológica. Este trabajo está orientado a la generación de información, es decir a identificar y caracterizar.

Por otra parte, el interés de implementar técnicas dendrocronológicas en este trabajo surgió para conocer a través de las evidencias dejadas en los árboles, si la zona ha sido afectada por PRM y en qué años ocurrieron. La caracterización geomorfológica y dendrocronológica se complementó con una caracterización granulométrica de los depósitos dejados por el PRM.

Durante los primeros capítulos se desarrollan los conceptos como la geomorfología, los PRM y su clasificación, la dendrocronología, dendrogeomorfología y las evidencias que se buscan en estos estudios, los programas de cómputo usados. También, se presenta una breve revisión de los trabajos que se han realizado en estos campos, partiendo de lo general hacia lo particular. Además, una caracterización de la zona de estudio; clima, suelos, geología, etc.

En el capítulo de la metodología se aborda la generación de la cartografía geomorfológica preliminar mediante productos obtenidos de técnicas de fotogrametría (MDS, mapa de sombras, ortomosaico, etc.), con el cual se planificaron las salidas a campo donde se tomaron muestras para la caracterización de la geología, datos estructurales para su representación de familias de fracturas, observaciones de campo para la corrección de la cartografía geomorfológica, la toma de muestras para tamizado y la medición de bloques rodados. Además, en este capítulo se aborda la caracterización de precipitación con base a los datos de cuatro estaciones cercanas a la zona de estudio. De la misma manera se explica la metodología para la toma de muestras para técnicas dendrocronológicas con motosierra y taladro *Pressler* y la medición de la altura de las cicatrices en árboles

En los capítulos 5, 6 y 7, respectivamente, se describen los resultados obtenidos y se discuten con los resultados de trabajos similares en otras partes del mundo. Además, se describe las conclusiones de la investigación.

Justificación

Debido a la importancia de la RBMM a nivel nacional e internacional y al hecho de que en las inmediaciones de la cañada del Río Rancho Verde se encuentran varios asentamientos de comunidades, se consideró importante realizar este estudio. Si bien existen estudios geomorfológicos a diferentes escalas, aun no se cuenta con cartografía detallada de la geología del sitio, representando una limitante importante para la comprensión integral de la dinámica de los PRM en el sitio. Por lo tanto la realización de este estudio contribuirá al conocimiento de la dinámica de los procesos geomorfológicos del sitio mediante la generación de cartografías geomorfológica y geológica detallada, que integre los factores litológicos, granulométricos y estructurales presentes en la zona. Así mismo, las técnicas dendrocronológicas que han sido empleadas como método de fechamiento durante las últimas décadas, han sido aplicadas principalmente en estudios climáticos en la RBMM, demostrado su viabilidad en especies locales (Carlón-Allende et al., 2016). No obstante, su implementación en procesos geomorfológicos ha sido escasa, por lo que se considera necesario emplearlas para generar información detallada y precisa para futuros trabajos de peligros y riesgos en la cañada del Río Rancho Verde de la RBMM.

Objetivos

General

Caracterizar espacialmente las unidades geomorfológicas de la cañada del Río Rancho Verde, con base a su origen, morfología y técnicas dendrogeomorfológicas.

Particulares

- Generar cartografía de la geología de la zona de estudio.

- Generar cartografía de las unidades geomorfológicas de la cañada del Río Rancho Verde.
- Caracterizar la distribución granulométrica de depósitos del PRM más reciente y los tamaños de los bloques rodados.
- Identificar si en los anillos de crecimiento de los árboles de la zona se tiene evidencia de múltiples PRM en la cañada del Río Rancho Verde.
- Asociar la frecuencia de altura de cicatrices en árboles dejadas por el PRM con las unidades geomorfológicas identificadas en la cañada del Río Rancho Verde.
- Caracterizar si en el año que ocurrió el PRM se pasaba por un ciclo seco o de mayor precipitación, mediante la precipitación acumulada anual.

Capítulo 1 Antecedentes

En México durante 1940-1950 se realizaron las primeras cronologías de anillos de árboles (Schulman, 1944; Scott, 1966). Estas cronologías llegaron a conclusiones de viabilidad de especies que serían refutadas en el futuro. Las primeras cronologías se realizaron con las especies *Abies Duranguensis* y *Pseudotsuga menziesii* en Durango, en estas cronologías mencionadas Schulman (1944) concluyó que el *Pseudotsuga menziesii* contenía anillos sensibles a las alteraciones. Además, los *Pinus echinata* fueron considerados pero debido a que en algunos sitios presentaban muchos anillos falsos significó una considerable dificultad en su datación, así como el *Abies religiosa* que concluyó que era de crecimiento demasiado rápido e insensible para ofrecer una confiabilidad en técnicas dendrocronológicas, el *Cupressus lusitánica* tenía un crecimiento errático por lo que no podría generar una cronología y el *Taxodium mucronatum* tenía serias irregularidades en sus cronologías. Scott (1966) realizó una cronología para el norte de México de 1,000 años mediante fechado de coníferas provenientes de ruinas prehistóricas de Casas Grandes, Chihuahua, indicando que con este resultado como base se podía empezar a realizar metodologías para obtener cronologías en la zona centro y sur del país, pero que su falta de conocimiento de

especies aptas para aplicar técnicas dendrocronológicas hacia estas zonas del país fueron un obstáculo a superar, junto con la necesidad en ese momento de contar con científicos mexicanos que llevarán a cabo dichos estudios.

Así mismo, de las primeras reconstrucciones climáticas con técnicas dendrocronológicas realizadas en México fueron estimaciones de precipitación y del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (Villanueva-Díaz y Mc Pherson, 1995;1996). En estas estimaciones Villanueva-Díaz y Mc Pherson (1995) compararon los Índices de Severidad de Sequía de Palmer empleando técnicas dendrocronológicas de los ejemplares muestreados en las Montañas Ánimas en Nuevo México y la Sierra Los Ajos en Sonora, encontrando que las diferencias eran muy significativas, atribuyendo estas diferencias principalmente a los usos de suelo que tuvieron a lo largo de la historia, por ejemplo, las políticas contra incendios tomadas por Estados Unidos luego de 1900 que impactaron en las poblaciones locales de pinos en la zona que estudiaron. Villanueva-Díaz y Mc Pherson (1996) mediante un análisis dendrocronológico en las Montañas Ánimas y en la Sierra Los Ajos confirmaron que simulaban adecuadamente la variabilidad de alta frecuencia para la precipitación como para el Índice de Severidad de Sequía de Palmer, encontrando en Montañas Ánimas tendencias decenales de la precipitación en los últimos 250 años, y que posteriores a los años 1900 se asociaron a los episodios del fenómeno El Niño, mientras que en la Sierra Los Ajos durante los últimos 155 años se encontraron episodios secos y húmedos.

En el año 2001, se impulsó la creación del Laboratorio Nacional de Dendrocronología del INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias), esto en la ciudad de Gómez Palacio, Durango. Y desde ese momento se han realizado importantes aportaciones científicas a la comprensión del clima, hidrología y el cambio climático en México mediante la interpretación de eventos históricos (Carlón-Allende et al., 2022).

En la RBMM se han realizado múltiples estudios en los que se han empleado estas técnicas de fechamiento, normalmente enfocadas a cuestiones climáticas. Por ejemplo, se realizó un análisis espacial del paisaje como base para muestreos de técnicas dendrocronológicas enfocadas a estudios climáticos, en el cual determinaron que el análisis de espacial de variables biofísicas del paisaje

mediante técnicas de percepción remota y herramientas de sistemas de información geográfica permite definir sitios con potencial adecuado para estudios dendrocronológicos (Carlón-Allende et al., 2015).

En los límites de la RBMM en los municipios de Áporo y Zitácuaro se realizó un análisis dendroclimático para establecer los parámetros climáticos que controlan el crecimiento radial de las especies *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana*. Concluyeron que la anchura de los anillos de ambas especies está regulada significativamente por la precipitación y la temperatura máxima media (Marlès-Magre et al., 2015). De igual manera en el municipio de Angangueo se identificaron eventos excepcionales (3 incendios, 2 PRM y 2 periodos de plaga) mediante el estudio de los anillos de crecimiento en árboles que fueron muestreados en los márgenes de los ríos Catingón y San Pedro (Garduño, 2014).

En la RBMM también se han estudiado las respuestas climáticas de las especies *Pinus pseudostrobus* y *Abies religiosa*, donde buscaron determinar su viabilidad para usos en estudios dendrocronológicos en la zona, con su estudio proporcionaron la primera evidencia de la influencia de variables climáticas en el crecimiento radial en dichas especies en la RBMM y la precipitación fue la variable climática más importante en la explicación del incremento radial anual (Carlón-Allende et al., 2016).

Desde las primeras cronologías realizadas en México se ha demostrado que algunas coníferas tienen potencial para estudios dendrocronológicos, pero sus aplicaciones en Ciencias de la Tierra han sido escasas (Franco-Ramos, 2014). Por ejemplo, se estudió el potencial de árboles de coníferas en estudios dendrogeomorfológicos en los volcanes del centro de México para determinar la viabilidad de las técnicas dendrocronológicas en la zona, concluyendo que estos métodos de fechamiento son viables en especies de amplia distribución, como *P. leiophylla*, *P. ayacahuite*, *A. religiosa*, *P. hartwegii*, y *J. monticola* (Franco-Ramos et al., 2018; Carlón-Allende et al., 2021). En el caso de *A. religiosa* y *P. hartwegii* se han determinado los índices de crecimiento de sus anillos en un sección sobre la Cinturón Volcánico Trans Mexicano (CVTM), empleando muestras tomadas en las montañas: Nevado de Toluca, Pico de Tancítaro, Nevado de Colima, Cerro Tláloc, La Malinche y Pico de Orizaba (Gómez-Guerrero et al., 2015). Estas

técnicas también han sido aplicadas en el sur de la Sierra Madre Oriental, específicamente en la Sierra Norte de Puebla, donde se realizaron análisis de flujos de escombros con técnicas dendrogeomorfológicas y cuyos resultados demostraron el potencial dendrocronológico de *Juniperus deppeana* (Pablo-Pablo et al., 2020).

En la RBMM se ha estudiado el cambio en la cobertura forestal, por ejemplo, entre 1971-1999 determinaron que el 44% del bosque conservado (bosque con >80% de cobertura) se degradó y la mayor porción de bosque de alta calidad se redujo de 27.11 ha a 5.83 ha (Brower et al., 2002) y entre 2003-2005 se presentó un cambio del 3.5% de su cubierta forestal y entre 2005-2006 hubo un cambio del 4.25% de su cubierta forestal (López-García, 2009).

En RBMM se ha estudiado el comportamiento físico-mecánico de las andesitas como factor de inestabilidad en pendientes, esto a raíz de una serie de PRM ocurridos en el año 2010. El estudio se determinó que la inestabilidad en las laderas de la región es causada por las pendientes y la degradación de las propiedades de las rocas al alterarse, lo cual se comprueba con los resultados obtenidos de las rocas frescas (porosidad total 0.262 mD, permeabilidad 172% y valor de resistencia 63.5 mPa) vs alteradas (porosidad total 393.71 mD, permeabilidad 60.9% y valor de resistencia 0.26 mPa) (Sánchez-Núñez et al., 2021).

Los eventos ocurridos en el año 2010 produjeron que se realizaran más estudios de PRM dentro la RBMM, los cuales se han centrado en la localidad de Angangueo, dadas las afectaciones socioeconómicas provocadas por un Flujo de Detritos (FD) que dejó como saldo un total de 16 muertos, daños considerables a las infraestructuras y a los medios de producción local, es decir, la agricultura y ganadería (Alcántara-Ayala et al., 2011). De igual manera, este evento del 2010 en la RBMM fue estudiado mediante un análisis espacio temporal mediante un enfoque dendrogeomorfológico y se determinó que este evento fue consecuencia de un evento extraordinario de precipitación que llegó a acumular 236 mm en un periodo de 5 días (De la Peña-Guillén, 2023).

Capítulo 2 Marco teórico y conceptos generales

2.1 Geología

De acuerdo con Tarbuck y Lutgens (2005), la geología es la ciencia que busca la comprensión del planeta tierra, para esto se divide en dos áreas: la física y la histórica. La geología histórica tiene como objetivo la comprensión del origen y evolución de la Tierra a lo largo del tiempo. Mientras que la geología física estudia los materiales que componen al planeta, así como los procesos que ocurren sobre y debajo de la superficie de la superficie terrestre.

Los materiales y procesos de nuestro planeta han sido estudiados desde hace siglos, temas como los fósiles, gemas, sismos y volcanes han sido descritos en textos desde hace más de 2,300 años por los griegos. Durante siglos estas explicaciones de los filósofos griegos sobre la naturaleza de la tierra se mantuvieron como las aceptadas (Tarbuck y Lutgens, 2005).

A mediados del siglo XVI, James Ussher publicó un trabajo en el cual elaboró una cronología de la historia de la tierra basándose en la biblia, determinando que la Tierra fue creada en el 4004 a.C. Con este trabajo inició la doctrina del catastrofismo que durante los siglos XVII y XVIII influyó en el entendimiento de la dinámica que tiene el planeta (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Fue durante finales del siglo XVII cuando la geología moderna se inició con la publicación del trabajo de James Hutton, *Theory of the Earth*, en su trabajo Hutton estableció el pilar de la geología actual, el principio del uniformismo, en el cual se establece que las leyes físicas, químicas y biológicas que actúan en la actualidad son las mismas leyes que actuaron en el pasado geológico (Tarbuck y Lutgens, 2005).

La geología se divide en múltiples especialidades como: la geotectónica, geofísica, cristalografía, mineralogía, petrología, paleontología, etc. Dentro de estas especialidades, la geología estructural es parte de la geotectónica que estudia las particularidades de la estructura y desarrollo de la corteza terrestre relacionadas con los procesos mecánicos, movimientos y deformaciones que ocurren en la corteza (Belousov, 1979).

2.2 Granulometría

La granulometría es la medición de los granos o partículas y el análisis de la presencia de los distintos tamaños de acuerdo con una escala granulométrica. Las propiedades granulométricas pueden ser usadas para descifrar la historia de los depósitos, principalmente el entorno, el proceso que llevó a que se depositaran, las condiciones hidrodinámicas, el mecanismo de transporte, y proporciona información sobre la procedencia del material transportado (Sarwar-Rais, 2019).

2.3 Geomorfología

La Geomorfología es el estudio de los paisajes y los procesos que las forman, permitiendo comprender por qué la superficie terrestre tiene el relieve actual, que incluye las formas y estructuras de todas las dimensiones, desde continentes y cuencas oceánicas a estrías y alveolos. Mediante estos estudios se comprende la historia y la dinámica existente en el relieve del planeta, siendo posible estimar posibles cambios futuros (Stoffel y Bollschweiler, 2009). La geomorfología es una ciencia geográfico-geológica y los principios de estas dos ciencias siempre están presentes en los estudios geomorfológicos (Lugo-Hubp, 1988).

Los conceptos básicos de la geomorfología se desarrollaron a principios del siglo XX (Lugo-Hubp, 1988), aunque ya existían documentos anteriores en los que ya se hacía referencias directas al relieve, los procesos que lo originan y las formas que lo constituyen. Los primeros textos geomorfológicos aparecen a finales del siglo XIX, fueron *Les Formes du Terrain* (De la Noë y Margerie, 1988) y el primer método de análisis geomorfológico fue publicado por William Morris Davis en 1973 (Pedraza-Gilsanz, 1996).

La geomorfología se basa en cinco objetivos fundamentales (Lugo-Hubp, 1988), los cuales son:

1. El conocimiento de la superficie terrestre ya sea en su totalidad o en porciones.
2. La clasificación del relieve por sus formas definidas considerando los procesos que las originaron, ya sean tectónicos, volcánicos, erosivos, etc.

3. La determinación de edades, absolutas o relativas, a las formas del relieve.
4. El estudio de la historia del desarrollo del relieve.
5. El conocimiento de los procesos que actualmente modifican la superficie terrestre, ya sean de origen endógenos o exógenos.

Hay múltiples procesos geomorfológicos, potencialmente peligrosos, pero los relevantes para este trabajo son los procesos de remoción en masa

2.3.1 Procesos de Remoción en Masa

En México existe una confusión relacionada con la terminología relacionada a los PRM, originada por las distintas maneras de traducir los términos a partir de la literatura en inglés, siendo así que términos como “procesos de ladera”, “movimientos de ladera”, “procesos gravitacionales” y “deslizamientos de tierra” se usen como sinónimos de PRM (Alcántara-Ayala, 2000). Podemos sumarle la amplia diversidad de términos y conceptos usados por distintos sectores como los académicos, Protección Civil, público en general y medios de comunicación (Mendoza y Domínguez, 2004).

Alcántara-Ayala (2000) propuso que el término *landslide* sea traducido como “movimiento de terreno”, indicando que al traducirlo como deslizamiento o movimiento de ladera genera confusión, llegando a impedir el uso correcto de los términos de cada proceso basado en el mecanismo de movimiento y material involucrado.

Un PRM puede ser descrito por las características geomorfológicas del material desplazado y del terreno alrededor del movimiento (Vargas-Cuervo, 2000). Mendoza y Domínguez (2004) recapitulan estas características geomorfológicas del terreno alrededor del movimiento (Figura 1a) y del material desplazado (Figura 1b). Las partes que integran un PRM son:

- Corona: material que no se desplazó luego del movimiento y es adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- Superficie original del terreno: superficie de la ladera antes de que ocurra el movimiento.
- Hombro: zona de transición entre la superficie de ladera y la corona.

- Pie de la ladera: parte más baja de la ladera.
- Pie de la superficie de falla: línea de intersección entre la parte inferior de la superficie de falla y la superficie original del terreno.
- Escarpe principal de falla: superficie abrupta contigua a la corona que resulta del movimiento de ladera pendiente abajo.
- Superficie de falla: zona donde la ladera pierde el equilibrio en sus materiales y por ello se deslizan ladera abajo por la acción de la gravedad.
- Cuerpo principal: material desplazado sobre la superficie de falla.
- Flanco: costado del material desplazado. Se indica derecho o izquierdo, al verse desde la corona.
- Zona de acumulación: área en la cual el material desplazado queda encima de la superficie original del terreno.
- Plataforma: parte superior del talud más allá de la corona.
- Punta o uña: la base del material desplazado más distante de la corona.

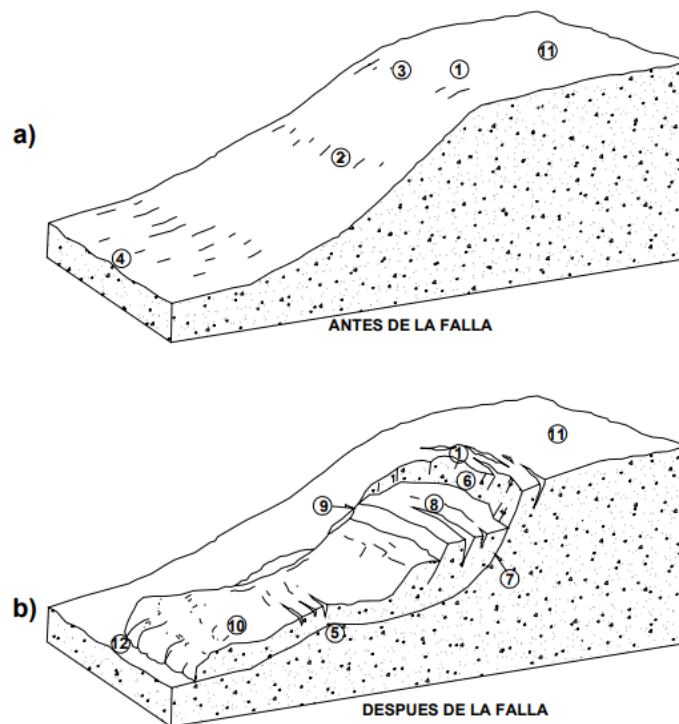


Figura 1. Partes características de a) Una ladera y b) Una ladera afectada por un PRM. Dónde: 1) corona, 2) superficie original del terreno, 3) hombro, 4) pie de la ladera, 5) pie de la superficie de falla, 6) escarpe principal de falla, 7) superficie de falla, 8) cuerpo principal, 9) flanco, 10) zona de acumulación, 11) plataforma, 12) punta o uña. Tomado de Mendoza y Domínguez (2004).

Se han propuesto varias clasificaciones para los PRM, pero la clasificación de Varnes es la más empleada actualmente (Varnes 1958; 1978; Novotný, 2013). Esta clasificación se basa en la descripción del material y el tipo de movimiento que realiza el material pendiente abajo.

Los materiales son: roca como una masa sólida *in situ*, suelo como partículas sólidas de rocas o minerales y líquidos en sus poros, escombros teniendo del 20 a 80% de material con tamaño mayor a 2 mm, tierra como un material con más del 80% de partículas menores a 2 mm, barro siendo el material con más del 80% de partículas menores a 0.06 mm (Varnes 1958; 1978).

Los cinco tipos de movimientos son: caída, derrumbe, deslizamiento, extensión y flujo. De manera más detallada se describen los principales eventos como:

1. Caídas: desprendimientos de material geológico en pendientes pronunciadas con discontinuidades (Figura 2).



Figura 2. Esquema representativo de una caída de rocas. Tomado de Novotný (2013).

2. Derrumbes: movimiento en que una o varias unidades rotan hacia adelante respecto a un punto de pivote (Figura 3).

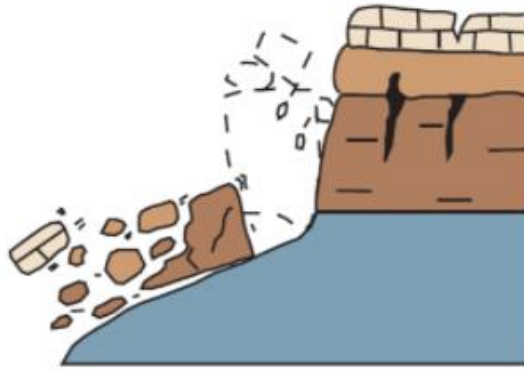


Figura 3. Esquema representativo de un derrumbe. Tomado de Novotný (2013).

3. Deslizamientos: movimiento masivo de un material que al desestabilizarse se separa del resto del talud estable. Estos se subdividen en:

1. Deslizamiento rotacional: deslizamiento con superficie de ruptura cóncava y con un eje de rotación paralelo al suelo de superficie y transversal a través del deslizamiento (Figura 4).

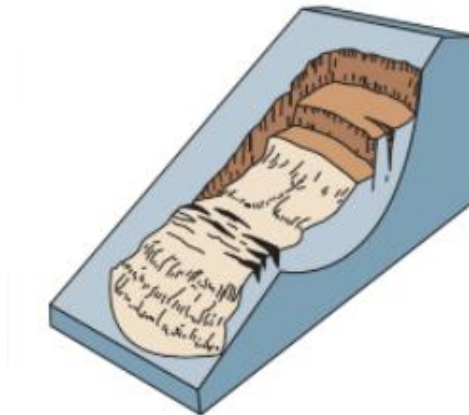


Figura 4. Esquema representativo de un deslizamiento rotacional. Tomado de Novotný (2013).

2. Deslizamiento traslacional: movimiento sobre una superficie aproximadamente plana con poca rotación (Figura 5). Este a su vez tiene otro subtipo:

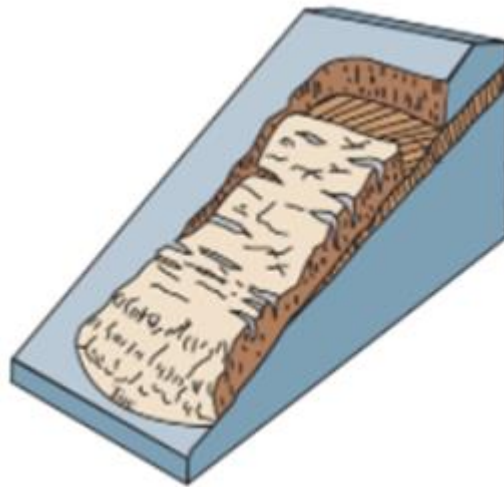


Figura 5. Esquema representativo de un deslizamiento traslacional. Modificado de Novotný (2013).

- Deslizamiento de bloque: movimiento de una sola unidad o pocas unidades que se mueven como una masa relativamente coherente (Figura 6).

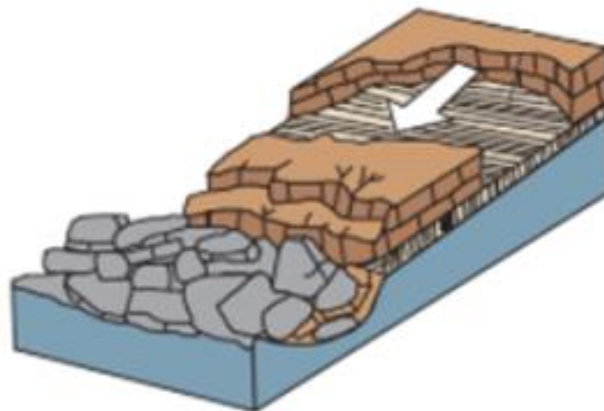


Figura 6. Esquema representativo de un deslizamiento de bloque. Modificado de Novotný (2013).

4. Extensiones laterales: movimientos en terrenos planos o de poca pendiente, presenta fracturas de cizalla provocadas por licuefacción (Figura 7).



Figura 7. Esquema representativo de una extensión lateral. Modificado de Novotný (2013).

5. Flujos: se subdividen en los siguientes cinco tipos:

1. Flujo de escombros: movimiento rápido pendiente abajo de roca, suelo suelto, materia orgánica, aire y agua, estos flujos tienen <50% de materiales finos. El detonante es una saturación en zonas de pendientes muy inclinadas. Sus depósitos se caracterizan por la presencia de abanicos de escombros (Figura 8).

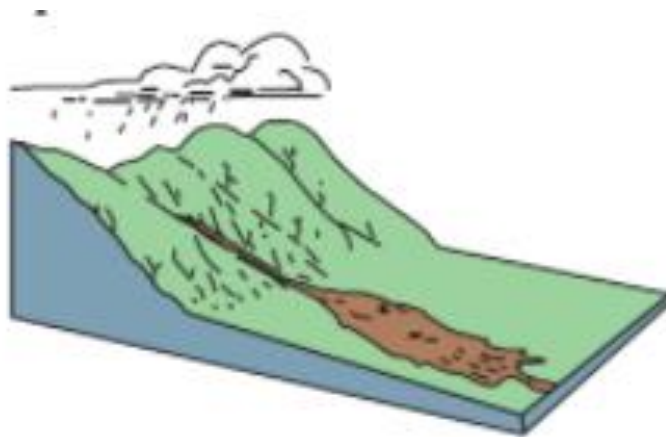


Figura 8. Esquema representativo de un flujo de escombros. Tomado de Novotný (2013).

2. Avalancha de escombros: variedad de flujo de escombros que es extremadamente rápido (Figura 9).



Figura 9. Esquema representativo de una avalancha de escombros. Tomado de Novotný (2013).

3. Flujo de tierra: flujo alargado con forma de “reloj de arena” generalmente ocurre en materiales finos o rocas que contienen arcilla en pendientes moderadas y que se encuentren saturadas (Figura 10). Sin embargo, los flujos secos granulares también son posibles.



Figura 10. Esquema representativo de un flujo de tierra. Modificado de Novotný (2013).

4. Flujo de lodo o detritos: flujo rápido de material húmedo compuesto por más del 50% de arena, limo y arcilla.

5. Reptación: movimiento pendiente abajo imperceptiblemente lento. Se caracteriza por tener árboles curvados, cercas, postes o muros inclinados y el terreno esta ligeramente ondulado (Figura 11).

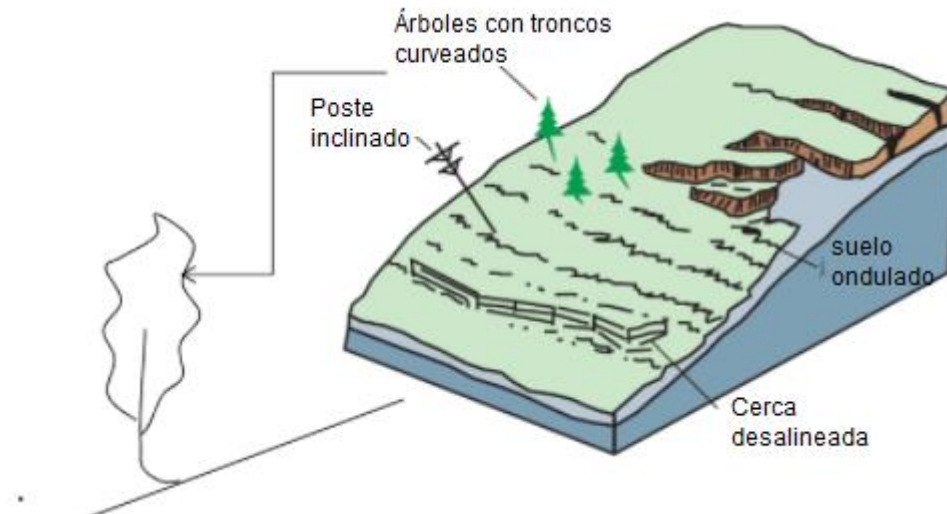


Figura 11. Esquema representativo de una ladera afectada por la reptación. Modificado de Novotný (2013).

6. Complejos: son la combinación de dos o más tipos de movimientos antes descritos (Figura 12).

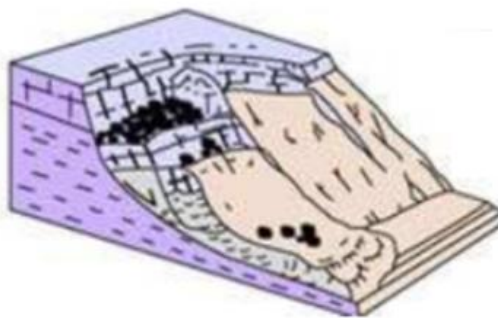


Figura 12. Esquema representativo de un deslizamiento complejo en el que se observa un deslizamiento con escombros de una caída de rocas. Tomado de Novotný (2013).

2.4 Dendrocronología

La dendrocronología es la ciencia que se encarga del estudio y datación de los anillos de los árboles (Fritts, 1976). Esto es posible debido a que la mayoría de los árboles que viven en zonas con climas templados y con estacionalidad bien definida, tienden a desarrollar anillos de crecimiento, cuya anchura es influenciada por factores ambientales y climáticos (Díez-Herrero, 2015).

El ancho del anillo de crecimiento del árbol es una fuente valiosa de información en estudios científicos. Desde la Grecia clásica (322 a.C.) se ha tenido la idea de que los árboles desarrollan anillos de crecimiento anuales (Carlón-Allende et al., 2022). Las primeras observaciones de carácter dendrocronológico se realizaron durante los siglos XV y XVI por Leonardo da Vinci (Ballesteros et al., 2008), pero es hasta 1937 cuando Andrew E. Douglas fundó el primer laboratorio de dendrocronología en la Universidad de Arizona. Douglas es considerado el padre de la dendrocronología ya que realizó importantes aportaciones que perduran hasta la actualidad; por ejemplo, el concepto del *crossdating* (fechado cruzado) (Carlón-Allende et al., 2022).

Es importante resaltar que cada campo de investigación que usa técnicas dendrocronológicas necesita una adecuada adquisición de datos dependiendo del objetivo del estudio (Bräker, 2002). Algunas de las áreas del conocimiento donde se han empleado las técnicas dendrocronológicas son: clima (Fritts, 1976), incendios forestales (Dieterich y Swetnam, 1984), actividad volcánica (Solomina et al., 2008; Carlón-Allende et al., 2022), PRM (De la Peña-Guillén, 2023), inundaciones (Díez-Herrero et al., 2007), entre otros.

2.4.1 Fundamentos de la dendrocronología

Todos los tejidos que contienen células capaces de dividirse y producir nuevas células forman los tejidos llamados meristemas. En las plantas leñosas que forman madera pueden crecer gracias al tejido meristemático, conocido como *cambium vascular*, se trata de una fina capa que une la corteza y la madera, estas células producidas en el *cambium vascular* realizan funciones imprescindibles en el metabolismo y crecimiento, como el transporte y sostén (Fritts, 1976; Ballesteros et al., 2010).

Durante los meses del año en que el cambium vascular está inactivo, suele tener de dos a cuatro capas de células de espesor con paredes claramente delineadas (Fritts, 1976). En primavera, las paredes se vuelven semitransparentes y más plásticas. Las células se extienden en dirección radial y en este momento, puede ocurrir un deslizamiento de la corteza y las células jóvenes se dañan fácilmente por una congelación severa u otras condiciones adversas. La lesión puede interrumpir el crecimiento, haciendo que algunas células permanezcan en un estado inmaduro y provocando que otras células se vuelvan anómalas, ya sea en tamaño o estructura. Estos cambios abruptos en la estructura se pueden utilizar para identificar el año y la estación en la que ocurrió el daño (Fritts, 1976).

Los anillos de crecimiento están conformados por dos bandas, una que tiene una coloración clara, que corresponde a la madera que se forma al inicio del periodo vegetativo denominada madera temprana, y la madera que se forma a la mitad y final del periodo vegetativo, al cual es de color oscuro y se le conoce como madera tardía (Díez-Herrero, 2015).



Figura 13. Esquema de la madera temprana y tardía en anillos de crecimiento anual. Las flechas indican el ancho del anillo, madera tardía y temprana, respectivamente, la línea negra indica dónde termina e inicia un nuevo anillo y la línea punteada señala el límite entre madera temprana y tardía. Modificado de Figueroa-García (2020).

En la dendrocronología las especies leñosas de mayor interés son aquellas especies que generan anillos de crecimiento con límites identificables, que se

formen uno cada año y con una actividad de *cambium* sensible a las oscilaciones de los factores reguladores del crecimiento (Ballesteros et al., 2010).

La dendrocronología tiene varios principios teóricos y conceptos básicos que condicionan y enmarcan las investigaciones dendrocronológicas los cuales son: principio de uniformismo, principio de factores limitantes, amplitud ecológica, selección de sitio, sensibilidad, *crossdating*, replicabilidad, estandarización y relación crecimiento-ambiente (Fritts,1976).

2.5 Dendrogeomorfología

La dendrogeomorfología se basa en el concepto de proceso-evento-respuesta, siendo el proceso algún suceso geomorfológico ocurrido en un tiempo y espacio determinado (por ejemplo erosión, caída de rocas o avalanchas), el evento es cuando se afecta al árbol, y produce un disturbio en el árbol como respuesta (Shroder, 1978).

Los primeros estudios dendrogeomorfológicos se realizaron en la década de 1960 (LaMarche, 1963; Sifagos, 1964). Sin embargo, fue hasta principios de los años 70's cuando Alestalo acuñó el término dendrogeomorfología (Alestalo, 1971). La dendrogeomorfología se ha aplicado a todos los procesos geomorfológicos y sus técnicas de extracción de información aplicadas a procesos de moderada intensidad y baja frecuencia pueden llegar a sustituir otras fuentes de información, cuando estas son escasas o no representativas (Ballesteros et al., 2010; Mendoza et al. en prensa).

2.5.1 Disturbios o alteraciones macroscópicas

En lo que respecta a disturbios o alteraciones reconocibles en anillos de crecimientos Díez-Herrero et al. (2007) indica que las alteraciones macroscópicas (Figura 14) son:

- Los ejemplares descortezados.
- Marcas de impacto.
- Crecimientos de ramas en candelabro.
- Pérdida de copa.
- Pérdida de ramas.

- Bifurcaciones.
- Inclinación en el tallo.
- Raíces expuestas.

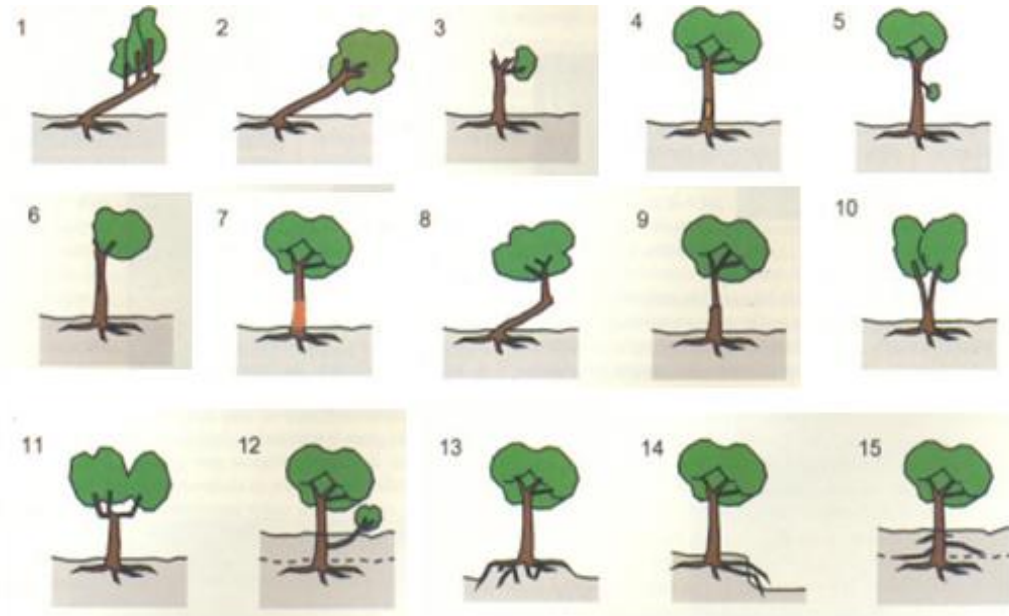


Figura 14. Tipologías de los principales disturbios macroscópicos individuales. 1 crecimientos en candelabro, 2 inclinaciones, 3 pérdida de copa, 4 cicatrices de impactos, 5 rozamiento por caídas de otros troncos, 6 perdida de ramas, 7 erosiones, 8 troncos con codo, 9 estrechamientos bruscos, 10 bifurcaciones, 11 codos en ramas, 12 rebrotes desde troncos enterrados, 13 raíces descortezadas, 14 raíces flotantes sin contacto con el sustrato, 15 nuevas raíces desde tronco enterrado. Modificado de Díez-Herrero et al. (2007).

2.5.2 Disturbios o alteraciones microscópicas

Los disturbios microscópicos son modificaciones anatómicas generadas por procesos geomorfológicos, Ballesteros et al. (2010) indican que se pueden agrupar en tres grandes grupos:

- Excentricidad y madera de reacción: regularmente la madera crece generando anillos concéntricos cuando el tronco esta vertical, esto debido a que la estructura es generada homogéneamente y todas las regiones soportan un peso y tensión similar. Sin embargo, cuando la inclinación cambia también lo hace la distribución del peso

y tensiones soportadas por cada región, provocando que la madera reaccione generando un mayor ancho de ciertas zonas en los anillos para soportar mecánicamente la inclinación (Figura 15).

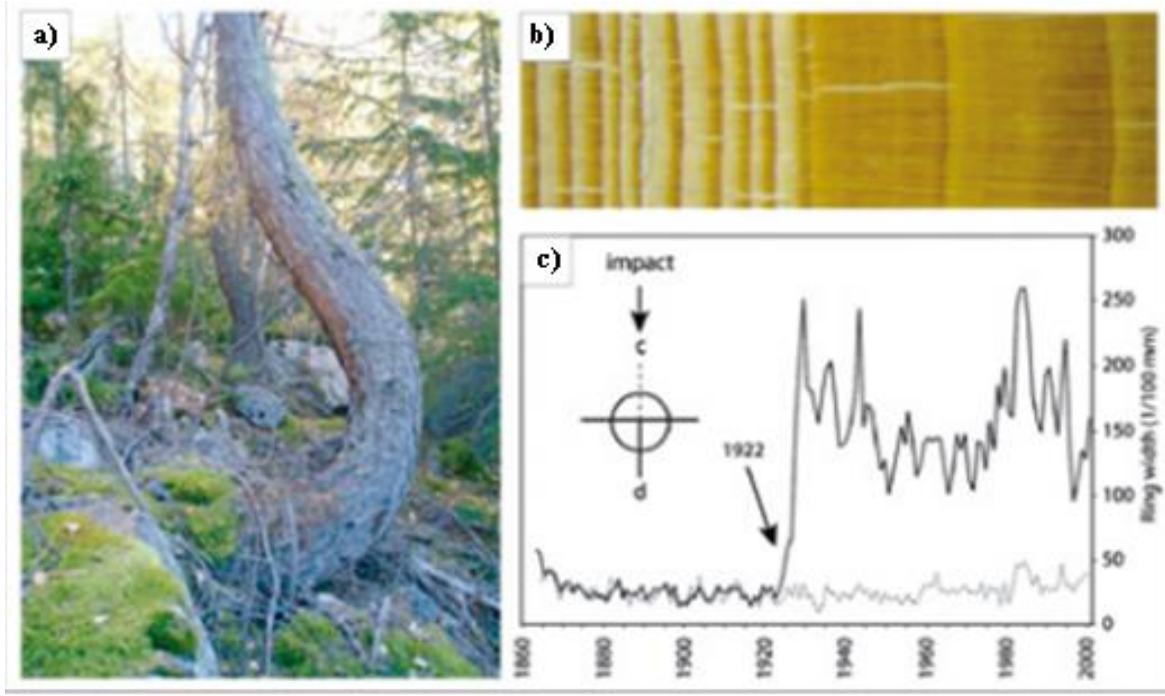


Figura 15. Ejemplo de un árbol que generó madera de reacción para mantener la verticalidad. a) Se aprecia macroscópicamente al árbol; b) Se observa el aumento en el ancho de los anillos al formarse madera de reacción; c) Grafica de la evolución del ancho del anillo en la zona cargada (línea negra) y la zona no cargada (línea gris) como consecuencia de un evento que tumbó el árbol. Modificado de Ballesteros et al. (2010).

- Cambios anatómicos en raíces descubiertas: al desenterrarse una raíz la estructura típica se pierde y se asemeja más a la de un tronco o rama, y debido a este cambio mediante la dendrocronología se puede conocer el momento en el que esta quedó expuesta (Figura 16).

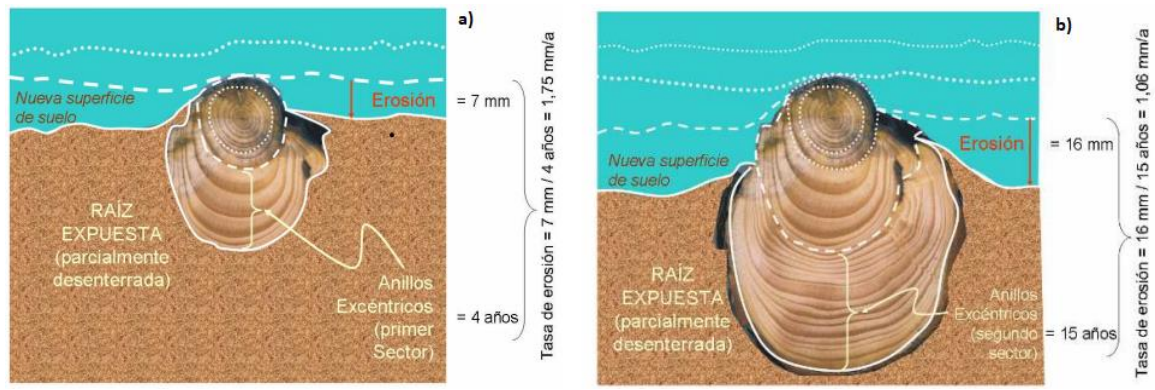


Figura 16. Sección transversal que muestra cómo varía el crecimiento de los anillos anuales en una raíz luego de ser expuesta. a) Se observa el cambio durante 4 años que se mantuvo parcialmente desenterrada la raíz; b) Se observa el cambio durante 15 años que se mantuvo parcialmente desenterrada la raíz. Modificado de Ballesteros-Cánovas et al. (2012).

- Aparición de tejido calloso o canales resiníferos traumáticos: luego de sufrir un daño mecánico, parte del *cambium* que genera células puede morir en donde sucede la herida y el árbol en los próximos años la cubrirá con madera a modo de cicatriz, donde dichas cicatrices no presentaran células orientadas longitudinalmente, sino más bien con direcciones aleatorias o caóticas (Figura 17). Además, en algunas coníferas, en la reacción por el daño, se pueden producir canales resiníferos traumáticos.

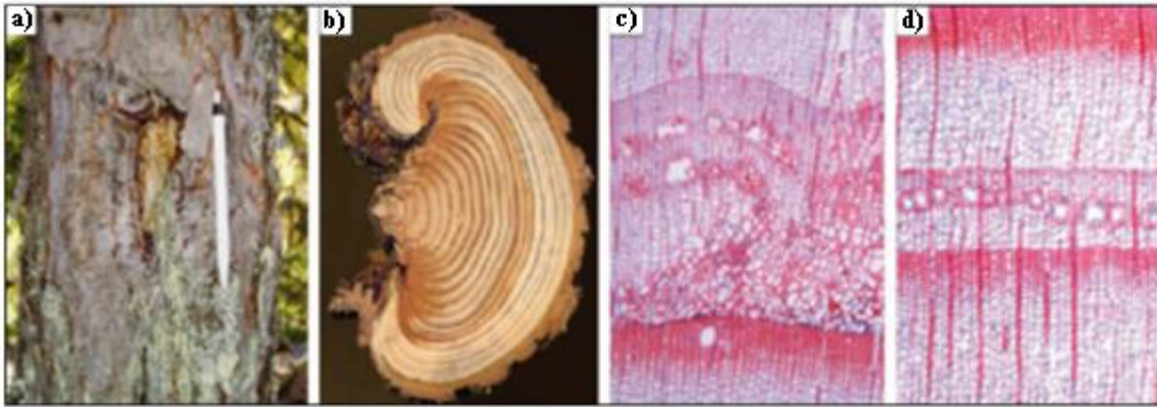


Figura 17. Ejemplificación de la reacción de un árbol por un daño mecánico. a) Se observa heridas en el tronco; b) Se aprecia una sección de la herida donde se ha cubierto parcialmente la herida; c) Se muestra, mediante un corte anatómico, la formación de tejido calloso; d) La formación de canales resiníferos traumáticos. Modificada de Ballesteros et al. (2010).

Capítulo 3 Área de estudio

La RBMM está localizada al este del estado de Michoacán y al oeste del Estado de México (Figura 18), tiene una extensión de 562.59 km² (SEMANART, 2016) y forma parte de la CVTM (Carlón-Allende et al., 2015), su elevación que va desde los 2040 a los 3640 msnm (SEMANART, 2016). La zona está caracterizada por la presencia de cuerpos volcánicos del Cenozoico medio y tardío, y las litologías presentes en la zona son rocas ígneas extrusivas como basaltos, riolitas y tobas, sobre las cuales se desarrollan suelos Andosol, Luvisol, Acrisol y Litosol (INEGI, 1982).

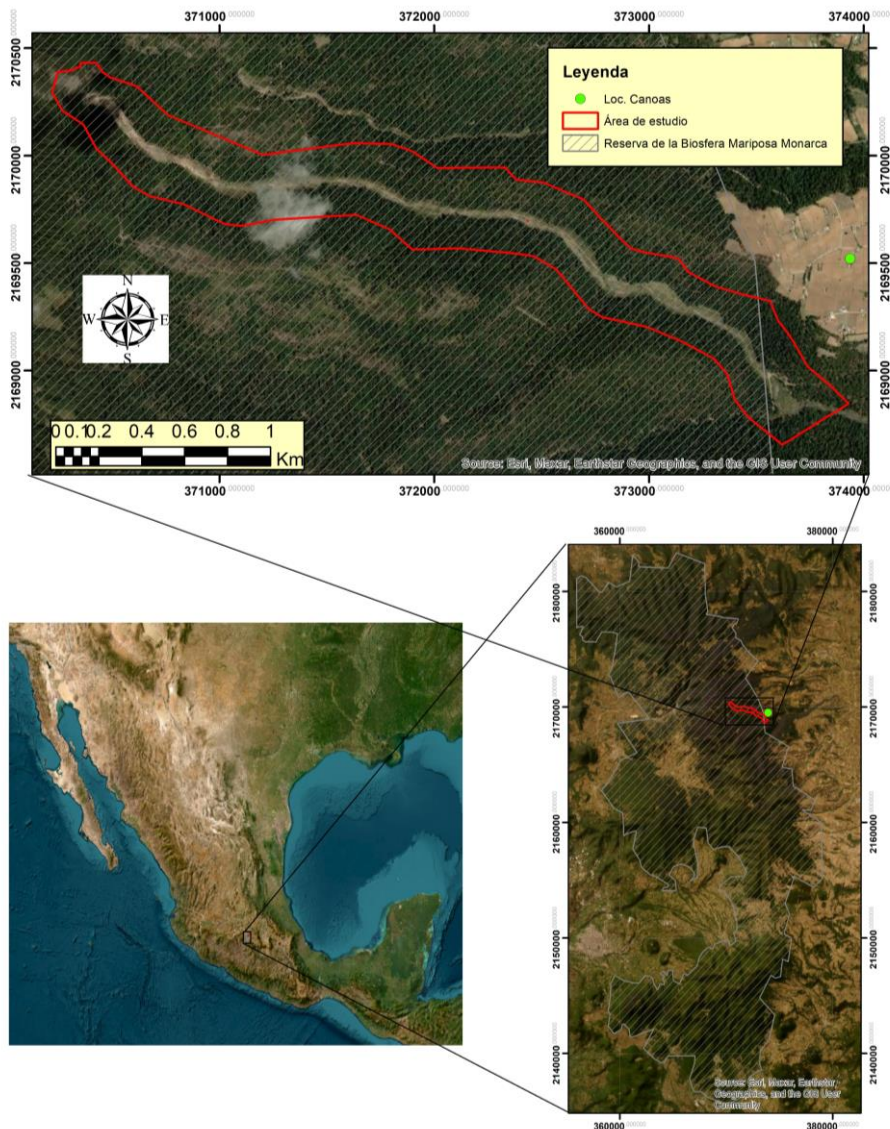


Figura 18. Ubicación de la zona de estudio dentro de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. En la imagen inferior izquierda se ve el territorio de México, las líneas negras que llevan a la imagen inferior derecha indican el acercamiento a la RBMM que está representada con las líneas grises diagonales, las líneas negras que llevan a la imagen superior señalan el acercamiento al Río Rancho Verde y con la línea roja se delimita la zona de estudio, que se encuentra principalmente dentro de la RBMM.

3.1 Geología

En la zona de estudio aflora la unidad andesítica de Angangueo, una secuencia andesítico-basáltica, pseudo horizontal, conformado por lavas masivas, con niveles de brecha y tobas provenientes de varios aparatos volcánicos andesíticos, de textura porfídica y en algunas zonas afanítica microcristalina (Servicio

Geológico Mexicano (SGM), 2000). Generalmente se encuentra como una sucesión de derrames, pero en algunas zonas se encuentra intercalada con una brecha andesítica. Megascópicamente son de color gris oscuro a gris verdoso, con algunas tonalidades ocres, de estructura compacta, masiva y con sectores de intenso fracturamiento (SGM, 2007). Microscópicamente contiene oligoclasa y andesina en la misma proporción y en menor cantidad augita, hornblenda, vidrio, ortoclasa y esporádico apatito y hematita (SGM, 2007). La asociación de fenocristales dominantes es de plagioclasas y piroxenos. Esta andesita tiene una edad correspondiente al Mioceno fechado mediante el método K/Ar dando edades de 17.6 y 13.1 Ma. La importancia de esta unidad es que contiene las vetas polimetálicas del Distrito Minero de Angangueo. La Brecha Andesítica con la que se intercala corresponde a los últimos eventos volcánicos del mioceno en la Sierra Madre Occidental y contiene fragmentos andesíticos, angulosos y sub-angulosos, del tamaño de grava, embebidos en matriz afanítica, de textura piroclástica (SGM, 2000; 2007).

3.2 Hidrología

La RBMM pertenece a dos regiones hidrológicas: hacia el norte a la del río Lerma-Santiago y hacia el sur la del río Balsas (Gómez-Pompa y Dirzo, 1995). La zona de estudio pertenece a la cuenca hidrográfica Río Balsas (INEGI, 2021) y a las subcuencas Palo Amarillo y San José Matalcalpetec (CONABIO, 1998), siendo que la mayor parte de la zona de estudio se encuentra en esta última, en la porción sureste de la RBMM, esta zona se encuentra dentro de los ejidos Rosa Palo Amarillo, La Concepción del Monte, La Fabrica Concepción (Registro Agrario Nacional (RAN), 2019).

3.3 Clima, edafología y vegetación

Los climas dominantes son semifríos subhúmedos y frescos en verano y templado subhúmedo, con una precipitación anual que varía entre 700 y 1250 mm y una temperatura media anual que oscila entre 8 y 22°C (García, 2004).

Los climas han favorecido el desarrollo de varios grupos de suelos como andosoles (predominante), acrisoles, planosoles, feozem, litosoles, luvisoles,

cambisoles, regosoles y vertisoles (SEMARNAP, 1998). También, varios tipos de cobertura y uso del suelo en la RBMM incluyen bosque de pino-encino (44%) compuesto por *Pinus leiophylla* y *Pinus pseudostrobus*, así como *Quercus castanea*, *Quercus laurina* y *Quercus rugosa*, bosque de oyameles de *A. religiosa* (27%) y agricultura (15%), las áreas restantes (14%) corresponden a pastizales, matorrales, asentamientos humanos y cuerpos de agua (Carlón-Allende et al., 2015). El bosque de oyamel se desarrolla en elevaciones entre 2320 y 3640 m s.n.m., mientras que los pinos entre 2020 y 3400 m s.n.m. Los árboles de *Abies* y *Pinus* son codominantes a lo largo de una zona de transición entre 2320 y 3400 m s.n.m. (Carlón-Allende et al., 2015).

En los bosques de *Abies religiosa* perchan las colonias de mariposa monarca durante los inviernos (Pérez-Salicrup et al., 2016). En este trabajo se muestrearon especies de *A. religiosa*, en las cuales el factor ambiental relacionado a la actividad de su cambium vascular es la temperatura máxima y la precipitación de invierno-primavera (Bernal-Salazar y Terrazas-Salgado, 2000; Carlón-Allende et al., 2016); sin embargo, las propiedades físicas del suelo influyen mucho en el desarrollo de esta especie, tales como la profundidad, el drenaje, la textura, estructura y el contenido de humus (Manzanilla, 1974).

Capítulo 4 Materiales y métodos

4.1 Programas de cómputo empleados

La implementación de la metodología presentada implicó el uso de tres programas de cómputo especializados, estos son *Dips* 5.103 (Rocscience, 2004), *Measure J2X* (Voortech, 1999) y *COFECHA* (Holmes, 1983).

4.1.1 *Dips* versión 5.103

Es un programa de cómputo diseñado para el análisis y visualización de información estructural de manera que resulte igual a la implementación de una red estereográfica (Poriles, 2018).

4.1.2 Measure J2X

Este es un programa de cómputo para almacenar los datos de mediciones de ancho de los anillos de crecimiento de los árboles. El programa permite la captura de mediciones desde una variedad de unidades de lectura digital/codificar/etapa de medición, además, de permitir modificar o continuar series ya existentes. El programa lee y escribe en archivos de formato “decadal”. Así mismo, el programa permite medir el ancho total del anillo y de series de ancho de anillo de madera temprana/tardía, y esto en cualquier dirección, de corteza hacia la médula o de la médula hacia la corteza (Voortech, 2014).

4.1.3 COFECHA

COFECHA es un programa de cómputo escrito en ANSI standard Fortran -77 por Richard L. Holmes y evalúa la calidad de las dataciones cruzadas y la precisión de las mediciones de series de anillos de árboles (Grissino-Mayer, 2001). Este programa es uno de los más importantes para el desarrollo de series dendrocronológicas (Constante-García et al., 2009) y al ser usado correctamente añade un alto grado de seguridad en que las muestras de anillos de árboles han sido fechadas correctamente y medidas con precisión (Grissino-Mayer, 2001).

El funcionamiento de *COFECHA* es mediante técnicas de correlación de series de tiempo segmentadas para evaluar la calidad del *crossdating* en series de medición (Grissino-Mayer, 2001). El programa a través de los archivos de medición de cada serie de crecimiento de anillos compara estadísticamente el fechado de cada muestra al correlacionar sucesivamente segmentos de 50 años con traslapes de 25 años, al encontrar valores de correlación bajos el programa indicara diferenciados aquellos que pueden corregirse para mejorar la correlación (falsos anillos, errores de medición, anillos faltantes, etc.) y los que no son atribuibles al fechado (crecimientos irregulares) (Constante-García et al., 2009).

Los procesos de *COFECHA* se centran en la varianza de alta frecuencia ya que en la mayoría de las regiones templadas las variaciones anuales en el ancho de los anillos de crecimiento son más importantes para el *crossdating* que las tendencias de baja frecuencia. Al examinar sólo la varianza de alta frecuencia proporcional a los anchos de anillos simula matemáticamente la percepción

humana en el análisis visual de una serie de anillos de árbol para *crossdating* (Grissino-Mayer, 2001).

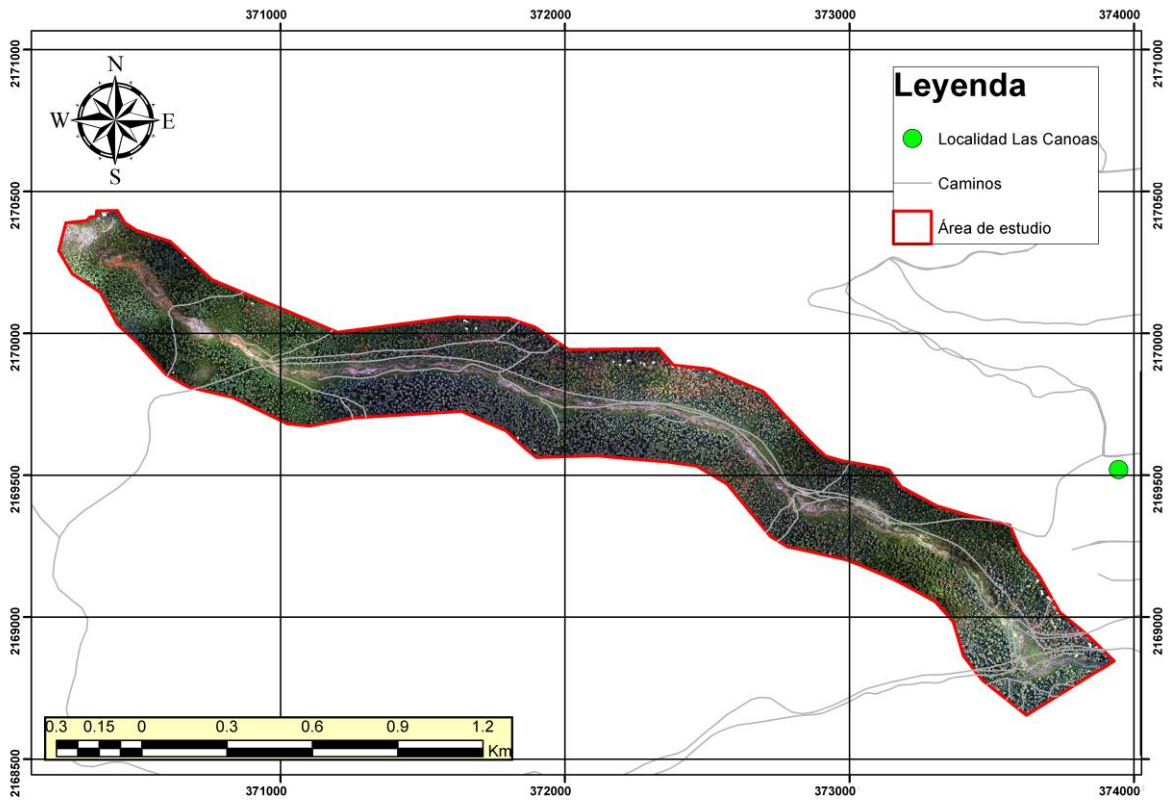
Otra función importante de COFECHA es la evaluación de la precisión de las mediciones. El programa detectará mediciones de anillos atípicos, producidos por patrones de anillos anómalos, los cuales se deben inspeccionar de manera visual y volverse a medir para garantizar la precisión de las medidas (Grissino-Mayer, 2001).

Algo que se debe destacar de este programa es que no sustituye el *crossdating* de manera visual, es más una herramienta que ayuda en el control de calidad de los datos mediante un exhaustivo examen de todas las series de datos (Grissino-Mayer, 2001; Constante-García et al., 2009).

4.2 Generación de modelo digital de superficie

Con el apoyo del personal del Laboratorio Universitario de Drones (LUD), y mediante el uso de fotografías aéreas y la visualización de imágenes de *Google Earth* se realizó la planeación de vuelo (Figura 19) de un vehículo aéreo no tripulado Mavic 2 pro. Esta planeación fue mediante la aplicación DJI PILOT resultando en misiones de tipo lineales a una altura de 120 m.

Las fotografías tomadas se procesaron en el programa Agisoft (Agisoft LCC, 2006). Primero, se cargaron y orientaron las imágenes; posteriormente se generó la nube de puntos dispersa, de la cual se realizó una selección gradual con valor de 2 sobre la misma. Después, se generó la nube de puntos densa a partir de los puntos dispersos con calidad alta y con filtrado leve; enseguida se clasificó la nube densa de puntos y se asignó una clase a cada tipo de elemento encontrado, siendo este caso las clases de “vegetación” y “terreno”. Por último, con los puntos asignados como “terreno” se generó el Modelo Digital de Superficie (MDS). Cabe resaltar que las fotografías empleadas para generar el MDS, también fueron empleadas para generar un ortomosaico de la zona de estudio.



Elaboración propia

Figura 19. Zona de estudio delimitada mediante el ortomosaico generado por los vuelos de dron.

4.3 Caracterización geológica

La caracterización se inició con la recopilación bibliográfica de las litologías reportadas en la zona, la cartografía de la zona indicaba que esta se encuentra constituida por material andesítico (INEGI, 1978; SGM, 2000). Durante el trabajo de campo se realizó la toma de muestras y datos de contactos litológicos con un GPS. La toma de las muestras de roca se realizó en los macizos rocosos que afloran, utilizando una pica, y procurando extraer muestras lo más frescas posibles para posteriormente clasificarlas y describirlas en laboratorio de acuerdo con la bibliografía especializada. También, se tomaron datos de las familias de fracturas presentes en el macizo andesítico usando una brújula tipo Brunton. Los datos recopilados fueron introducidos al programa de cómputo *Dips v5.103* (rocscience, 2004) para su representación gráfica como polos, concentración de polos, estimación de las familias de fracturas y extrapolación a fracturas regionales inferidas.

Posteriormente en el programa de cómputo ArcMap se introdujeron los datos tomados con el GPS y con base a esta información e interpretación de las imágenes generadas con vuelos de dron se digitalizó un mapa geológico de la zona, así mismo se generaron perfiles o secciones geológicas donde se estimó la distribución de las unidades geológicas encontradas aflorando, el echado aparente de las fracturas en los perfiles se obtuvo mediante el diagrama de alineación (Anexo 1).

4.4 Caracterización geomorfológica

Con el análisis del MDS y las herramientas *Hillshade* y *Slope* de ArcMap se obtuvieron los mapas de sombras y de pendientes, los cuales junto al MDS y el ortomosaico fueron de utilidad para la interpretación visual y delimitación de las geoformas. Cabe resaltar que, la interpretación visual se realizó a una escala de 1:500, siguiendo criterios geomorfológicos de Cenderelli y Kite (1998) y Lugo-Hubp (2011). Las unidades utilizadas en la delimitación mediante técnicas de percepción remota (Figura 20) fueron:

- Cabecera: porción superior de la zona donde se inició el PRM, con predominancia de erosión vertical.
- Cauce activo: cauce que en toda estación del año contiene caudal.
- Cuerpo de deslizamiento: material desplazado sobre la superficie de ruptura por un deslizamiento de ladera.
- Cúmulo de cantos rodados: superficie casi totalmente cubierta por cantos rodados; se forma a causa de la erosión o remoción de rocas que contienen till, cantos fluviales, proluviales y otros sedimentos.
- Deslizamiento superficial: material desplazado sobre la superficie de ruptura el cual afectó únicamente la parte más superficial del talud.
- Gavión: construcción de hormigón, ladrillos, acero, madera o rocas, paralela perpendicular al flujo del cauce, con el fin de retener material que vaya aguas abajo.
- Isleta: superficie no inundada por el cauce de un río. Se forma por la acumulación en el fondo que aumenta rebasando el nivel del agua.

- Ladera media: porción inclinada de la superficie terrestre que delimita formas positivas y negativas, con una inclinación entre 15° y 35°.
- Ladera tendida: porción inclinada de la superficie terrestre que delimita formas positivas y negativas, con una inclinación entre 15° y 5°.
- Lóbulo de deslizamiento: formas alargadas y estrechas, en dirección de la pendiente.
- Plano de ruptura: plano resultante de la zona donde se perdió el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera y se mueven ladera abajo por la acción de la gravedad.
- Superficie de roca madre erosionada: zona donde la erosión fue tan alta que arrastró todo material que se encontraba sobre la roca madre dejándola expuesta.
- Terraza de alta erosión: superficie plana o débilmente inclinada, generalmente estrecha y alargada, delimitada por cambios bruscos de pendiente, diferenciada por la escasa o nula vegetación.
- Terraza de baja erosión: superficie plana o débilmente inclinada, generalmente estrecha y alargada, delimitada por cambios bruscos de pendiente, diferenciada por la vegetación presente.

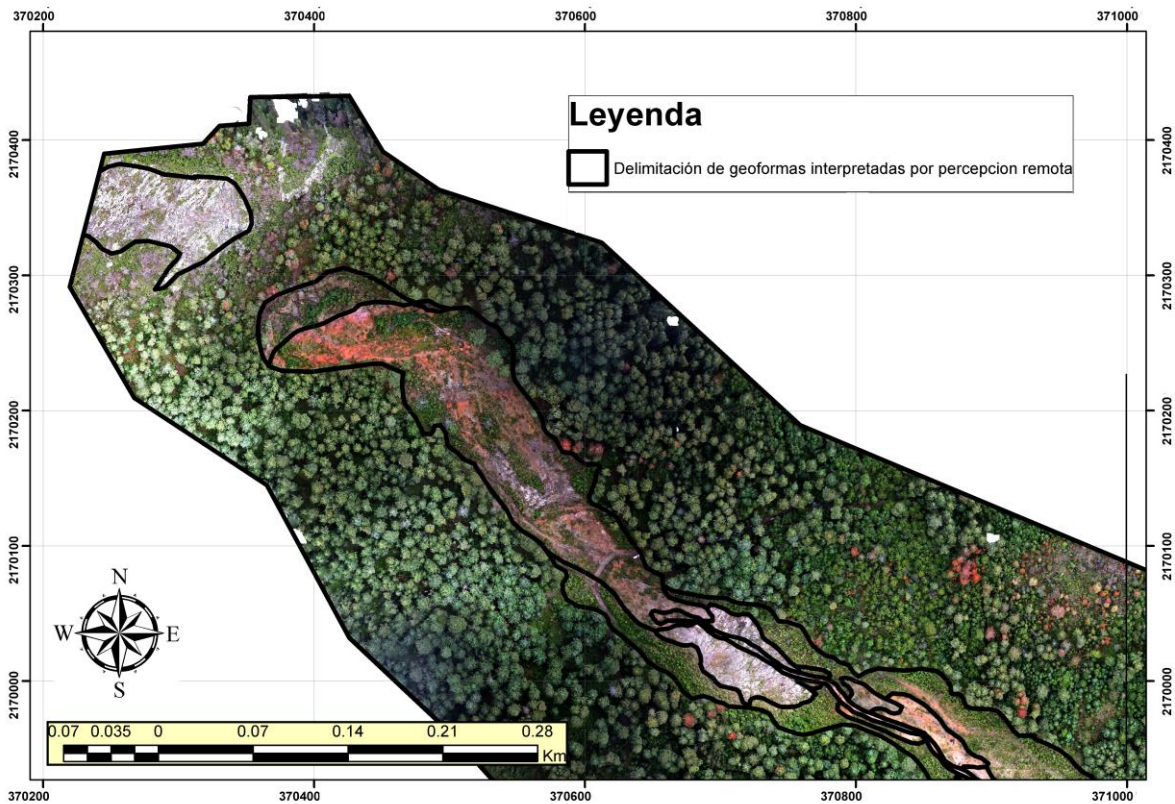


Figura 20. Delimitación preliminar de unidades geomorfológicas con base a la literatura consultada.

Con la clasificación geomorfológica preliminar, se planificó una salida de campo, la cual inició desde la zona de deposición hacia la corona; durante el trabajo de campo se verificaron los cauces tributarios en la zona de estudio, las unidades marcadas y mediante la toma de puntos con un GPS se relacionaron geográficamente los datos de las geoformas presentes en el terreno y a través de esto surgió la necesidad de incluir las siguientes unidades geomorfológicas:

- Depósito de ladera erosionado: Depósitos más antiguos originados por PRM que tuvieron origen en las laderas contiguas al cauce. Estos procesos por su antigüedad, erosión e intervención humana en la zona no se pudieron caracterizar.
- Ladera media erosiva: porción inclinada de la superficie terrestre que delimita formas positivas y negativas, con una inclinación entre 15° y 35° cuya erosión es destacable debido a la acción del PRM.

- Ladera tendida erosiva: porción inclinada de la superficie terrestre que delimita formas positivas y negativas, con una inclinación entre 15° y 5° cuya erosión es destacable debido a la acción del PRM.

Los puntos tomados con el GPS fueron introducidos a ArcMap y con las herramientas de edición de polígonos se realizó la corrección de los contornos y clasificación de las geoformas (Figura 21). Además, con los cauces tributarios identificados en el trabajo de campo y una interpretación visual de las curvas de nivel (INEGI, 2019) se logró confirmar y complementar la distribución geográfica de las corrientes de agua en la zona (INEGI, 2019). Posteriormente, a estas corrientes de agua o drenajes, se le asignó un orden de jerarquía de la siguiente manera: ríos de primer orden son los que no tienen afluentes; los de segundo orden se forman al unirse los de primer orden; los de tercer orden se forman al unirse los de segundo y así sucesivamente (Strahler, 1957) (Figura 22).

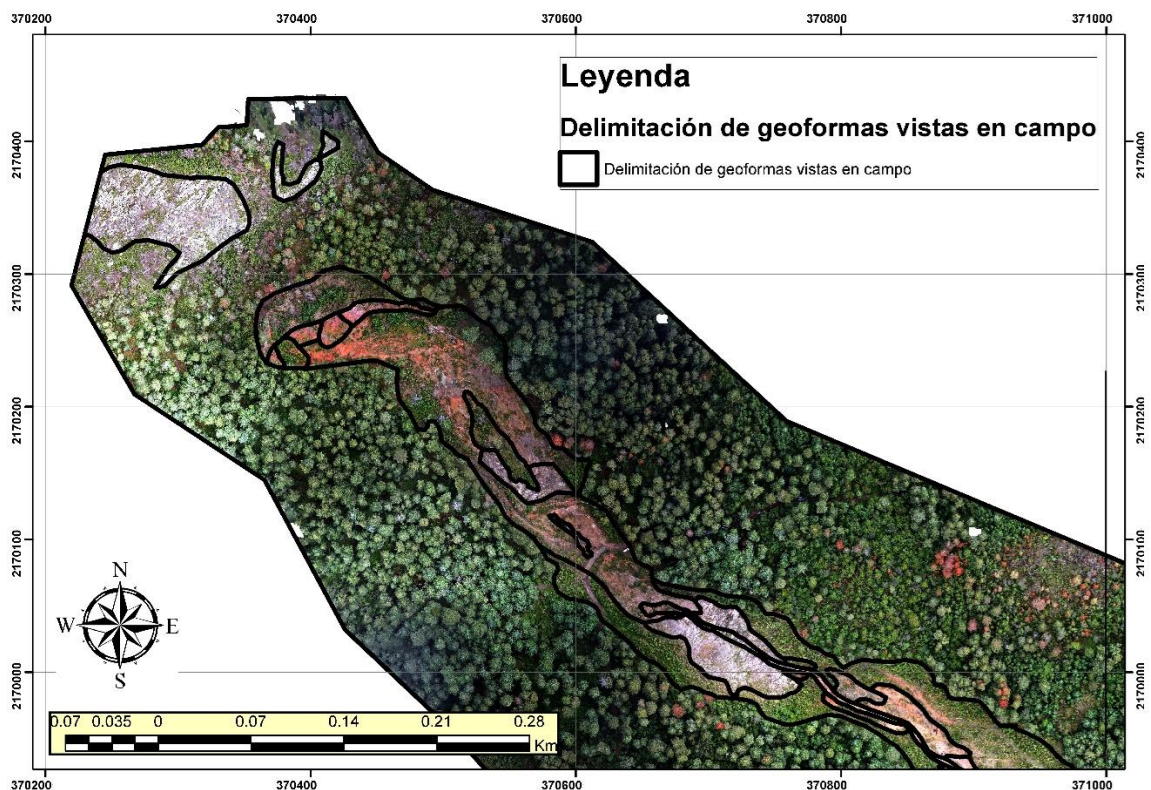


Figura 21. Delimitación de unidades geomorfológicas con base a los datos tomados en el trabajo de campo.

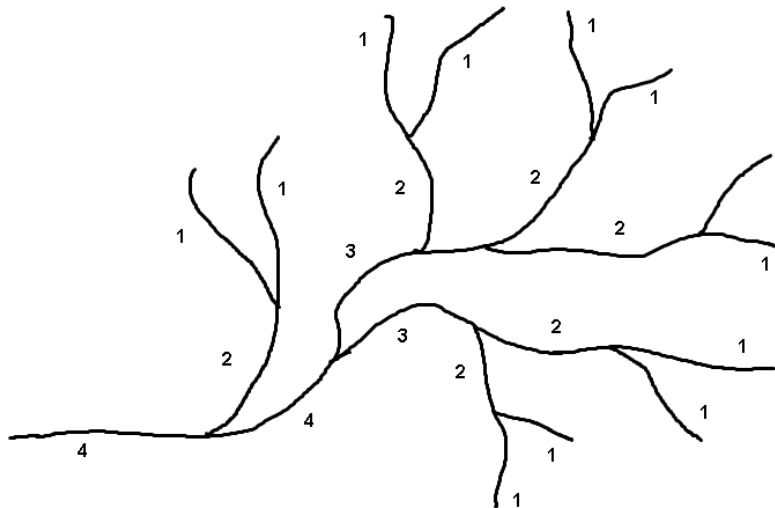


Figura 22. Esquema de la jerarquía de órdenes de ríos de Strahler (1957) en el cual los ríos del mismo orden al encontrarse unen sus cauces aumentan de orden.

4.5 Caracterización de los bloques rodados y granulometría

Durante el trabajo de campo se realizaron mediciones de los bloques de roca rodados en cúmulos, para obtener promedios de los tamaños a lo largo de la zona de estudio (Figura 23). Los cúmulos se midieron hacia la cara de mayor tamaño del bloque de roca rodado, por lo que los resultados se encuentran en cm^2 .

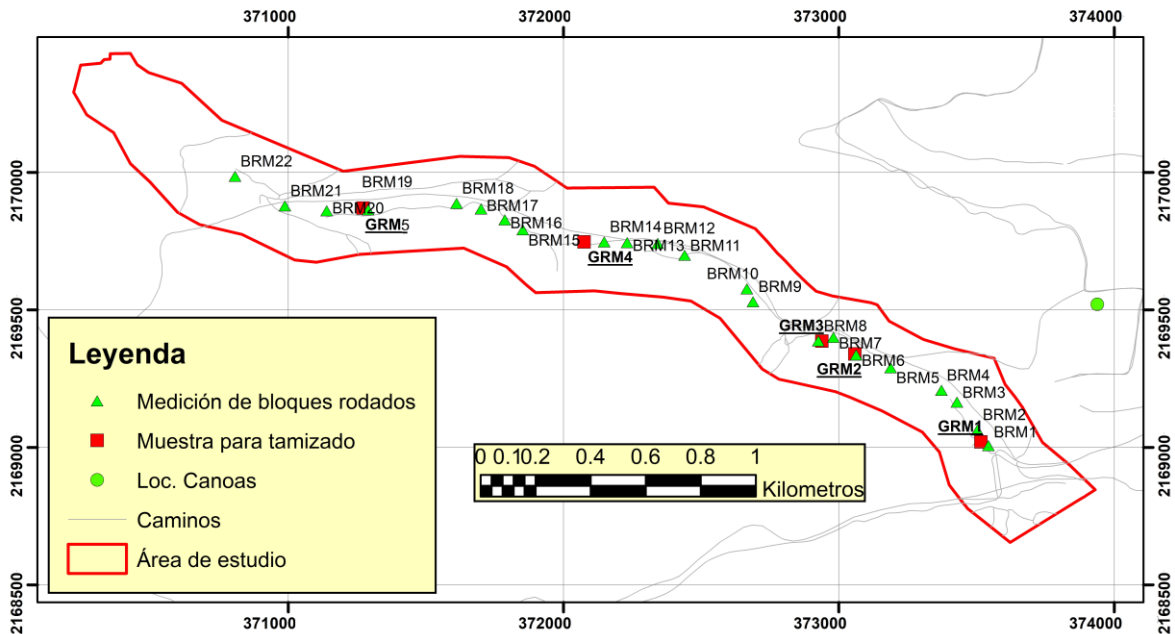


Figura 23. Distribución geográfica de las zonas donde se tomaron las mediciones de los bloques de roca rodados y las muestras tomadas para tamizado.

Por otro lado, se colectaron muestras para realizar su tamizado. La planeación del muestreo se realizó tomando una o dos muestras representativas de las zonas de mayor interés, con la clave Granulometría Reserva Monarca (GRM) (Figura 23). Se tomó una muestra dentro de la zona de deposición (GRM1), dos muestras de la zona donde hubo dos cambios de dirección en una distancia pequeña (GRM2 y GRM3), una muestra en la zona media de la zona de estudio (GRM4) y una muestra en la zona próxima a la cabecera, la cual presentó muchos depósitos (GRM5). La toma de muestras para tamizado se realizó en los depósitos reconocibles del PRM más reciente, se limpió el depósito retirando la costra superficial alterada, y una vez hecho esto con una pala se tomó aproximadamente 1 kg de muestra en bolsas de barrera, realizando una descripción del depósito y guardando las coordenadas del lugar donde se tomó la muestra.

El proceso de tamizado se realizó considerando los criterios de la norma ASTM D422-63 (2007), la cual consiste en estandarizar el análisis granulométrico de muestras de suelo, mediante dos pruebas, la primera conocida como método mecánico, que consiste en el proceso de tamizado, y es utilizada para determinar la distribución de las partículas cuyo tamaño estén entre los 750 mm hasta los 0.075 mm. De acuerdo con el tamaño máximo de partículas en la muestra se necesita un peso mínimo recomendado total de la muestra para este proceso de tamizado (Tabla 1). La segunda prueba es para las partículas menores a los 0.075 mm, un método hidrométrico, el cual no fue utilizado debido a la ausencia de materiales con esos tamaños.

Tabla 1. Pesos mínimos de muestra por partícula de mayor tamaño (ASTM D422-63, 2007).

Tamaño máximo de partícula, apertura de la malla (mm)	Peso mínimo de la muestra seca (gr)
4.75	100
9.5	500
19	1000
25	2000
37.5	3000
50	5000
75	5000

El primer paso fue secar la muestra, dado que la muestra presentaba un bajo grado de humedad se optó por secarla a temperatura ambiente, en exposición a la luz solar manteniéndose en un recipiente que fungía como un sistema cerrado impidiendo que se perdiera o ganara partículas. Con las muestras se procedió a homogeneizar cada muestra mediante el método del cuarteo, dentro de un recipiente la muestra se revolvió para formar un pequeño montículo, el cual fue movido a otra parte del recipiente volviendo a hacer un montículo, repitiendo el proceso en tres ocasiones. Finalmente, se procedió a aplanarlo y dividirse en cuatro porciones, tomando dos porciones opuestas (Figura 24a), debido a la limitada cantidad en gramos de la muestra, este cuarteo se realizó una segunda vez con el restante en el recipiente para poder tener una mayor cantidad de muestra.

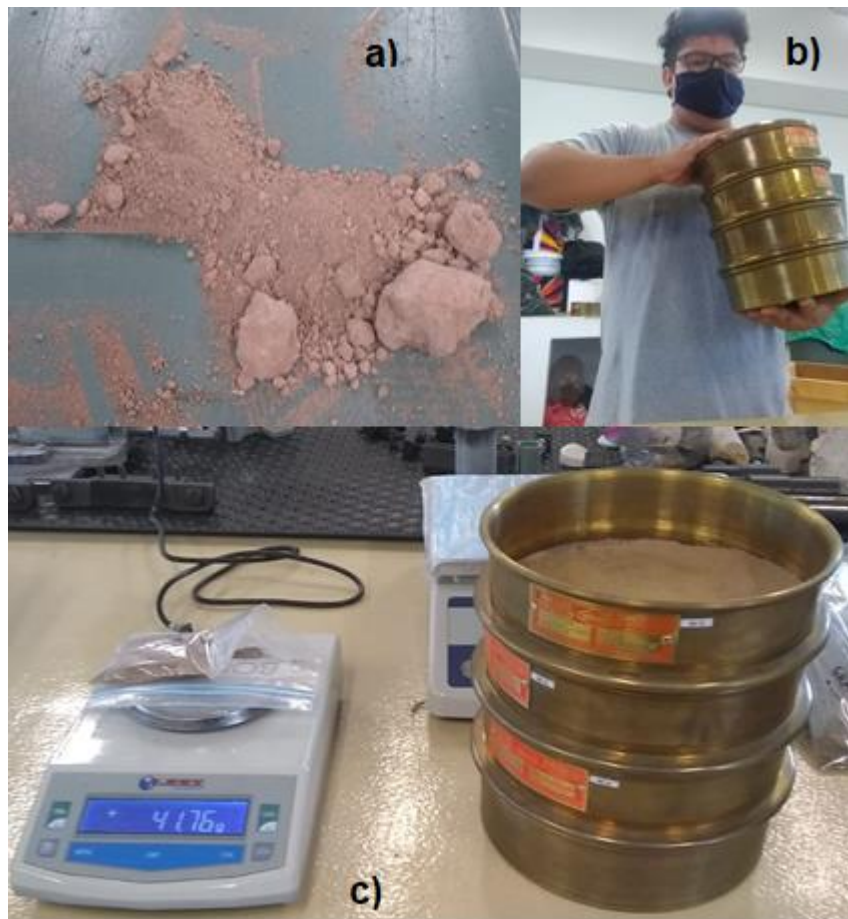


Figura 24. Proceso de tamizado de una muestra. a) Muestra homogeneizada y con los extremos faltantes por el método de cuarteo; b) Tamices montados siendo agitados para separar las partículas por su tamaño mediante las mallas de los tamices; c) Pesado de las partículas retenidas en cada tamiz.

El tamizado se realizó montando de tres en tres tamices sobre la charola, iniciando con los tamices de 50 mm, 37.5 mm y 25 mm. Posteriormente, se vació la muestra sobre los tamices cuidadosamente para evitar perder partículas finas, que pudieran quedar en suspensión en el aire por un brusco vaciado; se colocó la tapa y se comenzó a mover manualmente la torre de tamices con movimientos circulares sobre la horizontal durante 5 minutos y con movimientos rectos durante otros 5 minutos (Figura 24b). Al terminar este procedimiento se colocó la torre de tamices sobre una superficie fija y se dejó reposar durante un minuto para que cualquier partícula suspendida en el aire pudiera depositarse. Después, fueron marcadas las bolsas de barrera con la clave y el diámetro del tamiz, se pesó la bolsa, se colocaron dentro de las bolsas las partículas retenidas por el tamiz

correspondiente al marcado (Figura 24c), se volvió a pesar y se registró el peso de la muestra retenida en la bitácora (Anexo 2). Después, se montaron los tamices de tamaño 19 mm, 12.5 mm y 9.5 mm, se repitió el proceso anterior para este y los siguientes tríos de tamices utilizados, cuyos tamaños usados se pueden ver en el Anexo 2. Al terminar se limpiaron los tamices y se repitió el proceso con cada una de las muestras restantes.

Para clasificar las muestras tamizadas de acuerdo con el SUCS (Norma ASTM D-2487), se graficaron los datos obtenidos de cada muestra en los tamizados en una gráfica logarítmica conocida como Curva granulométrica (Anexo 3); en ella se graficó el porcentaje acumulado que pasó a través del tamiz contra el tamaño del tamiz empleado. De esta gráfica se obtuvieron los valores D10, D30 y D60, los cuales corresponden al tamaño de partícula, es decir, los valores 10, 30 y 60 en el eje Y de la gráfica, así mismo, con estos valores se calculó el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc) mediante las ecuaciones 1 y 2 (Duque-Escobar y Escobar P., 2016):

$$Cu = \frac{D60}{D10}$$

Ecuación. 1. Cálculo del coeficiente de uniformidad.

$$Cc = \frac{D30}{D10 * D60}$$

Ecuación. 2. Cálculo del coeficiente de curvatura.

4.6 Caracterización dendrogeomorfológica

4.6.1 Muestreo

Uno de los factores fundamentales durante la aplicación de técnicas dendrocronológicas es la selección adecuada de los árboles, y esto dependerá del enfoque del estudio. En el caso particular de PRM se consideraron características como evidencias de disturbios reconocibles a simple vista en los troncos de los árboles. En un FD el principal disturbio usado para la selección de los ejemplares muestreados son las cicatrices producidas por impacto. Las marcas producidas por el impacto del FD deben ser concordantes con la dirección del FD. Una vez seleccionado el árbol para muestrear, se realizó el levantamiento de datos adicionales referentes a las características del árbol y del entorno físico de este (Tabla 2), además, se tomaron fotografías del antes y después de la toma de cada muestra.

Tabla 2. Formato de campo para las muestras recolectadas de los árboles muestreados. Realizado por la Dra. Karla Aurora De la Peña-Guillen.

Fecha: _____ Hora: _____ Estado: _____ Clave: _____
 Sitio: _____ Coordenadas: X _____ Y _____
 Especie: _____ Altitud: _____

Árbol					Entorno								
Altura					Geomorfología								
Diámetro					Pendiente								
Otras observaciones:					Disturbio observado								
No. de muestras													
Tipo de muestra:					No. De foto								
Orientación de la muestra	N	NE	E	SE	N	NE	E	SE	N	NE	E	SE	
	S	SO	O	NO	S	SO	O	NO	S	SO	O	NO	

La toma de muestras dendrocronológicas se realizó mediante dos instrumentos, uno con la ayuda de una motosierra (Figura 25a) y otro con el taladro tipo *Pressler* (Figura 25b).

En el caso del taladro, para la toma de muestras de árboles afectados se tomó un núcleo que atravesara el árbol de manera perpendicular a la cicatriz para evitar la pérdida de información, una muestra tomada a la altura del pecho a aproximadamente 1.5 m. Primeramente, se posicionó el taladro perpendicular al tronco de manera que se interpretara se podía llegar a la médula del árbol, presionando contra el árbol y girando el mango en sentido de las manecillas de reloj. Al ser extraídos los núcleos fueron envueltos en papel, marcados y guardados en un tubo para su transporte y posterior preparación.

En el caso de la motosierra, esta fue empleada únicamente con muestras que presentaran disturbios. Se inició realizando 4 cortes, dos horizontales y paralelos entre sí, que fueran perpendiculares al árbol, y dos verticales cada uno de ellos iniciando en el borde de los cortes horizontales, y dirigidos hacia la médula del árbol, obteniendo como resultando muestras en forma de cuña. Cabe resaltar que, las muestras con motosierra se tomaron de manera que fuera extraída la parte afectada (que presenta la cicatriz) por el evento geomorfológico.



Figura 25. Toma de muestras. a) Toma de muestra con motosierra; b) Toma de muestra con el taladro *Pressler*.

Mediante estas técnicas se muestrearon un total de 98 árboles (Figura 26) de estos se extrajeron 125 muestras de árboles impactados.

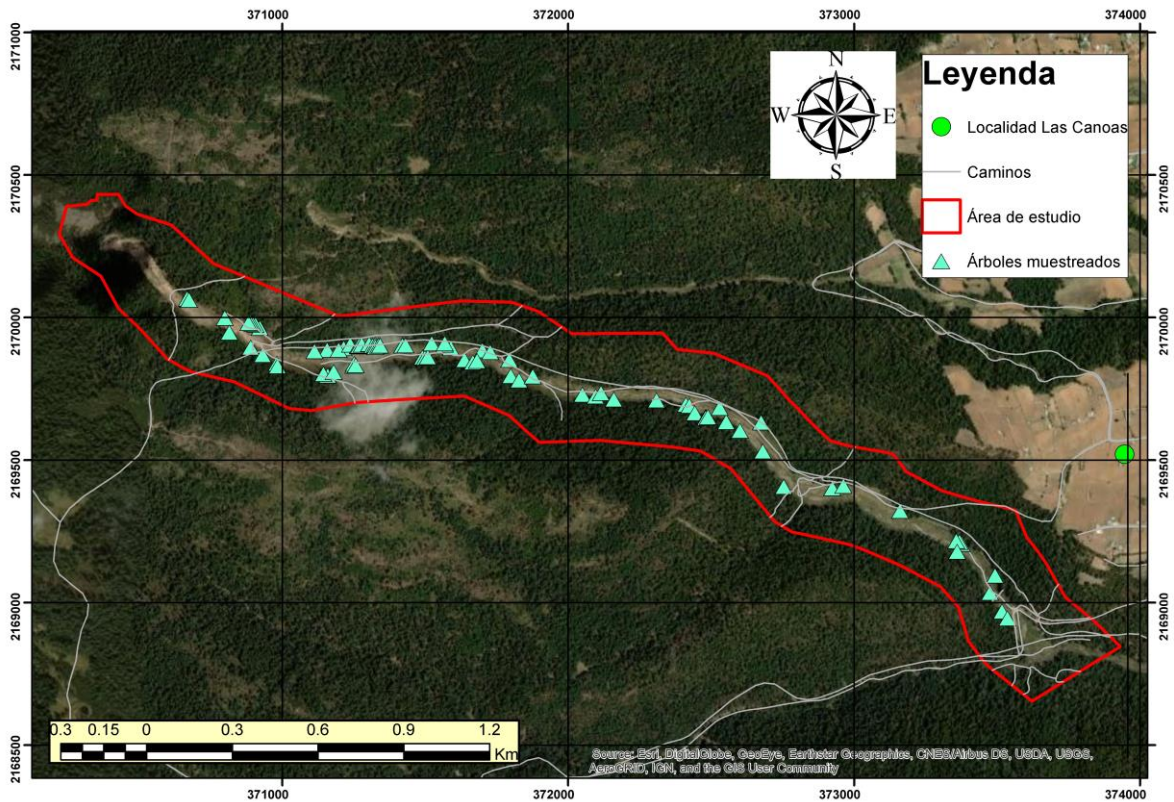


Figura 26. Distribución espacial de los árboles muestreados en la zona de estudio.

4.6.2 Montado y preparación de muestras dendrocronológicas

Los núcleos de crecimiento fueron fijados a bases de madera (Figura 27), considerando los criterios establecidos por Phipps (1985). Los núcleos de crecimiento fueron fijados a la base asegurando que sus traqueidas (células por donde circula la savia) estuvieran de forma vertical. Mientras que las cuñas fueron resguardadas para su posterior secado a temperatura ambiente. Posteriormente las muestras fueron procesadas utilizando la metodología estándar de Schweingruber et al. (1990). El núcleo se pulió con papel de lija con tamaños de grano progresivos, 80 a 320 granos/cm² (UWICER, 2017), esto con el objetivo de tener una mejor visualización de los anillos de crecimiento (Figura 28).



Figura 27. Técnica de montaje de las muestras. Se aprecia la base de madera sobre la cual se colocan y se asegura su adhesión mediante el uso de pegamento y cinta.



Figura 28. Proceso del preparado de las muestras. a) Montado de los núcleos en las bases de madera; b) Lijado de una cuña usando una lija del número 80; c) Lijado de una cuña usando una lija del número 320; d) Lijado de un núcleo usando una lija del número 320.

4.6.3 Pre-fechado

Mediante este proceso se busca relacionar un año a cada anillo en una muestra. Se inicia con la contabilización de todos los anillos de crecimiento en cada muestra, mediante un microscopio estereoscópico. La contabilización de anillo se inició por el extremo en el que se encontraba la corteza del árbol.

Las muestras fueron tomadas antes de que concluyera el periodo de formación de la madera tardía (muestras proporcionadas por la Dra. De la Peña-Guillén y el Dr. Carlón-Allende: febrero de 2020 y noviembre de 2020; campañas de muestreo: octubre de 2021 y mayo del 2022), por lo que el último anillo formado completamente correspondió al 2020. A partir de este año se contabilizó de manera descendente los años y se señalaron los anillos correspondientes a cada década con un punto, por ejemplo 2010, 1990, 1980; para cada medio siglo con dos puntos. Por ejemplo, 1950, y para cada siglo con tres puntos, por ejemplo 2000 (Figura 29).

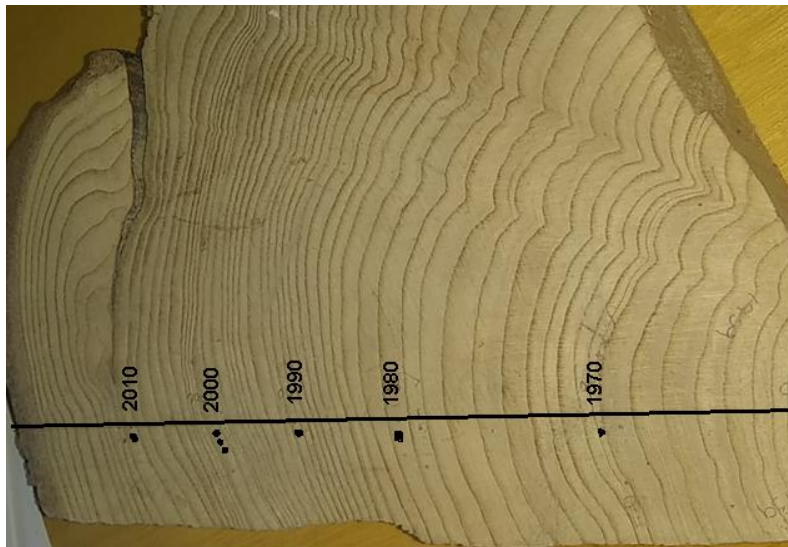


Figura 29. Muestra tipo cuña lijada, pulida y pre-fecha.

Posteriormente se comenzaron a relacionar los patrones de crecimiento entre muestras mediante el *skeleton plot*, este es un gráfico de barras (realizado en papel milimétrico) que enfatiza los anillos de crecimiento particularmente anchos o delgados, permitiendo encontrar patrones y facilitando la correlación. En papel milimétrico se marcó la clave de la muestra, y se trazó una línea sobre la cual se realizó el diagrama, del lado derecho se indicó el año correspondiente al anillo cercano a la corteza, y se segmentó la línea por décadas, el diagrama consistió en líneas verticales cuya longitud estuvo inversamente relacionada al ancho observado en el anillo, es decir, anillo angosto línea larga y anillo ancho línea corta (Figura 30). En este diagrama también se identificaron las peculiaridades en la madera, como anillos falsos u otro tipo de disturbios como

supresión de crecimiento o Conductos Resiníferos Traumáticos (CRT). De manera visual al tener todos los *skeleton plot* se observaron los patrones de crecimiento de los anillos de los árboles de la zona, tanto en las muestras con disturbios generados por el FD como en las muestras que no tenían disturbios.

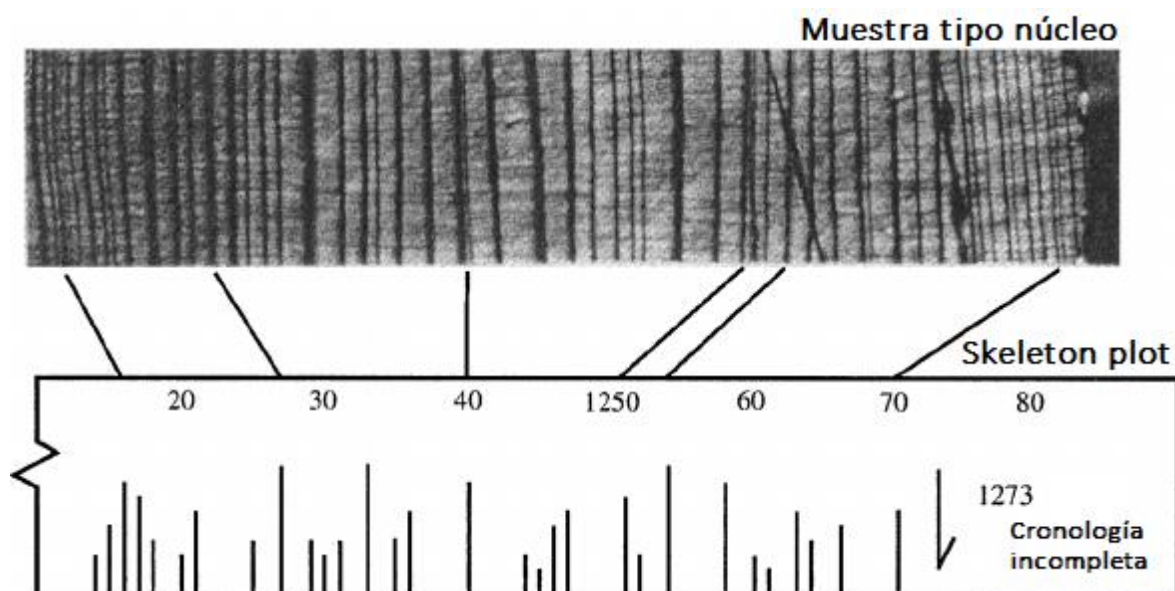


Figura 30. Esquema de *skeleton plot* ejemplo en el que se observa cómo se registran los anillos más anchos y angostos de una muestra que abarca entre el año 1220 y 1280. Modificado de Nash (2002).

A continuación, se realizó la medición del ancho de los anillos de crecimiento en las muestras empleando un estereoscopio conectado a una platina deslizante conocida como VELMEX, conectada a una computadora con el programa *Measure J2X* (Figura 31). Se alineó el objetivo del lente graduado del estereoscopio sobre el límite de la madera tardía del último año con ciclo de crecimiento completo, posteriormente se deslizó suavemente la platina hasta llegar al límite de madera tardía y temprana, donde se registró el valor de medición obtenido en la base de datos del programa *Measure J2X*. Este proceso se repitió hasta concluir con todos los anillos de las muestras de núcleos incrementales y cuñas.

Posteriormente, con ayuda del programa de cómputo COFECHA (Holmes, 1982), se realizó el procedimiento de *crossdating* tanto de las muestras afectadas por el evento.

Mediante una interpretación visual realizada por medio de un estereoscopio se buscaron disturbios de crecimiento (DC) como, la aparición de CRT, con los cuales se pudieran evidenciar la ocurrencia de otros PRM en años anteriores. Los CRT encontrados se clasificaron por su intensidad como bajas (caracterizadas por formar una fila alineada con espacios claros entre los conductos), moderadas (caracterizadas por presentarse como una fila compacta pero discontinua) y fuertes (caracterizadas por presentarse como una fila muy compacta y continua) de acuerdo con lo descrito por Stoffel y Corona (2014).



Figura 31. Medición del ancho de los anillos de crecimiento en las muestras empleando un estereoscopio conectado a una platina deslizante (VELMEX) para su registro mediante el programa *MeasureJ2X*.

4.7 Identificación de la frecuencia de altura de cicatrices

Durante el trabajo de campo se midió la altura de las cicatrices dejadas por el impacto del PRM, esta medición se realizó desde la base del árbol hasta la altura central de la cicatriz (Ballesteros et al., 2010), al medir también se registraban las coordenadas del árbol medido para su posterior introducción a *ArcMap*. Se clasificaron en cinco clases divididas por *natural breaks*, dado que este método genera clases de manera que los valores similares se agrupan mejor y se

maximicen las diferencias entre clases. Las entidades se dividen en clases cuyos límites quedan establecidos dónde hay diferencias considerables entre los valores de los datos.

4.8 Caracterización de precipitación

Se obtuvieron los datos de precipitación para la zona, mediante el archivo KMZ desde el portal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Dentro de los límites de la zona de estudio no se encontraron estaciones meteorológicas activas, por lo que se utilizaron los datos de las estaciones más cercanas al área, las cuales corresponden a: Laguna Del Fresno, Zitácuaro, Presa Brockman y Presa Tepetitlán (CONAGUA, 2021). En las bases de datos de las estaciones utilizadas se identificó que existía un porcentaje de datos faltantes (Tabla 3), por lo que para superar esta limitante y completar los datos faltantes se utilizaron dos métodos diferentes. En el caso de las estaciones de Presa Tepetitlán y Zitácuaro se usó el método de media aritmética ya que sus datos faltantes se encontraban por debajo del 10%. Mientras que para el caso de la Presa Brockman y Laguna Del Fresno se usó el método de la razón Q (Ecuaciones 3 y 4) (Barger y Nihan, 1960; WMO, 1966; WMO 1983), debido a que ambas bases de datos presentaban un faltante de información mayor al 10%.

Tabla 3. Estaciones climáticas utilizadas y sus periodos de almacenamiento de datos.

Estación	Años con registros	Número de datos mensuales que debería tener la estación	Número de datos mensuales registrados	Número de datos mensuales faltantes	Distancia a la zona de estudio (km)
Presa Brockman	1969-2018	600	534	66	26.9
Presa Tepetitlán	1961-2018	696	660	36	26.8
Laguna Del Fresno	1947-2018	864	790	74	31.1
Zitácuaro	1921-1970	600	580	20	25.9

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N a_i} -$$

Ecuación. 3. Cálculo de la razón q.

Donde:

N= número de registros en cada estación.

Bi = registro de precipitación i de la estación B

ai = registro de precipitación i de la estación A

Y para el cálculo del dato faltante se tiene:

$$b_j = qa_j$$

Ecuación. 4. Cálculo de la precipitación estimada para un día faltante.

Dónde:

b_j precipitación estimada para el día faltante j

a_j precipitación registrada en la estación de referencia el día j

Cabe resaltar que para completar las series de datos con este método se dividieron las series de datos de la Presa Brockman y Laguna Del Fresno en dos, tomando al año 1970 como el punto de referencia. Las series de datos previas al año 1970 se completaron con la serie de datos de la estación Zitácuaro. Del mismo modo las series de datos posteriores al año 1970 se completaron con la serie de datos de la estación Presa Tepetitlán.

Posteriormente con los datos de precipitación media mensual se calculó la precipitación acumulada anual para cada estación. Finalmente, al realizar la media de los datos de cada estación se calculó la precipitación acumulada anual en la zona.

Capítulo 5 Resultados

5.1 Caracterización geológica

La descripción de las rocas en laboratorio permitió identificar que en la zona de estudio solo se encuentran dos unidades de rocas: la andesita de Anganguero (Figura 32a) y una unidad de brechas andesíticas (Figura 32c). Las andesitas tenían una matriz vítrea de color gris oscuro, textura porfídica, con minerales inequigranulares, tales como plagioclasas, piroxenos, anfíboles considerablemente más pequeños que el resto de los minerales y minerales de Fe oxidados. En algunas zonas (Figura 34 y Anexo 4), las fracturas están rellenas de cuarzo con un hábito botroidal (Figuras 33d y 35a). Mientras que en otras zonas (Figura 40) se observó una tonalidad azul celeste debido a alguna impureza (Figura 32b y 35b). La brecha andesítica se encontraba en un alto grado de alteración que no se pudo diferenciar ningún mineral, aunque fue posible observar fragmentos líticos de andesitas, sub-angulosos, color gris-café, de tamaño gravas gruesas en una

matriz color café rojizo. Además, se encontró que, en algunas zonas (Figura 34 y Anexo 4) la brecha andesítica tiene fracturas rellenas de arcillas color amarillo (Figura 35c). Cabe señalarse que, de manera general la brecha andesítica se encontraba en un grado de alteración mucho mayor que la andesita a lo largo de la zona de estudio. Además, se encontraron depósitos de aluvión.

Para una mejor apreciación de la geología en la zona se trazaron 18 perfiles los cuales son señalados en la Figura 36. Así mismo, la fractura encontrada y las interpretadas (Figura 33) en la zona de estudio difirieron de las presentadas en fuentes consultadas (Figura 37)

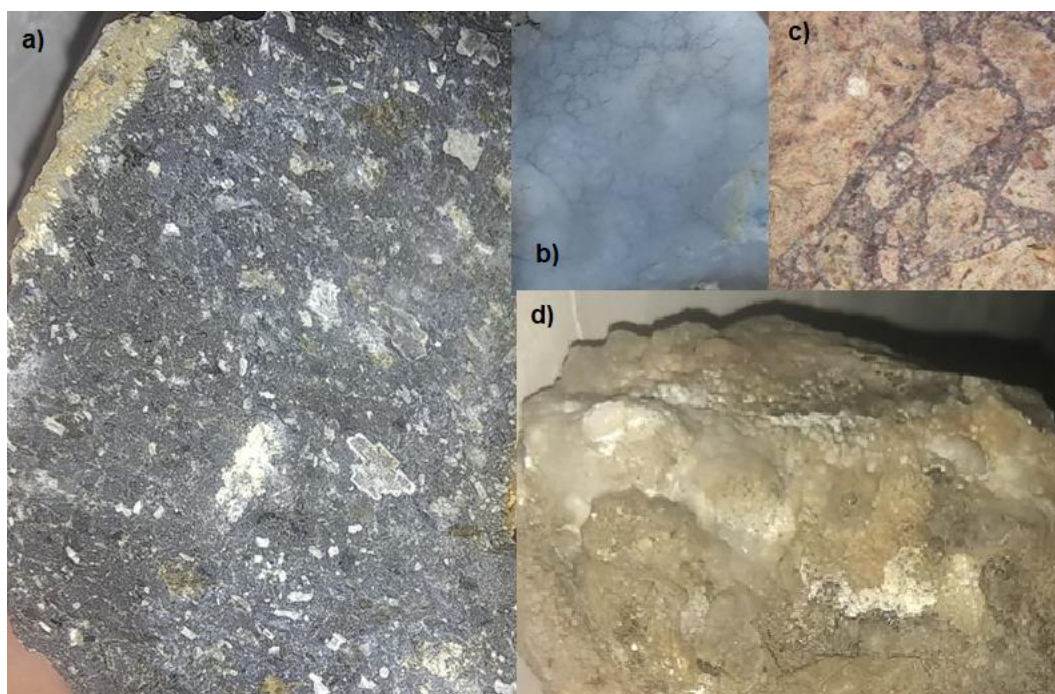


Figura 32. Muestras de la geología en la zona de estudio. a) Andesita en la que se observan grandes cristales de plagioclasas en una matriz gris oscura con minerales solo visibles con microscopio; b) Cuarzo botroidal con coloración azul celeste que se puede encontrar relleno de las grietas de la andesita; c) Brecha andesítica con líticos sub redondeados de color café en una matriz rojiza; d) Cuarzo botroidal más presente en las grietas de la andesita.

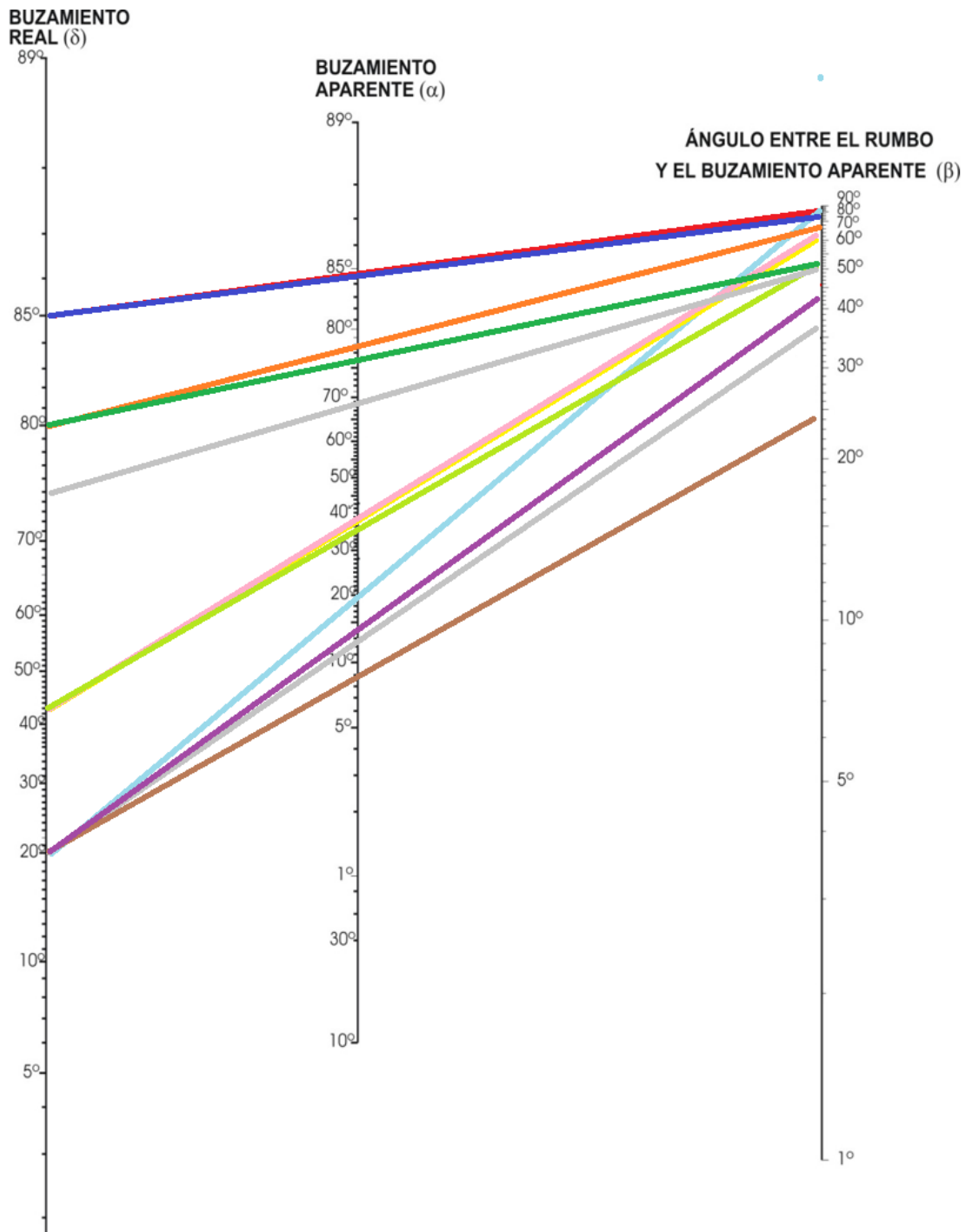
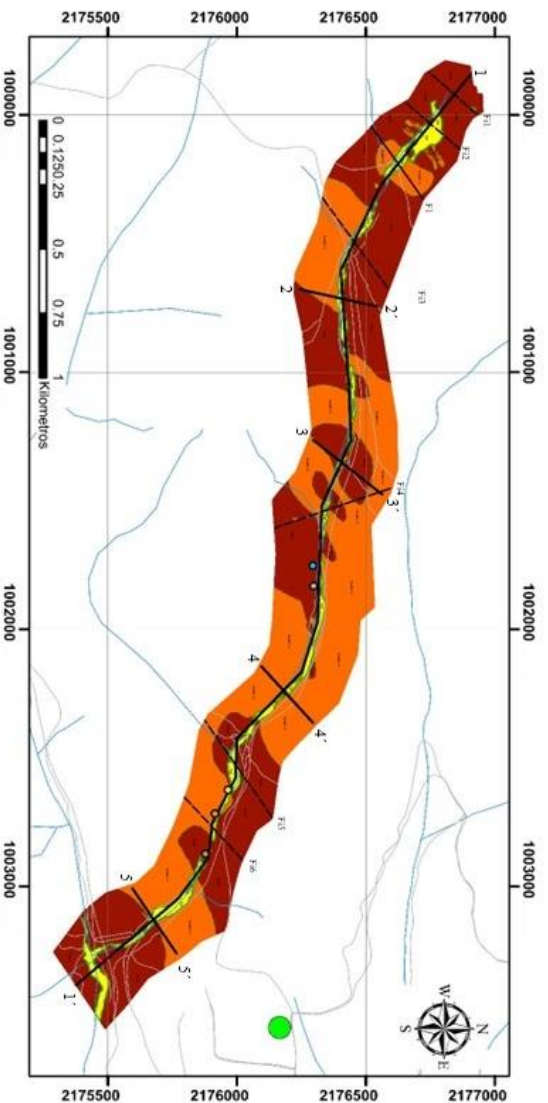


Figura 33. Diagrama de alineación. Donde, la línea roja representa a la F_{i1} en el perfil a-a', la línea azul claro a la F_{i2} en el perfil a-a', la línea azul oscuro a la F_1 en el perfil a-a', la línea amarilla a la F_{i3} en el perfil a-a', la línea naranja a la F_{i4} en el perfil a-a', la línea gris claro a la F_{i5} en el perfil a-a', la línea gris oscuro a la F_{i6} en el perfil a-a', la línea rosa a la F_{i3} en el perfil e-e', la línea verde claro a la F_{i3} en el perfil f-f', la línea verde oscuro a la F_{i4} en el perfil i-i', la línea café a la F_{i5} en el perfil m-m' y la línea morada a la F_{i5} en el perfil n-n'. Modificado de Camargo (2011).

Mapa Geológico de la cañada del Río Rancho Verde



RESUMEN

La cañada del Río Rancho Verde se encuentra en los límites del este de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, en el Estado de México, siendo a su vez parte de la Faja Volcánica Transmexicana y tiene climas dominantes templados y semiáridos con diferentes niveles de humedad, precipitación anual de entre 700 y 1250mm y una temperatura anual de 22°C.

En la zona solo se encuentran dos tipos de rocas aflorando, como andesitas y brechas andesíticas. Las andesitas tenían una matriz vínea de color gris oscuro, textura porfídica, con minerales inagregados, tales como plagioclasas, piroxenos, anfíboles considerablemente más pequeños que el resto de minerales y minerales de Fe oxidados. Estas andesitas llegaban a presentar fracturas rellenas de cuarzo con un hábito botroidal, también con cuarzo botroidal que presentaba una tonalidad azul celeste por alguna impureza. Las andesitas eran parte de la unidad andesítica de Aranzague la cual corresponde al Mioceno con una edad de entre 17.6 y 13.1 Ma (SGM, 2000), la cual se encontraba intercalada con una unidad de brecha andesítica.

La brecha andesítica estaba tan alterada que no se pudo diferenciar ningún mineral, solo fue posible observar que los fragmentos líticos de andesitas, sub-angulosos, de color gris-café, de tamaño gran gruesa en una matriz color café rojizo. Además, la brecha andesítica presentaba algunas fracturas rellenas de arcillas color amarillo. La brecha andesítica se tiene registrada como los últimos episodios de vulcanismo del Mioceno (SGM, 2000).

Los depósitos de aluvión corresponden principalmente a depósitos de ramblón en masa.

Simbología	
Cuaternario	Aluvión
Neógeno	Andesita
	Brecha andesítica
Relleno en fracturas	
	Cuarzo botroidal
	Cuarzo botroidal azulado
	Finos de color amarillo
	Finos de color crema-café
Simbolos topográficos	
	Caminos
	Poblado Las Canoas
	Comentes
Elementos estructurales	
	Fractura
	Fractura inferida
	Línea de perfil
	Contacto geológico
	Contacto geológico infiendo

ERA	PERIODO	ÉPOCA FISO		EJEMPLO
		MIOCENO	PLIOCENO	
CENOZOICO	CUATERNARIO	COLIMANA		1.16
		NEOGENO	MIOCENO	

ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS GEOLÓGICAS Y MINERAS
ígga | **Elaboración propia**

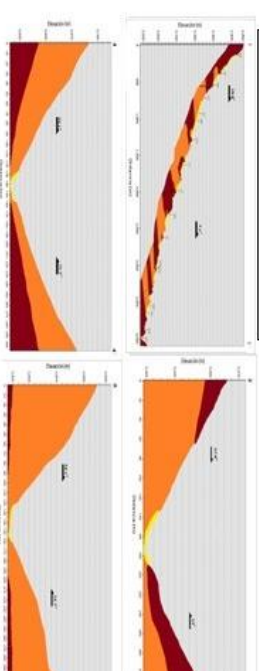
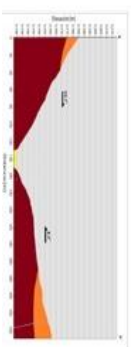


Figura 34. Mapa geológico de la zona de estudio, las edades de las unidades fueron basadas en lo descrito por Servicio Geológico Mexicano (2000) y Servicio Geológico Mexicano (2007).

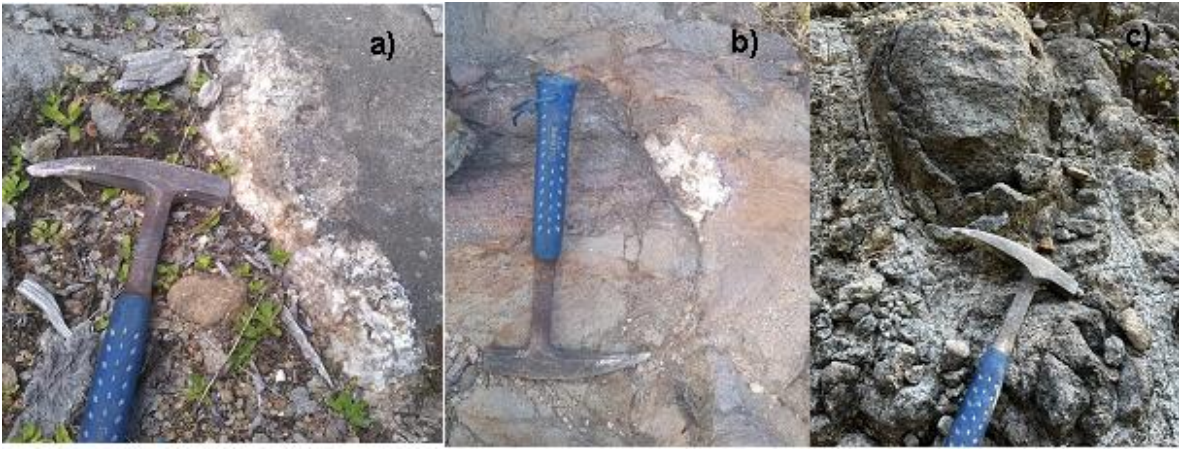


Figura 35. Fracturas rellenas en andesitas. a) Cuarzo botroidal; b) Cuarzo botroidal con una tonalidad azul; c) Finos de color crema-café con una costra oxidada con tonalidad grisácea.

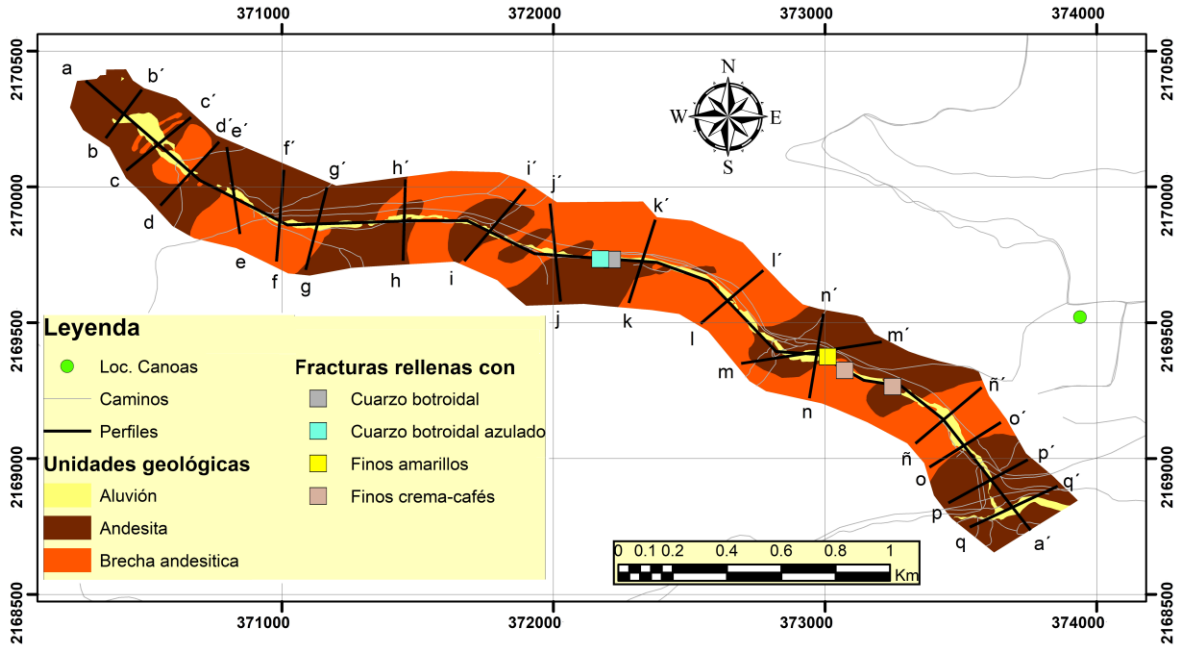


Figura 36. Distribución geográfica de las zonas donde se muestran los perfiles realizados.

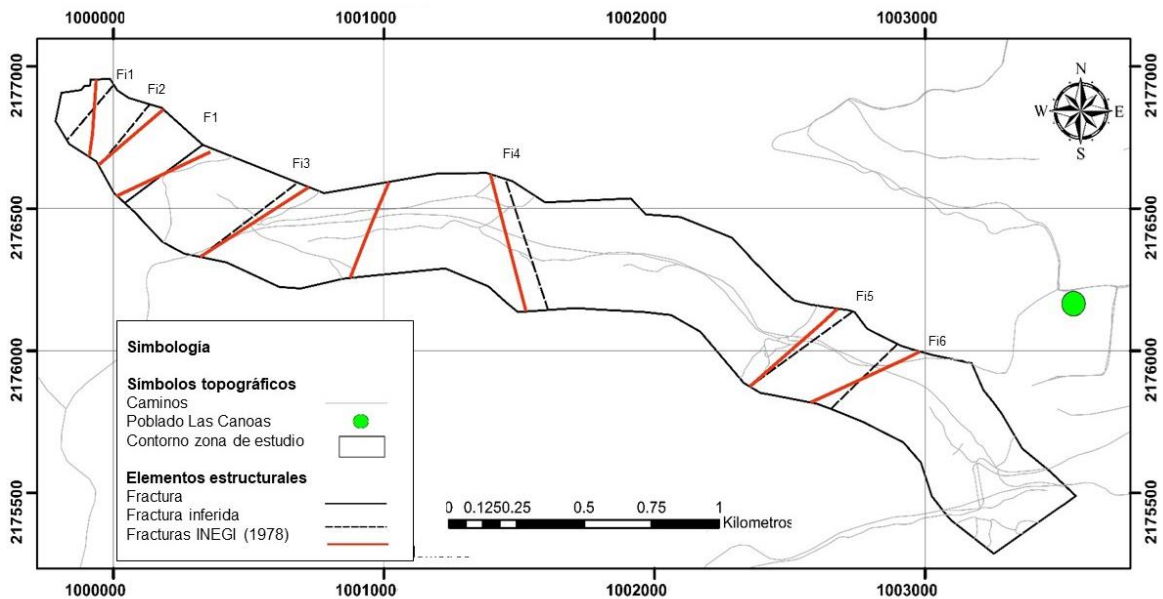


Figura 37. Comparación entre las fracturas reportadas por INEGI (1978) vs las fracturas encontradas en el presente trabajo.

Los polos de los datos estructurales (Figura 38a) muestran una agrupación (Figura 38b) que permite diferenciar tres familias de fracturas, las cuales son suroeste-noreste, noreste-suroeste y noroeste-sureste. Los rumbos y echados inferidos para las fracturas regionales (Figura 38c), entran dentro de estas tres familias de fracturas y también se obtuvo el diagrama de rosa (Figura 38d). La presencia de estas familias de fracturas propicia la formación de cuñas en el macizo rocoso, lo que afecta a la estabilidad de este.

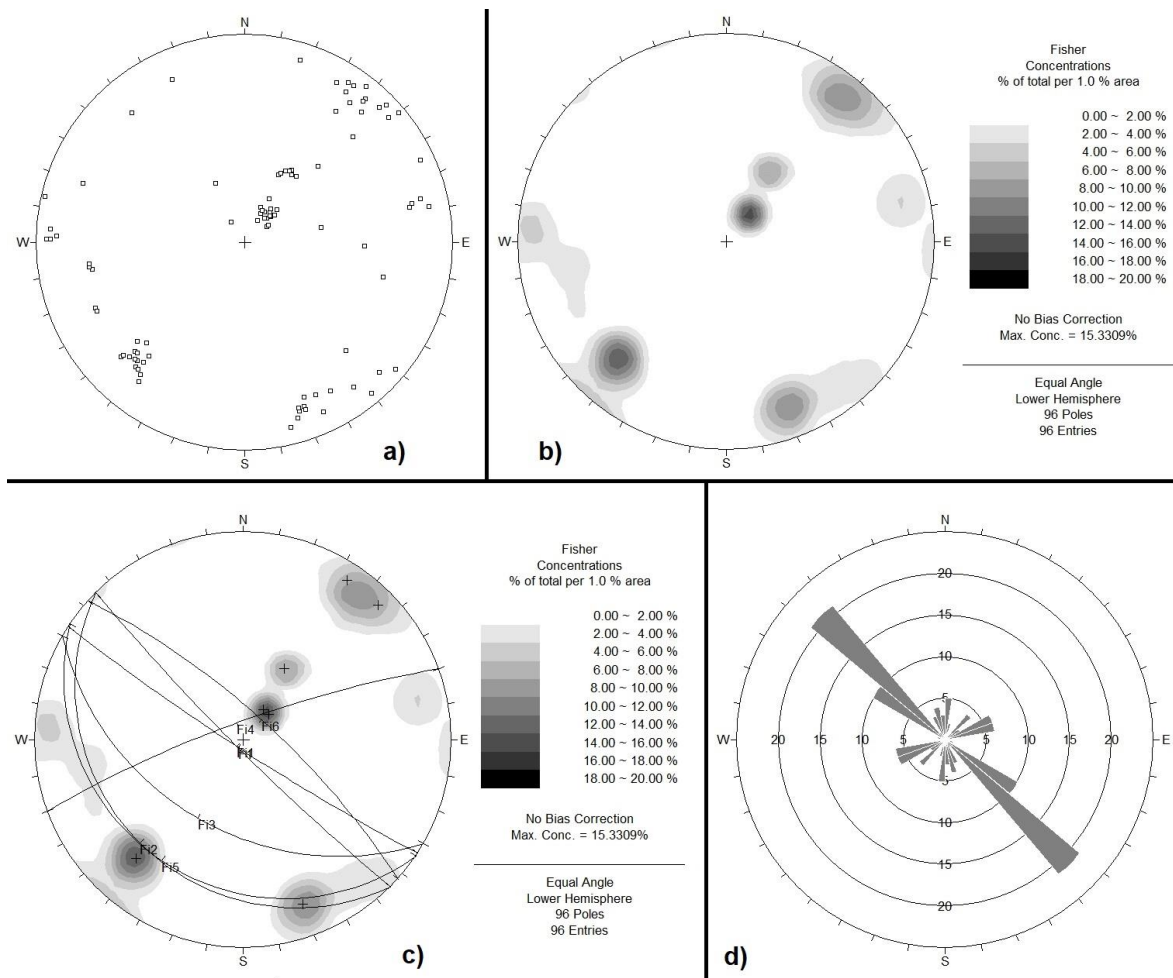


Figura 38. Representación gráfica elaborada en Dips de los datos estructurales tomados de las fracturas presentes en el macizo rocoso de la Andesita de Angangueo en la zona de estudio. a) Se observan los datos ploteados como polos; b) Se refiere a la concentración de los polos; c) Concentración de polos con los planos de las fracturas inferidas y la fractura encontrada en la zona de estudio; d) Diagrama de rosa de los datos tomados en campo.

Una vez se introdujeron los puntos marcados con el GPS al programa ArcMap, se realizó el delimitado de los contactos geológicos con lo observado en campo obteniendo el mapa mostrado en la Figura 40. En el mapa se observa una distribución de la brecha andesítica, la cual se encuentra intercalada con la andesita, y las ubicaciones de depósitos de aluvión, que corresponden principalmente a los depósitos del PRM, que debido al tamaño que presentaron no fueron representados en los mapas consultados de INEGI (1978) y SGM (2000).

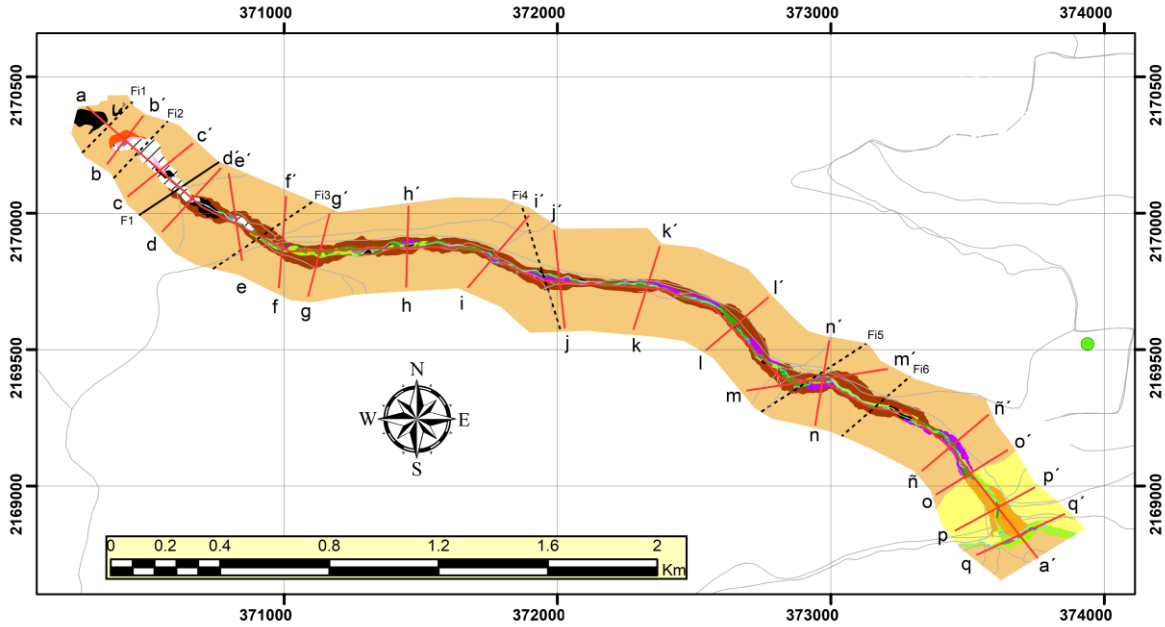
5.2 Caracterización geomorfológica

Alrededor del 80% del área de estudio no fue afectada significativamente por el PRM estudiado y se describió como laderas medias y laderas tendidas (Figura 39 y Anexo 5). Las geoformas resultantes en la zona afectada por el PRM son ladera media erosiva, ladera tendida erosiva, terraza de alta erosión y terraza de baja erosión (tabla 4). Entre las geoformas resultantes en la zona con interacción con el PRM, predominan las laderas medias erosivas, seguidas por las terrazas fuertemente erosionadas y las terrazas de baja erosión. Fue posible diferenciar a las geoformas en tres grupos las que son resultado de procesos fluviales, las asociadas al PRM ocurrido en el cauce del Río Rancho Verde y aquellas geoformas resultado de procesos antrópicos y erosivos-denudativos. Estos tres grupos están conformados de la siguiente manera:

- Principalmente asociadas a procesos fluviales: cauce activo, depósito de ladera erosionado, isleta, superficie de roca madre, terraza de baja erosión y terraza de alta erosión. Representan el 5.54% de la zona de estudio.
- Principalmente asociadas al PRM ocurrido en el cauce del Río Rancho Verde: cabecera, cuerpo de deslizamiento, cúmulo de cantos rodados, deslizamiento superficial, lóbulo de deslizamiento y plano de ruptura. Representan el 3.24 % de la zona de estudio.
- Principalmente asociadas a procesos antrópicos y erosivos-denudativos: gavión, ladera media, ladera media erosionada, ladera tendida y ladera tendida erosionada. Representan el 91.22% de la zona de estudio.

En la Figura 40 se presenta un contexto de la jerarquía de los órdenes de los ríos que atraviesan la zona de estudio (Strahler, 1957). Lo cual indica que el PRM inició cerca del punto donde el cauce principal tuvo transición del orden 1 al orden 2. Mientras, que el origen del cauce con mayor caudal (orden 4) se encontró fuera de la zona de estudio e interactuó con el PRM únicamente en la parte más baja de la zona de estudio.

Mapa geomorfológico de la cañada del Río Rancho Verde, Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, Estado de México.



Leyenda

● Loc. Canoas	■ Gavión
— Perfiles	■ Isleta
— Caminos	■ Ladera media
— Fractura	■ Ladera media erosiva
..... Fractura inferida	■ Ladera tendida
Unidades geomorfológicas	■ Ladera tendida erosiva
■ Cabecera	■ Lóbulo de deslizamiento
■ Cauce activo	■ Plano de ruptura
/// Cuerpo de deslizamiento	■ Superficie de roca madre erosionada
■ Cúmulo de cantos rodados	■ Terraza de alta erosión
■ Delizamiento superficial	■ Terraza de baja erosión
■ Depósito de flujo lateral erosionado	

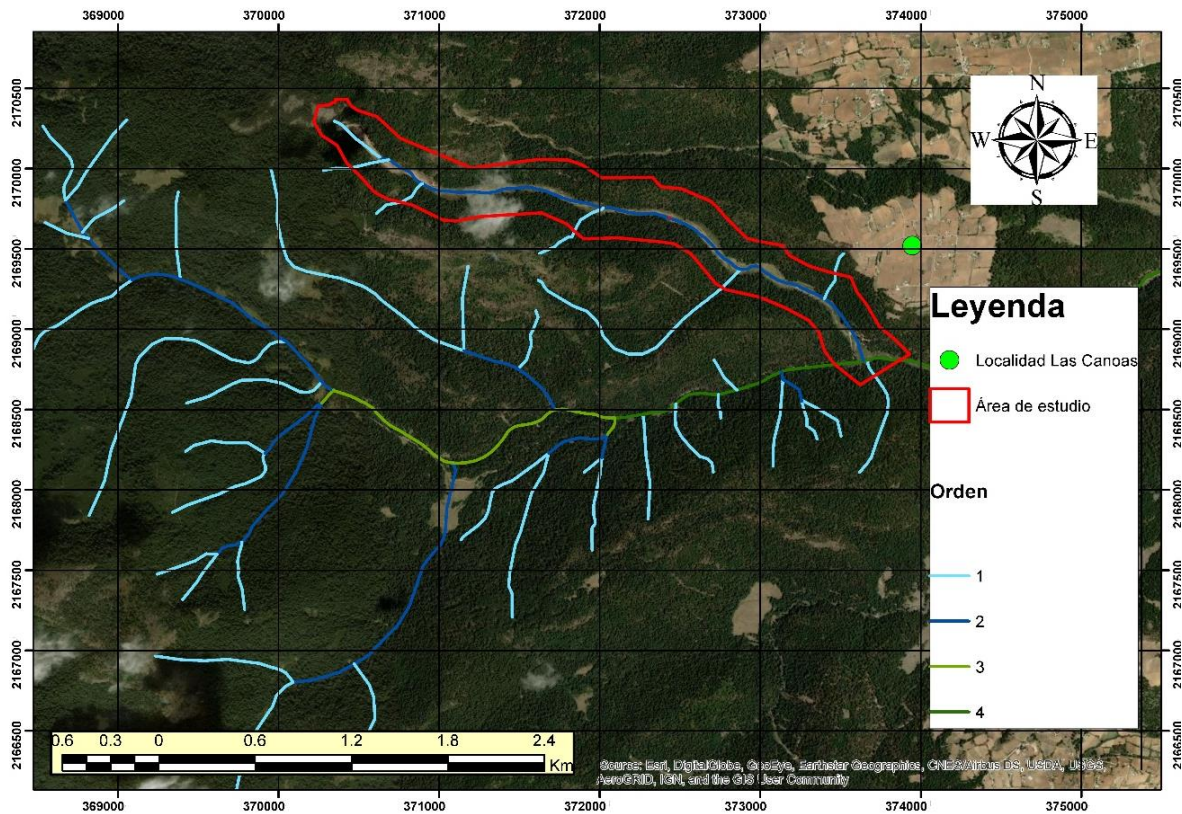


Mapa elaborado por:
Eric García Calderón

Figura 39. Mapa de las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio.

Tabla 4. Tamaño de las unidades geomórficas en la zona de estudio y su porcentaje en superficie.

Unidad	Área (m²)	Porcentaje de la zona de estudio
Cabecera	3175.23	0.23
Cauce activo	15480.40	1.12
Cuerpo de deslizamiento	17637.80	1.27
Cúmulo de cantos rodados	6715.17	0.48
Deslizamiento superficial	393.69	0.03
Depósito de flujo lateral erosionado	14877.60	1.07
Gavión	288.53	0.02
Isleta	2034.55	0.15
Ladera media	902223.00	65.07
Ladera media erosiva	106247.00	7.66
Ladera tendida	231534.00	16.70
Ladera tendida erosiva	24561.30	1.77
Lóbulo de deslizamiento	1122.74	0.08
Plano de ruptura	982.90	0.07
Superficie de roca madre erosionada	14438.30	1.04
Terraza de alta erosión	24244.20	1.75
Terraza de baja erosión	20587.10	1.48



Elaboración propia

Figura 40. Clasificación de los órdenes de Strahler de los cauces, desde su origen, que cruzan por la zona de estudio.

En el perfil a-a' (Figura 41), se sigue la topografía del cauce principal en la zona de estudio, en este perfil se observa que desde la cabecera y hasta 700 metros aguas abajo se tiene una pendiente general de 19.8°. A partir de este punto la pendiente general cambia a 7.1°.

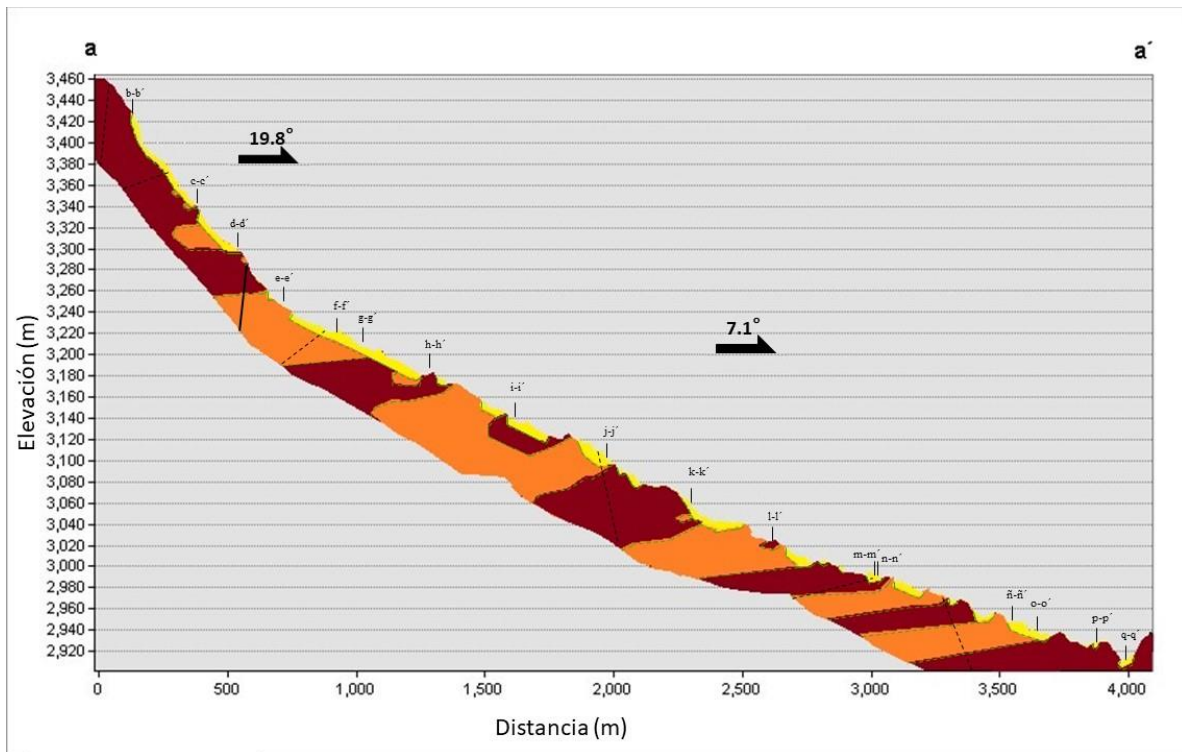


Figura 41. Perfil de la sección a-a', la cual recorre la zona de estudio siguiendo de manera general el cauce del Río Rancho Verde, donde el color café representa andesita, naranja brecha andesítica, amarillo aluvión, la línea negra la fractura en la zona, las líneas negras punteadas corresponden a las fracturas inferidas en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

En las geoformas presentes en la parte al noroeste de la zona de estudio, es posible observar un lóbulo de deslizamiento y un flujo superficial (Figura 42 a), estas geoformas indican que no se trató solo de un FD sino de un Flujo Complejo (FC) donde al observar las evidencias encontradas en la parte de la corona, se asume que el evento dio inicio con un deslizamiento rotacional, seguido de dos deslizamientos traslacionales de menor magnitud, cuyo material desprendido fue saturado por la lluvia provocando un FD, (Figura 42b). Cabe resaltar que, en este sector es donde se incrementó el orden de Strahler en el cauce principal de la zona de estudio, coincidiendo con la zona donde se desencadenó el FD.

En el perfil b-b', se observa la depresión resultante en la zona de estudio, posterior al evento ocurrido en el 2010. Así mismo, en el centro de la depresión se observa un gran cúmulo de cantos rodados y la ligera elevación del flujo superficial que se encuentra al lado del cúmulo. Además, en las zonas de ladera en este

perfil se tienen pendientes promedio de 6.3° a 8° (Figura 43). En el perfil c-c', se aprecia el estrechamiento de la depresión, con una profundidad que varía de 75 m a 60 m aproximadamente. También, se encontró el lóbulo del deslizamiento que se mantuvo en la zona, y mediante el cual es posible estimar cómo era la topografía del terreno, y la pendiente previa al evento. En esta zona las laderas tienen pendientes de 11.3° al suroeste de la zona afectada por el PRM y al noreste de 17.74° (Figura 44). En el perfil d-d', se observa como en el cuerpo del deslizamiento se encontró orientado hacia el suroeste respecto al cauce principal, las pendientes de las laderas son de aproximadamente de 20.3° al suroeste con respecto al cauce principal y al noreste del cauce principal de 10.2° (Figura 45).



Figura 42. Fotografías de la zona de estudio, donde la línea negra señala los límites de la unidad geomorfológica. a) Delimitación del lóbulo de deslizamiento; b) Delimitación del deslizamiento superficial.

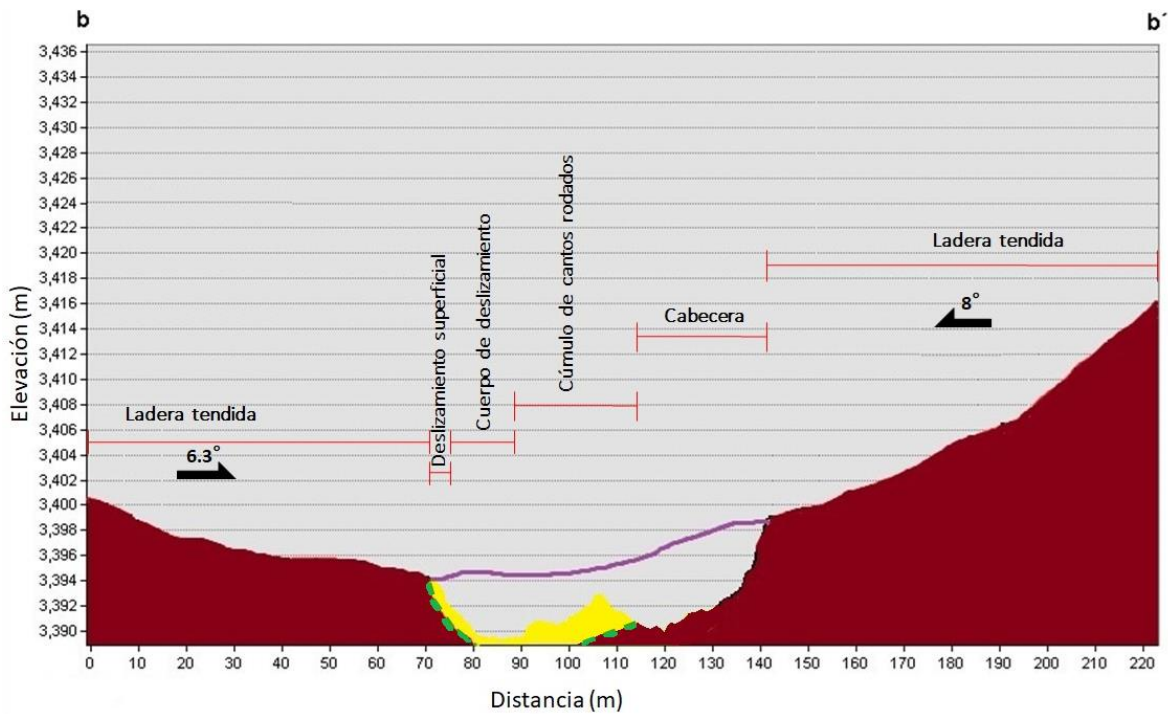


Figura 43. Perfil de la sección b-b', donde el color café representa andesita, el color amarillo indica el aluvión, la línea morada representa la estimación del terreno previa al PRM y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

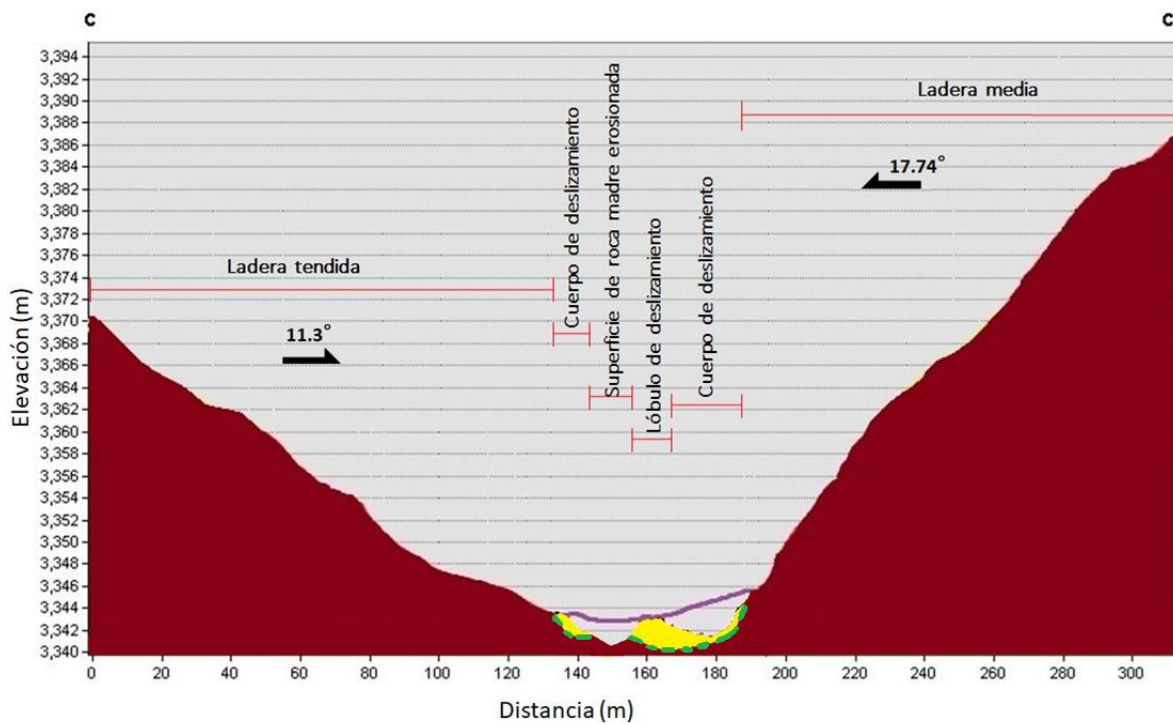


Figura 44. Perfil de la sección c-c', donde el color café representa andesita, el color amarillo indica el aluvión, la línea morada representa la estimación del terreno previa al PRM y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

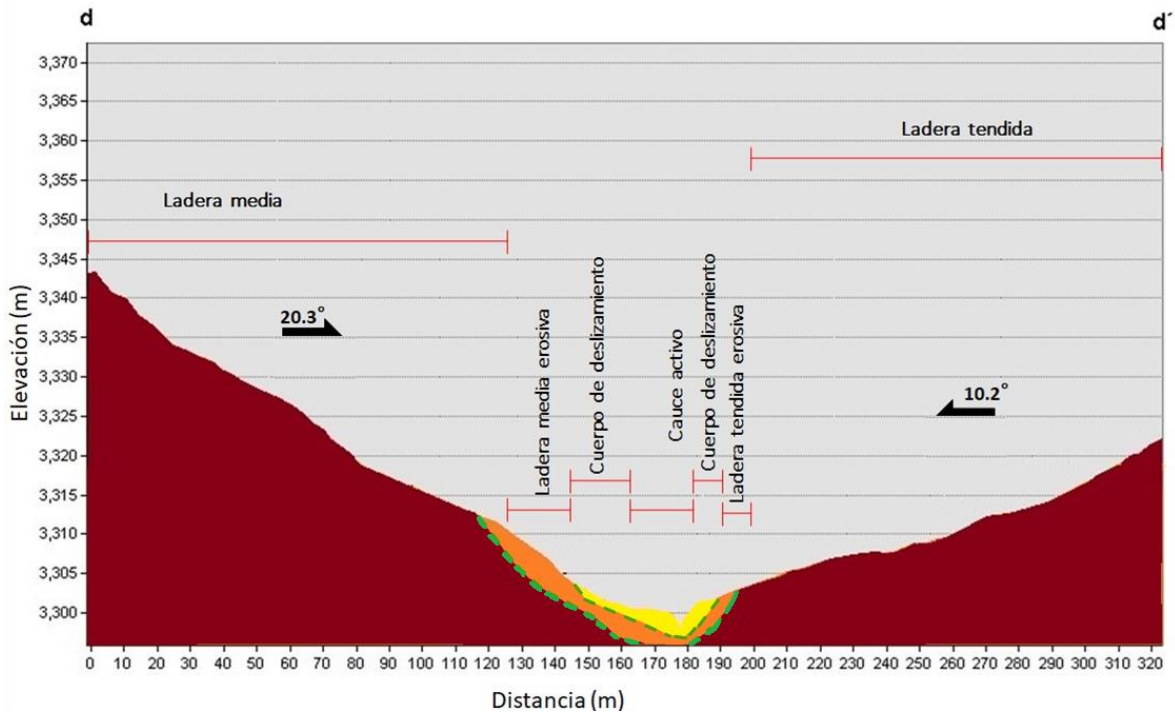


Figura 45. Perfil de la sección d-d', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

En la porción entre la sección d-d' y g-g' se observa la mayor parte de la zona donde se desestabilizó el talud al iniciar el FD, dejando la roca madre expuesta, y evidenciando lo altamente intemperizada que se encontraba y resaltando las tres familias de fracturas que la componen, las cuales al combinarse con el nacimiento de agua propiciaron que la desestabilización afectara una gran parte del material que posteriormente lubricó la superficie de contacto. Además, se observan las primeras terrazas en la zona media del tramo donde el flujo cambió ligeramente de dirección, en un ángulo agudo hacia el norte respecto al este. Así mismo se encuentra un depósito de flujo lateral erosionado, el cual se encuentra a 420 m del depósito de flujo lateral erosionado más cercano.

En el perfil e-e', nuevamente se observa un estrechamiento de la depresión, a 30 m aproximadamente. También, se resaltan características morfológicas propias de la ladera suroeste (con respecto al cauce principal), por ejemplo, que tiene una pendiente de 4.6° y al noreste 22.8°. Por otro lado, se puede apreciar cómo en el cúmulo de cantos rodados el terreno es ligeramente

plano (Figura 46). En el perfil f-f', se observa un ensanchamiento de la depresión que alcanza los 80 m aproximadamente. Por otro lado, al norte del cauce principal se tiene un depósito de flujo lateral erosionado que es más antiguo que el evento del 2010. Las pendientes de las laderas suroeste y noreste en esta unidad corresponden a 14° y 17.8° , respectivamente (Figura 47). En el perfil g-g', se observan las terrazas de alta y baja erosión al sur del cauce principal. La inclinación de las laderas en esta zona corresponde a 17.8° en la ladera al suroeste y 14° noreste con respecto al cauce principal (Figura 48).

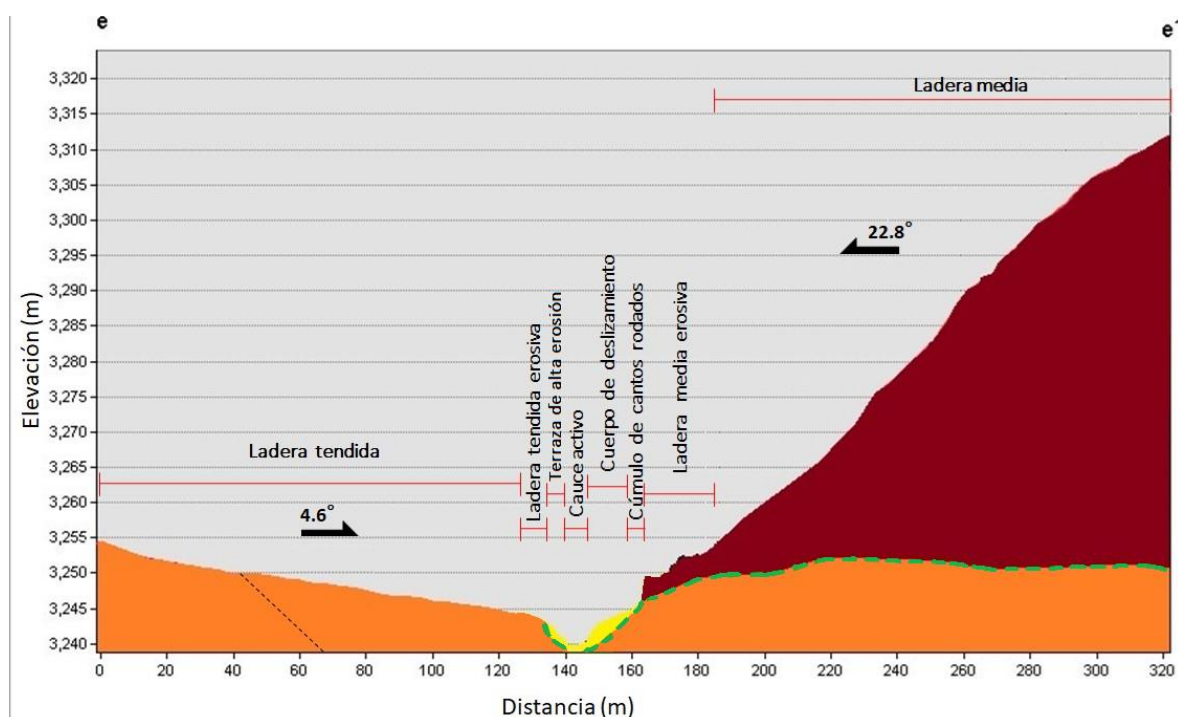


Figura 46. Perfil de la sección e-e', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión, la línea negra punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

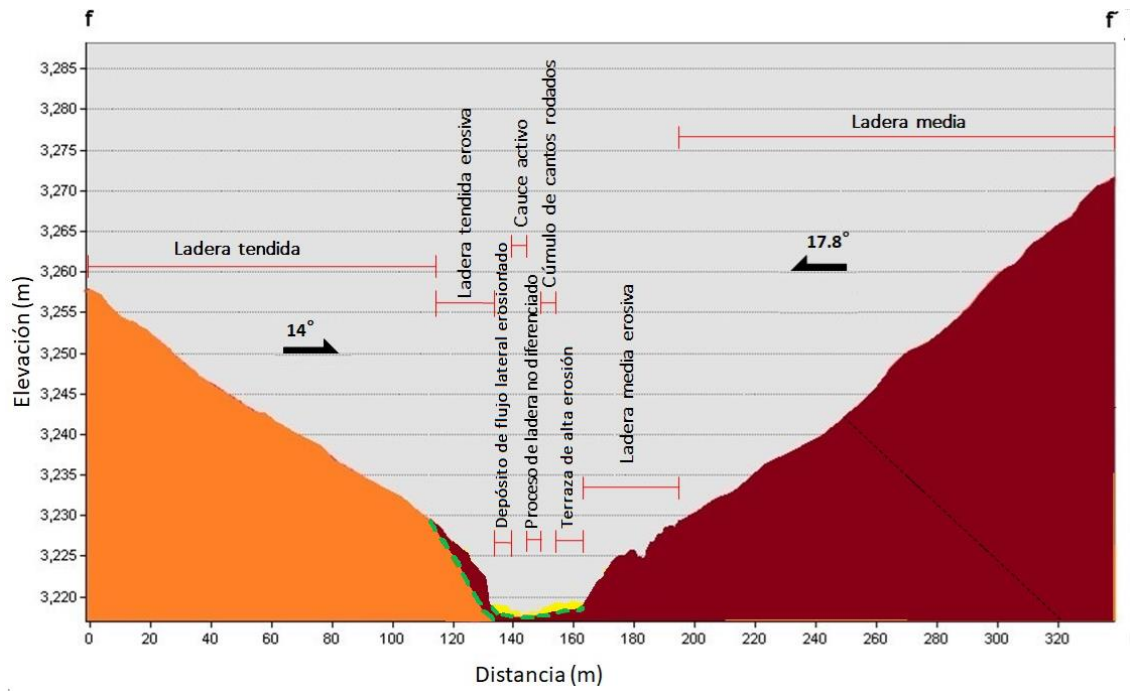


Figura 47. Perfil de la sección f-f', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica aluvión, la línea negra punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

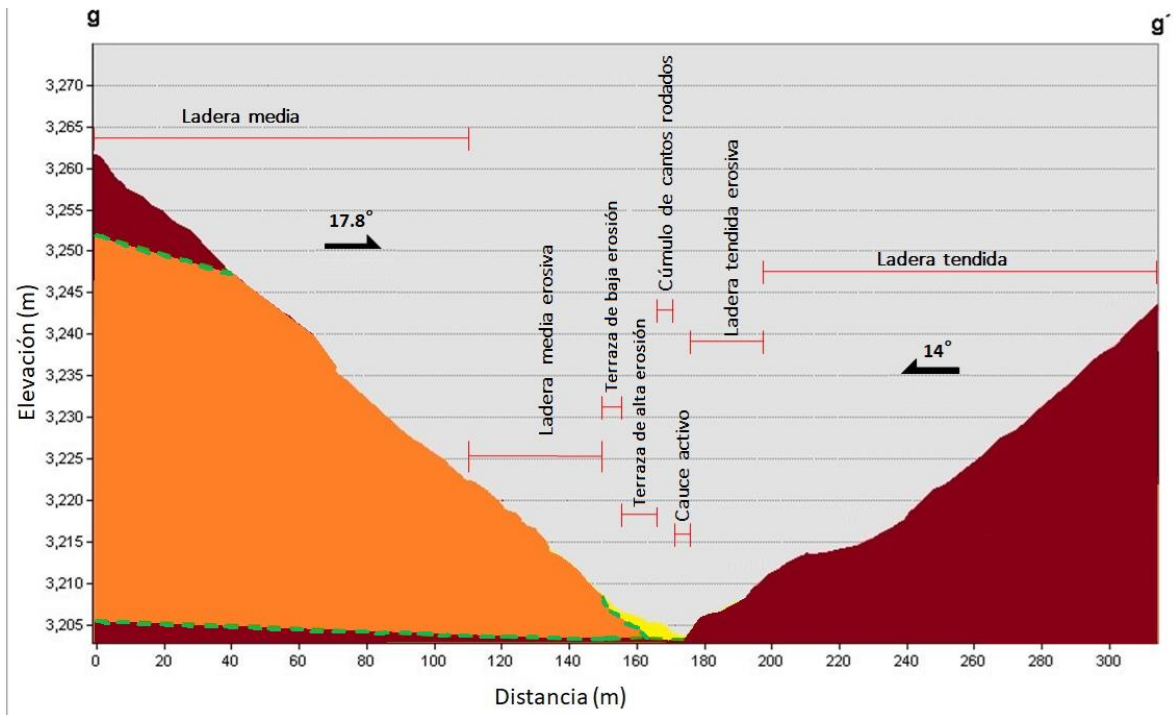


Figura 48. Perfil de la sección g-g', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

En la porción entre la sección g-g' y j-j', se aprecian claramente las terrazas, y una isleta cerca de un cúmulo de cantos rodados de un tamaño considerado. La isleta originalmente debió tratarse de una porción del terreno que por su vegetación soportó la influencia del PRM el cual dejó una acumulación de cantos rodados a algunos metros aguas abajo por la pérdida de energía durante la colisión con este tramo; con el paso del tiempo los procesos fluviales de carácter erosivo generaron la bifurcación del cauce principal formando la isleta, y pocos metros aguas arriba se incorpora otro cauce tributario. Además, se observan dos depósitos de flujo lateral erosionado, separados entre sí por 400 m. Estos depósitos son más antiguos que el FC del 2010, debido a la intemperización del material, crecimiento de vegetación, desarrollo de suelos y porque fueron erosionados por el FC del 2010 (Figura 49).

En el perfil h-h', se tiene un ancho aproximado de 40 m; al sur del cauce principal se encuentra una zona de roca madre expuesta y lo que corresponde a una terraza muy angosta. Al norte se encontró lo que podría ser un proceso de ladera, aunque no fue diferenciado el proceso. La pendiente al sur del cauce principal es de aproximadamente 19.81° y al norte de 23.3° (Figura 50). En el perfil i-i', se observa una isleta, la única que no tiene terrazas a sus laterales debido al angosto cauce principal, la ladera al suroeste y noreste de la terraza tienen una pendiente de 24.7° y 8.5° , respectivamente (Figura 51). En el perfil j-j', la depresión tiene un ancho aproximado de 40 m, y al sur del cauce principal se encuentra un depósito de ladera erosionado; la ladera al sur del cauce principal tiene una pendiente 15.6° y al norte 18.8° (Figura 52).



Figura 49. Depósito de un deslizamiento de ladera, presumiblemente, más antiguo que el PRM ocurrido en el 2010.

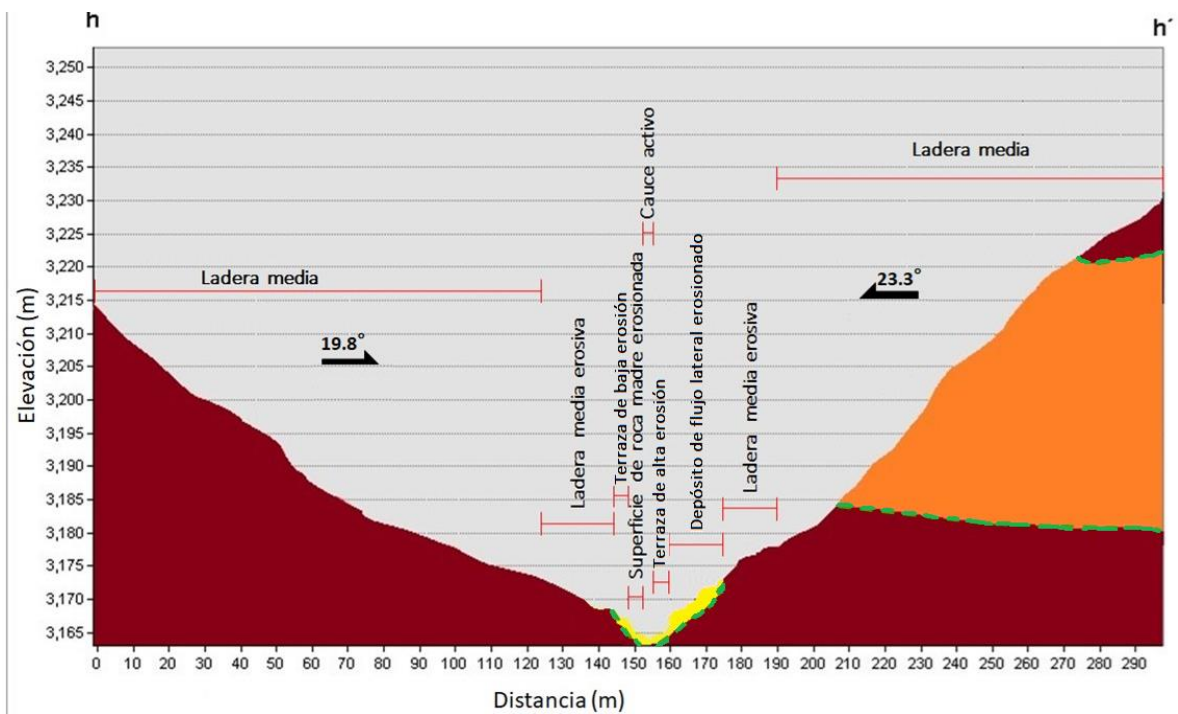


Figura 50. Perfil de la sección h-h', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

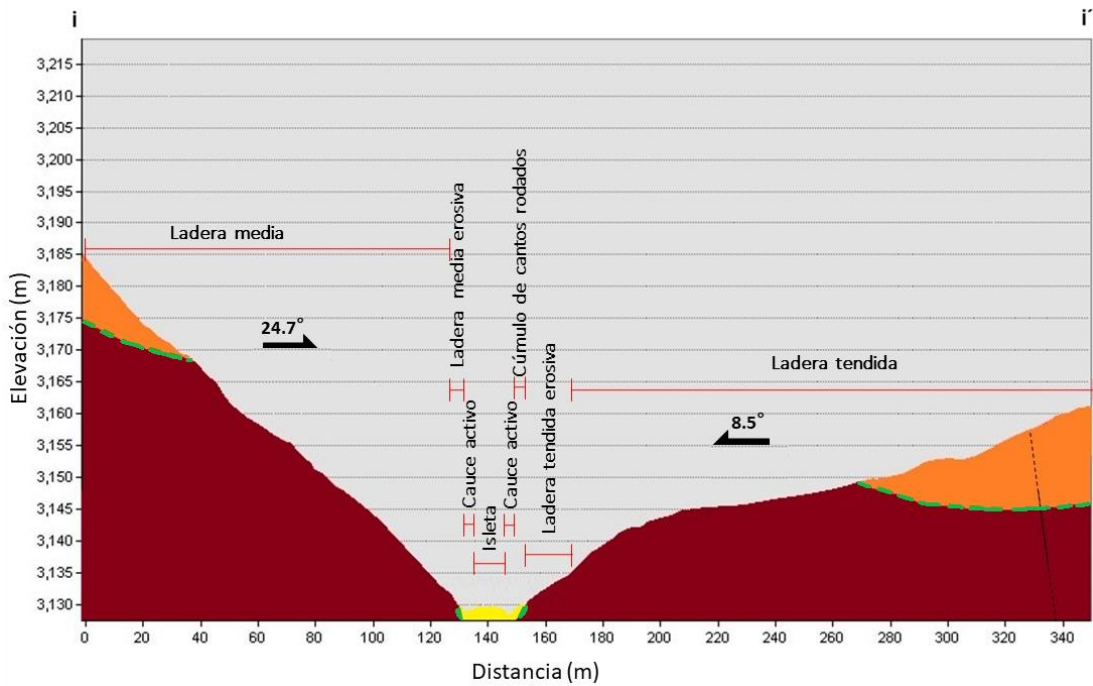


Figura 51. Perfil de la sección i-i', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión, la línea negra punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

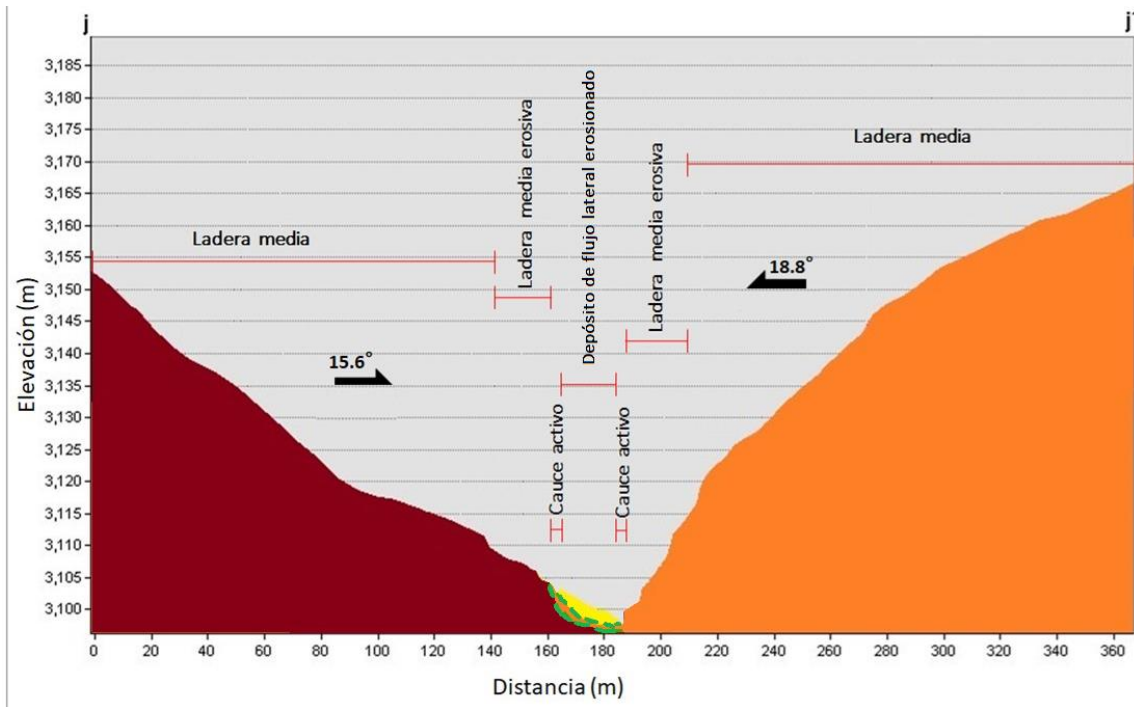


Figura 52. Perfil de la sección j-j', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

Entre los perfiles k-k' y l-l' se encontró el segundo depósito de flujo lateral erosionado más grande, con 326 m de longitud, el cual por la erosión esta discontinuo en la cartografía.

En el perfil k-k', al norte del cauce principal se pueden apreciar que, el cúmulo de cantos rodados y el depósito de flujo lateral erosionado son bastante planos. Por otro lado, respecto al cauce principal al sur y al norte se tiene una pendiente de 20.3° y 28.4°, respectivamente (Figura 53). En el perfil l-l', se observa al norte del cauce principal una unidad de roca madre erosionada que sobresale de una gran terraza de alta erosión; las laderas al suroeste y al noreste respecto al cauce principal tienen una pendiente de 30.1° y 21.3°, respectivamente (Figura 54).

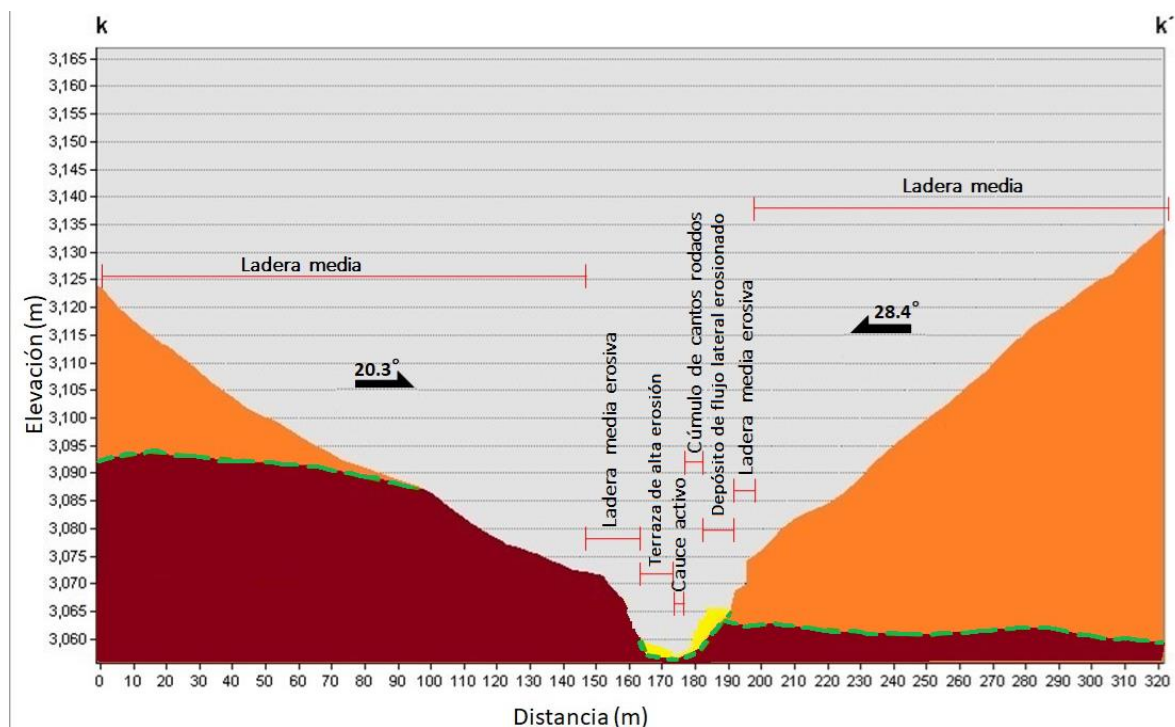


Figura 53. Perfil de la sección k-k', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

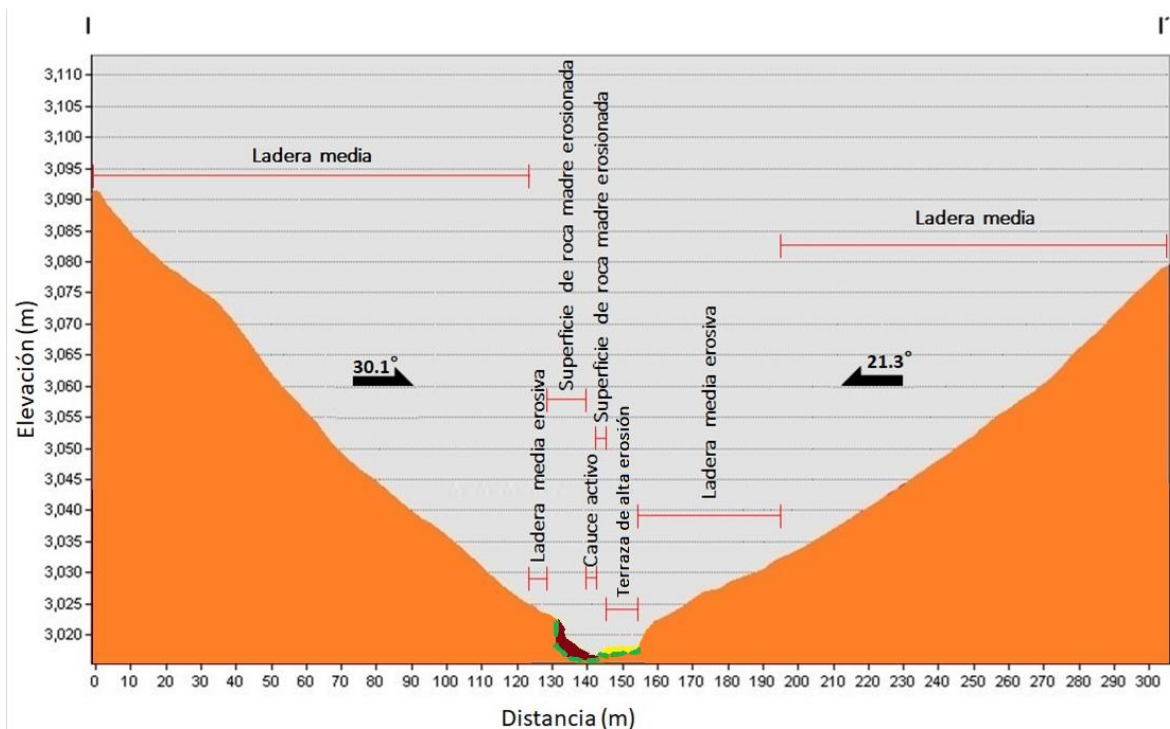


Figura 54. Perfil de la sección I-I', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

En la porción entre los perfiles I-I' y n-n' nuevamente la topografía previa provocó un cambio en la dirección del cauce principal y el FC, rodeando un depósito de otro PRM, dando como resultado una terraza de grandes dimensiones antes de este cambio de dirección. En esta zona los cauces presentes en la zona cortaron el depósito de otro PRM formando una isleta, y posteriormente se evidencia una clara disminución del ancho en las terrazas en estas unidades se encontraron árboles jóvenes con arqueamientos (Figuras 55a y 55b). Además, se interpretan dos depósitos de flujo lateral erosionado estando a 100 m de distancia entre sí, uno de ellos discontinuo a causa de la misma erosión, se interpretaron dos depósitos diferentes por la disposición de los materiales, es decir la dirección en la que se interpretó el movimiento del material al depositarse.

Los perfiles m-m' y n-n' (Figuras 56 y 57) están enfocados en mostrar a la isleta respecto a las terrazas y el depósito de ladera erosionado, en el caso de m-m' se aprecia que la terraza y la ladera no tienen una diferencia significativa de pendientes, y la isleta presenta árboles juveniles, los cuales en campo se confirmó

tienen ligeras inclinaciones en el tronco, lo cual es un indicador de que el terreno sigue siendo inestable. Con respecto al perfil n-n' se muestra el corte al depósito de ladera erosionado, este corte fue generado por el cauce tributario. Referente a la isleta el cauce principal que la rodea por el norte es más profunda que el del sur, además, dejó una terraza con muy baja pendiente, la cual puede ser identificada únicamente con apoyo de la percepción remota pudo haberse interpretado como parte del depósito de ladera erosionado, pero con el trabajo de campo se confirmó que se trata de una terraza de baja erosión; la ladera al sur del cauce principal tiene una pendiente de 19.3° y al norte de 22.8° .



Figura 55. Troncos de árboles juveniles con curvatura. a) Se observa un arqueamiento más pronunciado (en isleta); b) Se observa un ligero arqueamiento que afecta solo la base del tronco (en terraza de baja erosión).

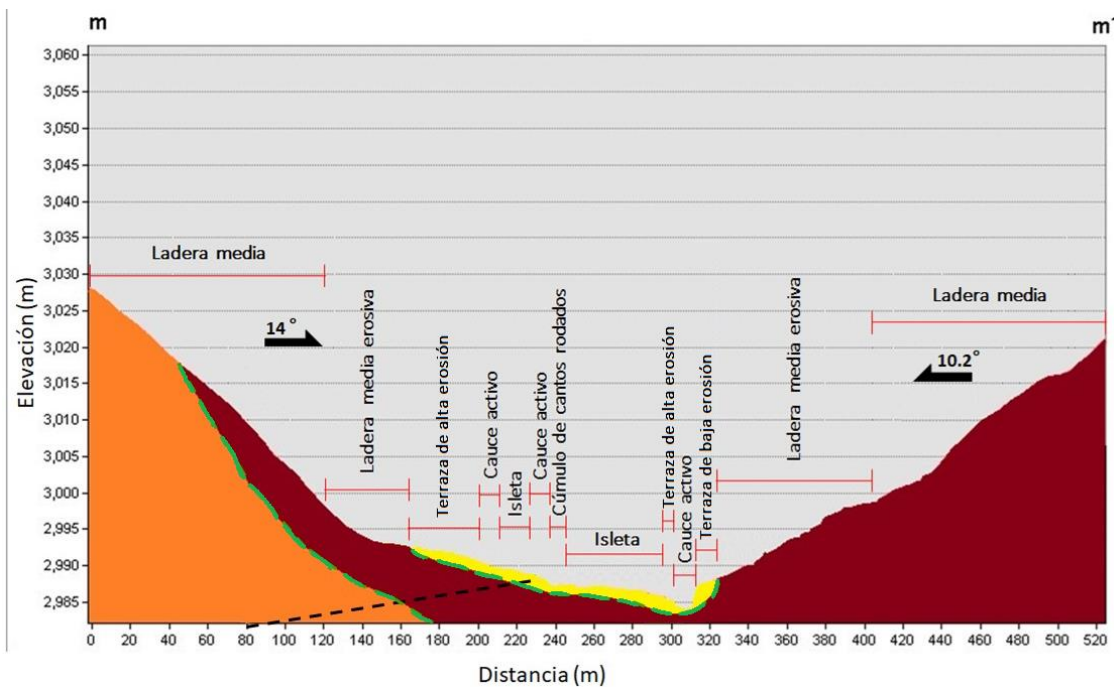


Figura 56. Perfil de la sección m-m', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión, la línea negra punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

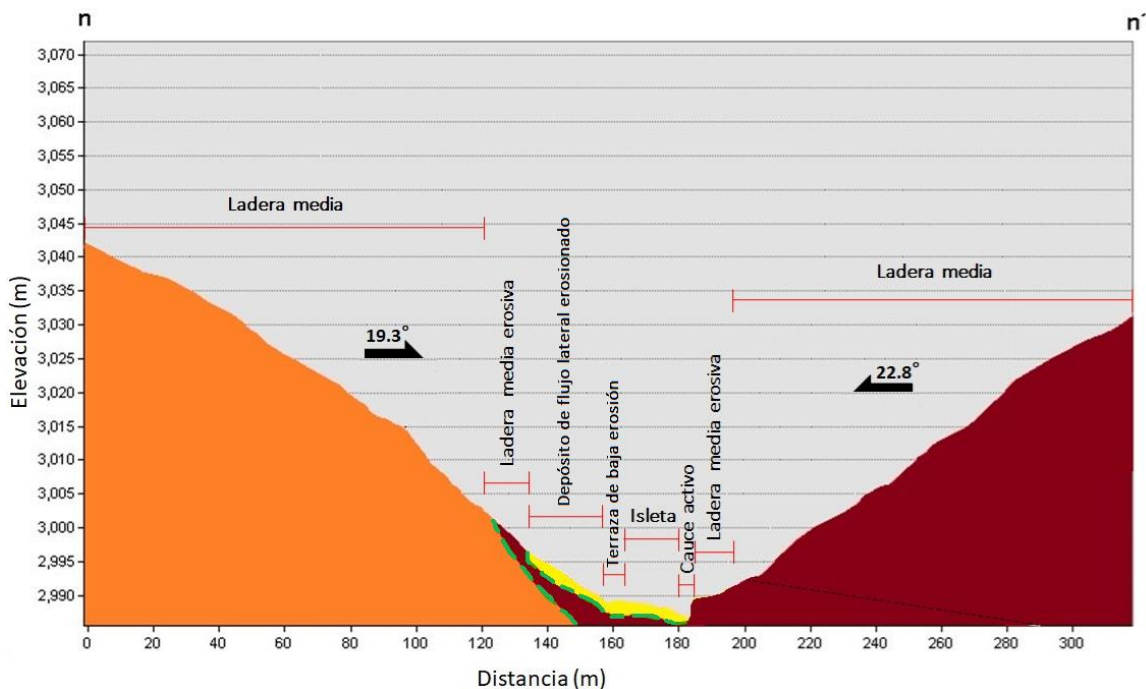


Figura 57. Perfil de la sección n-n', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión, la línea negra punteada corresponde a la fractura inferida en la zona y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

Desde la porción entre el perfil n-n' hasta el fin de la zona de estudio se observa un ensanchamiento de las terrazas así como una gran zona de roca madre descubierta. En el medio del tramo hay una zona donde el ancho de la depresión se hace mucho más angosto, posterior a esto se tiene una isleta y el depósito de flujo lateral erosionado más grande presentando 345m de longitud, aunque se encuentre segmentado por la erosión. Además, en la porción baja de la zona de estudio las terrazas son angostas contrario a lo observado durante la interpretación basada en percepción remota. Finalmente, el cauce principal se une casi perpendicularmente con un cauce tributario; al encontrarse estos cauces las terrazas vuelven a ensancharse. También, se intuye que debido a la ausencia de grandes depósitos provenientes del flujo complejo, existe la probabilidad de que este tenga mayor extensión superficial y por lo tanto se extienda más allá de la zona de estudio planteada.

En el perfil ñ-ñ', se aprecia como a los laterales del cauce principal hay principalmente depósitos de flujo lateral erosionado y terrazas de alta erosión, las cuales se encuentran escalonadas y la ladera el suroeste del cauce principal tiene una pendiente 27.5° y al noreste 21.3° (Figura 58).

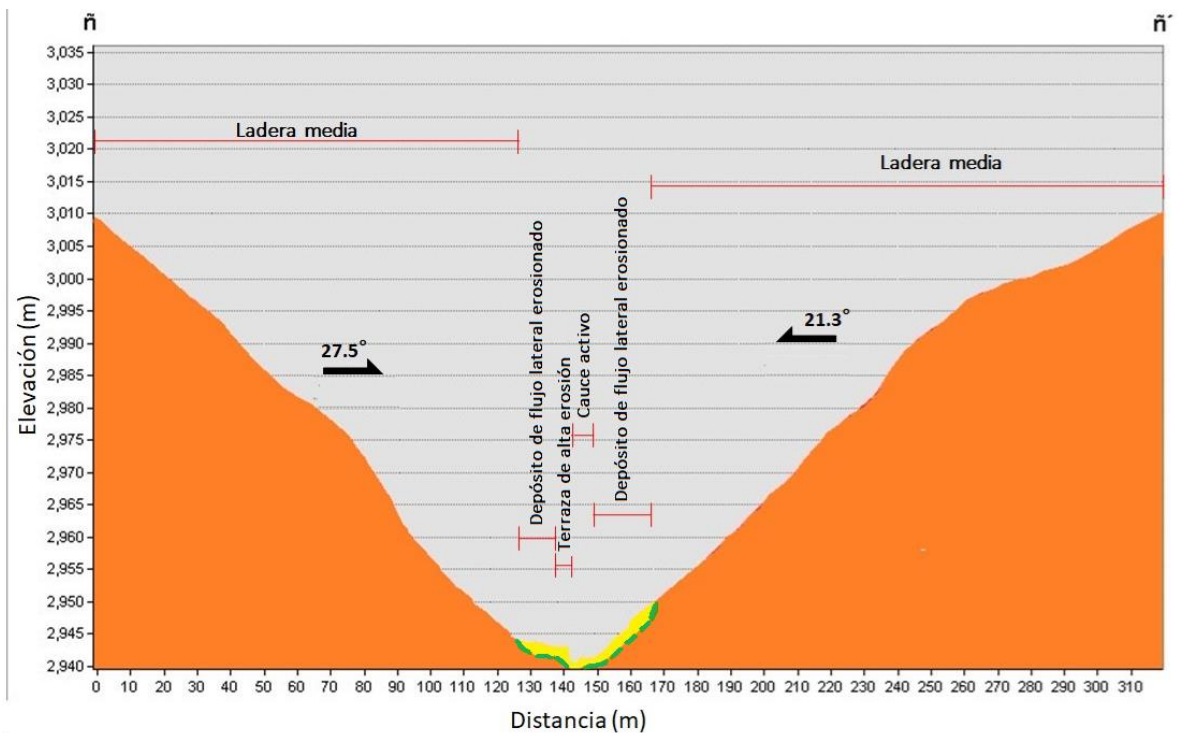


Figura 58. Perfil de la sección ñ-ñ', donde el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

En el perfil o-o', observamos una gran terraza de alta erosión, y las laderas al suroeste y noreste respecto del cauce principal tiene una pendiente de 30.1° y 16.7°, respectivamente (Figura 59). En el perfil p-p', se observa una terraza al noreste del cauce principal y luego de esta una ladera con pendiente de 18.26°, mientras que al suroeste del cauce principal únicamente se logra apreciar una ladera con pendiente de 14° (Figura 60). En el perfil q-q', se muestra donde el cauce principal de la zona de estudio se une al cauce de orden 4 proveniente del oeste de la zona de estudio (Figura 61). En este perfil se aprecian dos cúmulos de cantos rodados, una isleta y terrazas de baja erosión, y la ladera al noreste del cauce principal tiene una pendiente 13.51 y al suroeste de 18.3°. Así mismo, la ladera que se encuentra al sureste del cauce principal de orden 4 tiene una pendiente de 19.8°.

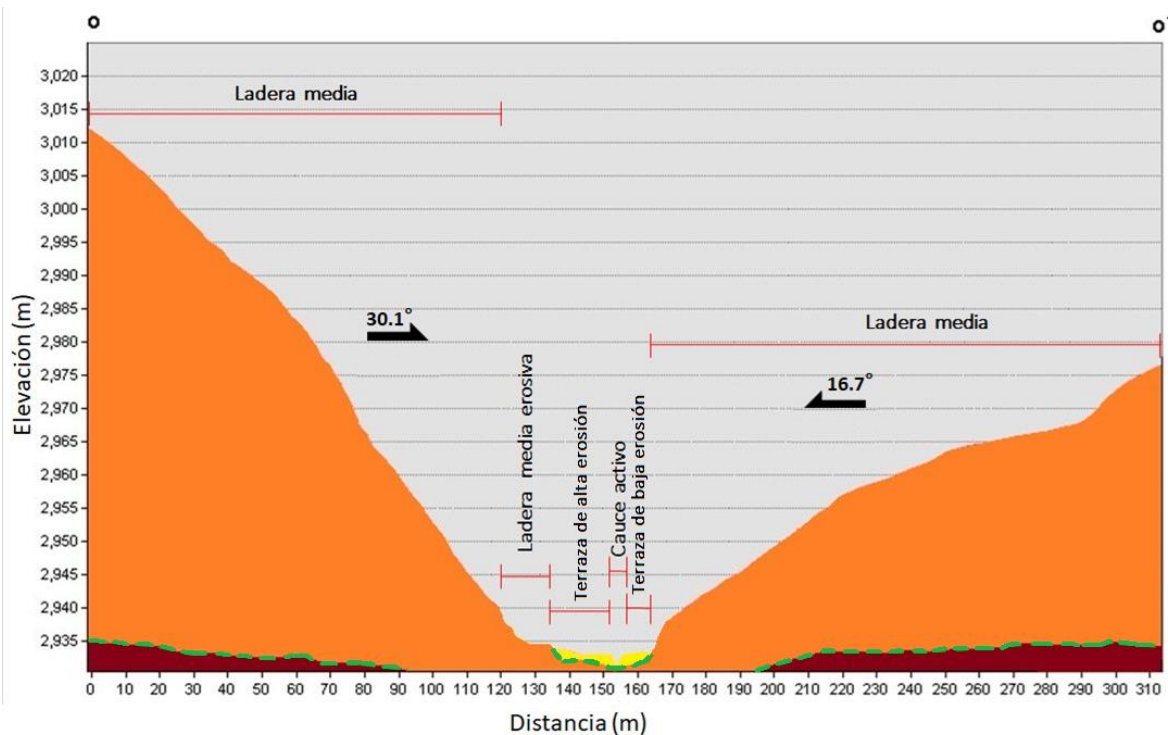


Figura 59. Perfil de la sección o-o', donde el color café representa andesita, el color naranja señala brecha andesítica, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

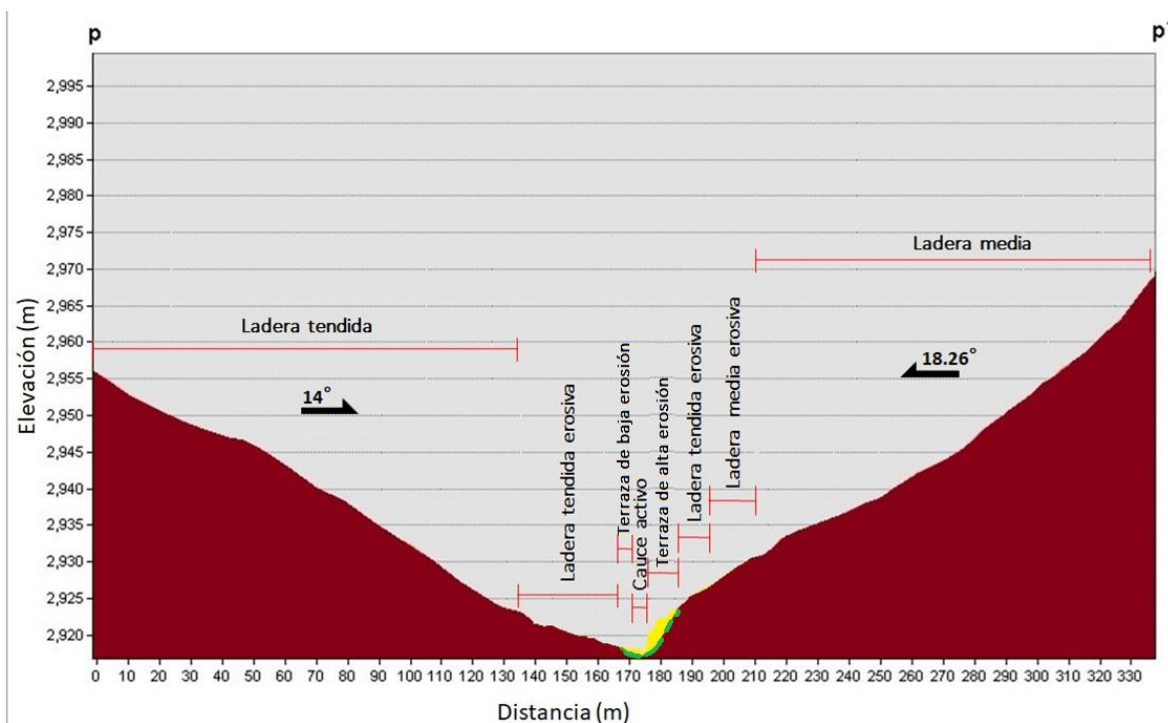


Figura 60. Perfil de la sección p-p', donde el color café representa andesita, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

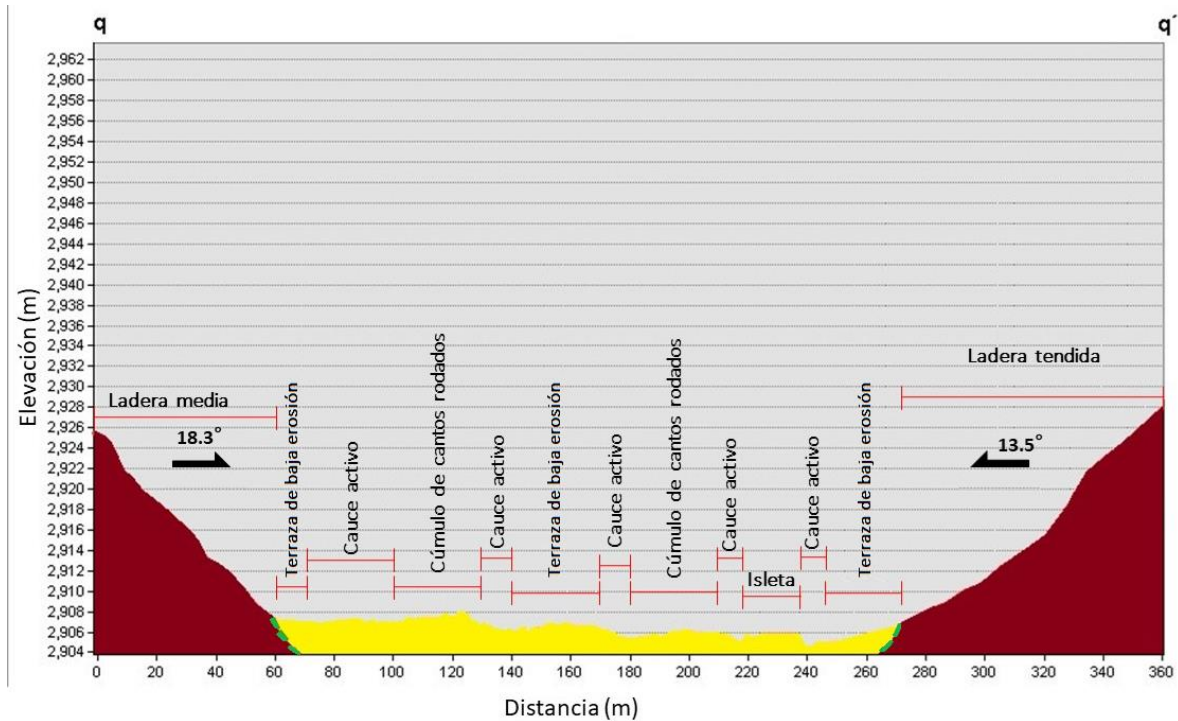


Figura 61. Perfil de la sección q-q', donde el color café representa andesita, el color amarillo indica el aluvión y las líneas verdes punteadas señalan los contactos geológicos inferidos.

5.3 Caracterización de los bloques rodados y granulometría

A lo largo de la zona de estudio se realizaron las mediciones de un total de 22 cúmulos de bloques rodados. En la Tabla 5 se muestran los datos de las mediciones, se aprecia que los bloques de mayor tamaño se encontraron en la parte superior de la zona de estudio y conforme se movió el material aguas abajo el tamaño de los bloques depositados disminuyó (Figura 62). Sin embargo, se encontraron excepciones, en BRM16 y BRM19 donde se registraron medidas significativamente menores en la tendencia. Además, en el sitio BRM18 se identificó un bloque de tamaño muy superior a la tendencia general. Los resultados de estas mediciones no se encuentran dentro de la tendencia general, pero las características del terreno adyacente podrían explicar estas mediciones anómalas. En el caso de BRM16 (Figura 63a y 63b) que se localiza aguas abajo de una isleta, al ser un obstáculo importante pudo detener a los bloques más grandes, generando que el tamaño general de bloques en saltación o rodamiento

fuese menor, por lo que al depositarse pocos metros después de la isleta estos fueran de un tamaño ligeramente menor. Para el punto BRM19 (Figura 63c), la acumulación se encuentra luego de dos zonas donde la pendiente disminuye y la dirección general del cauce principal cambia, por lo que los bloques de mayor tamaño se depositaron en estas zonas antes mencionadas. En el BRM18 (Figura 63d), se identificó un tamaño mayor a la tendencia, esto podría deberse a que aguas arriba hubo un aumento de pendiente en el cauce principal que coincidió con un depósito de otro PRM y una zona de roca madre erosionada, por lo cual se intuye que este bloque de gran tamaño pudo provenir de un depósito de flujo lateral erosionado por el aumento de energía resultante del cambio de pendiente.

Tabla 5. Mediciones tomadas en la zona de estudio.

Clave del punto de medida	Distancia respecto a la BRM1	Medida promedio de los bloques rodados (cm²)	Medida del bloque rodado de mayor tamaño (cm²)
BRM1	0	15	580
BRM2	70	36	2006
BRM3	195	224	4704
BRM4	263	552	1768
BRM5	453	783	2394
BRM6	582	858	1584
BRM7	686	868	1638
BRM8	724	864	1968
BRM9	1001	936	2408
BRM10	1045	884	2250
BRM11	1302	1134	1833
BRM12	1407	1368	3420
BRM13	1504	1435	3816
BRM14	1579	2223	11040
BRM15	1863	2860	12400
BRM16	1938	2548	8200
BRM17	2033	3350	19584
BRM18	2122	3976	48208
BRM19	2410	2632	15138
BRM20	2550	3472	13363
BRM21	2699	4221	15120
BRM22	2906	4209	19400

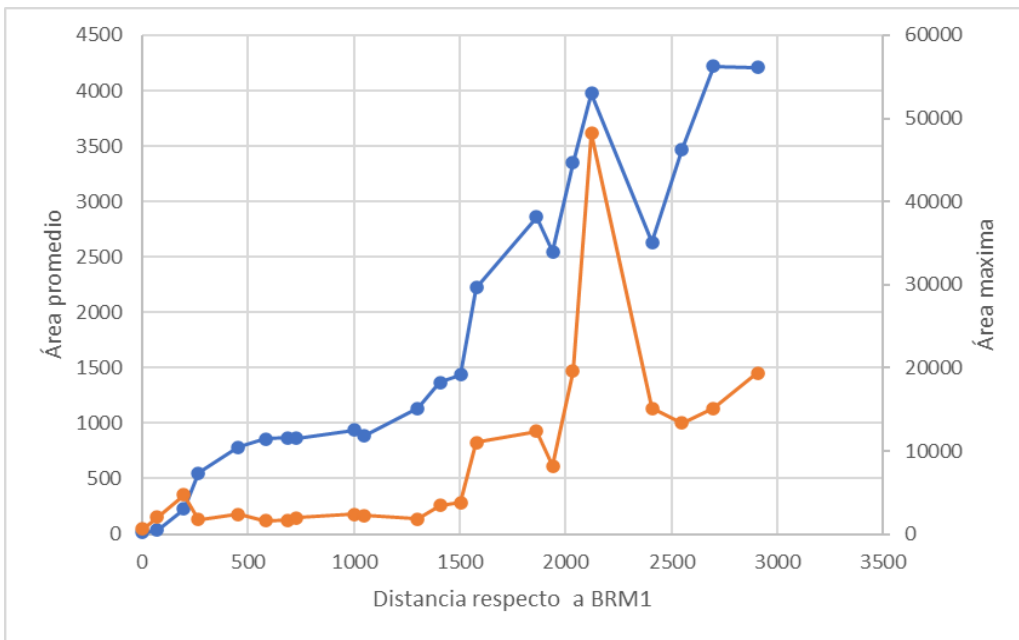


Figura 62. Gráfica de las mediciones del tamaño de los bloques medidos en el trabajo de campo (Tabla 5). La línea azul representa las medidas promedio de los bloques de roca rodados, mientras que la línea naranja representa las medidas de los bloques de mayor tamaño.



Figura 63. Bloques rodados que fueron depositados por el PRM y que fueron medidos en distintos puntos de la zona de estudio. a) y b) en el punto BRM16; c) en BRM19; d) en BRM18.

Los resultados del proceso de tamizado se muestran en las Tablas 6, 7, 8, 9 y 10. Las gráficas de los datos se observan en la Figura 64, donde se identifican

los parámetros D10, D30 y D60; mientras Cc y Cu se muestra en la Tabla 11, que de acuerdo a la clasificación SUCS (Anexo 6), se obtuvo desde la zona de deposición aguas arriba, GRM1 grava bien graduada, GRM2 arena bien graduada, GRM3 arena mal graduada, GRM4 grava mal graduada y GRM5 arena mal graduada, dada la distribución de las muestras.

De acuerdo con los resultados obtenidos se aprecia que las muestras bien graduadas corresponden a las partes finales de la zona de estudio. Resalta el hecho de que no se encontraron los depósitos con clasificaciones como se esperaba, es decir que en las partes aguas arriba se tuvieran gravas y aguas abajo arenas o suelos finos, ya que desde la corona hacia aguas abajo se encontró arena, grava, arena, arena y grava. La GRM1, grava bien graduada, estando justamente en ladera tendida y en una de las terrazas de mayor tamaño en el tramo. La GRM2, arena bien graduada, en una zona donde las terrazas son pequeñas y no hay nada que sugiera un flujo muy turbulento. La GRM3, arena mal graduada, se encuentra justamente donde la topografía presenta un cambio brusco de dirección lo que podría explicar un flujo más turbulento; sin embargo, por este cambio tan grande de dirección se esperaría encontrar una grava, no una arena. Sugiriendo que el movimiento no fue altamente turbulento. La GRM4, grava mal graduada, no se encuentra en una zona que sugiera un flujo turbulento o un gran cambio de dirección que indique por qué se depositaron líticos de mayor tamaño; sin embargo, al estar tan cerca de un depósito de deslizamiento de ladera podría ser que los depósitos mezclaran sus componentes y de ahí provenga esta muestra, aunque en campo no quedara claro que esto fue así. La GRM5, arena mal graduada, estando tan cerca de un cúmulo de cantos rodados se esperaría que la muestra fuera una grava mal graduada; sin embargo, la presencia de grandes líticos es casi nula.

Los resultados del tamizado de las muestras GRM2 y GRM4 podrían no ser tan confiables debido a que no se contaba con la cantidad de muestra mínima indicada por la norma; sin embargo, en trabajos otros autores han reportado resultados con muestras considerablemente más pequeñas, por ejemplo de 500 gr (CFE, 2015) o 326 gr (Obando-Francis y Zeledón-Cruz, 2016), por lo que si bien

quedan a una mayor incertidumbre la calidad del proceso realizado es suficiente para tenerlos como una referencia útil.

Como se mencionó la GRM4 podría tener dudosa fiabilidad, por lo que al referirse a la única muestra clasificada como grava es la GRM1 la cual podría ser así porque no hubo algún cauce tributario cercano que aumentara la fuerza del flujo, en el caso de la GRM2 y GRM3 se tuvo un cauce tributario que se unió al cauce principal a pocos metro aguas arriba del lugar donde se tomaron estas muestras, este aporte pudo incrementar la fuerza del flujo y aportar materiales en suspensión y saltación de mayor tamaño a gravas que se pudieron depositar aguas abajo.

Tabla 6. Distribución de granulometría de la muestra GRM1.

Abertura (mm)	Peso retenido (gr)		Acumulado retenido (%)	Acumulado que pasa (%)	Clasificación
	Parcial	Acumulado			
50	0	0.00	0.00	100.00	Grava
37.5	0	0.00	0.00	100.00	
25	0	0.00	0.00	100.00	
19	95.92	95.92	9.14	90.86	
12.5	58.64	154.56	14.73	85.27	
9.5	76.24	230.80	22.00	78.00	
6.3	67.84	298.64	28.47	71.53	
4.75	49.04	347.68	33.15	66.85	
2.36	176.24	523.92	49.95	50.05	
2	52.64	576.56	54.96	45.04	
1.7	41.68	618.24	58.94	41.06	
1.4	47.36	665.60	63.45	36.55	
1.18	39.04	704.64	67.18	32.82	
0.85	47.28	751.92	71.68	28.32	
0.6	72.88	824.80	78.63	21.37	
0.425	58.4	883.20	84.20	15.80	
0.25	46.32	929.52	88.61	11.39	
0.18	34.64	964.16	91.92	8.08	
0.15	35.28	999.44	95.28	4.72	
0.075	46.4	1045.84	99.70	0.30	
Pasó	3.12	1048.96	100.00	0	Finos
Σ=	1048.96				

Tabla 7. Distribución de granulometría de la muestra GRM2.

Abertura (mm)	Peso retenido (gr)		Acumulado retenido (%)	Acumulado que pasa (%)	Clasificación
	Parcial	Acumulado			
50	0	0.00	0.00	100.00	Grava
37.5	0	0.00	0.00	100.00	
25	98.28	98.28	9.72	90.28	
19	29.48	127.76	12.63	87.37	
12.5	69.44	197.20	19.50	80.50	
9.5	83.4	280.60	27.74	72.26	
6.3	93.44	374.04	36.98	63.02	
4.75	55.32	429.36	42.45	57.55	
2.36	146.88	576.24	56.98	43.02	
2	46.32	622.56	61.56	38.44	
1.7	26.4	648.96	64.17	35.83	
1.4	31.6	680.56	67.29	32.71	
1.18	26.56	707.12	69.92	30.08	
0.85	37.36	744.48	73.61	26.39	
0.6	55.24	799.72	79.07	20.93	
0.425	55.16	854.88	84.53	15.47	
0.25	59.16	914.04	90.38	9.62	
0.18	88.4	1002.44	99.12	0.88	
0.15	8.2	1010.64	99.93	0.07	Finos
0.075	0.72	1011.36	100.00	0.00	
Pasó	0	1011.36	100.00	0	
Σ=	1011.36				

Tabla 8. Distribución de granulometría de la muestra GRM3.

Abertura (mm)	Peso retenido (gr)		Acumulado retenido (%)	Acumulado que pasa (%)	Clasificación
	Parcial	Acumulado			
50	0	0.00	0.00	100.00	Grava
37.5	0	0.00	0.00	100.00	
25	0	0.00	0.00	100.00	
19	0	0.00	0.00	100.00	
12.5	18.54	18.54	1.58	98.42	
9.5	31.11	49.65	4.23	95.77	
6.3	24.87	74.52	6.34	93.66	
4.75	30.36	104.88	8.93	91.07	
2.36	113.58	218.46	18.59	81.41	
2	26.43	244.89	20.84	79.16	
1.7	18.3	263.19	22.40	77.60	
1.4	22.35	285.54	24.30	75.70	
1.18	19.29	304.83	25.95	74.05	
0.85	28.68	333.51	28.39	71.61	
0.6	91.98	425.49	36.22	63.78	
0.425	154.56	580.05	49.37	50.63	
0.25	253.56	833.61	70.95	29.05	
0.18	147.36	980.97	83.50	16.50	
0.15	87.75	1068.72	90.97	9.03	
0.075	91.32	1160.04	98.74	1.26	
Pasó	14.82	1174.86	100.00	0	Finos
Σ=	1174.86				

Tabla 9. Distribución de granulometría de la muestra GRM4.

Abertura (mm)	Peso retenido (gr)		Acumulado retenido (%)	Acumulado que pasa (%)	Clasificación
	Parcial	Acumulado			
50.00	0.00	0.00	0.00	100.00	Grava
37.50	0.00	0.00	0.00	100.00	
25.00	77.04	77.04	8.28	91.72	
19.00	47.08	124.12	13.35	86.65	
12.50	169.48	293.60	31.57	68.43	
9.50	118.32	411.92	44.29	55.71	
6.30	112.52	524.44	56.39	43.61	
4.75	83.84	608.28	65.40	34.60	
2.36	167.60	775.88	83.42	16.58	Arena
2.00	33.04	808.92	86.98	13.02	
1.70	23.36	832.28	89.49	10.51	
1.40	22.60	854.88	91.92	8.08	
1.18	12.00	866.88	93.21	6.79	
0.85	13.64	880.52	94.68	5.32	
0.60	20.20	900.72	96.85	3.15	
0.43	13.52	914.24	98.30	1.70	
0.25	10.32	924.56	99.41	0.59	
0.18	2.16	926.72	99.64	0.36	
0.15	1.28	928.00	99.78	0.22	
0.08	1.92	929.92	99.99	0.01	
Pasó	0.12	930.04	100.00	0	Finos
Σ=	930.04				

Tabla 10. Distribución de granulometría de la muestra GRM5.

Abertura (mm)	Peso retenido (gr)		Acumulado retenido (%)	Acumulado que pasa (%)	Clasificación
	Parcial	Acumulado			
50	0	0.00	0.00	100.00	Grava
37.5	0	0.00	0.00	100.00	
25	0	0.00	0.00	100.00	
19	0	0.00	0.00	100.00	
12.5	68.28	68.28	6.91	93.09	
9.5	55.02	123.30	12.48	87.52	
6.3	63.87	187.17	18.95	81.05	
4.75	35.79	222.96	22.57	77.43	
2.36	113.28	336.24	34.04	65.96	Arena
2	31.83	368.07	37.26	62.74	
1.7	31.38	399.45	40.44	59.56	
1.4	29.61	429.06	43.44	56.56	
1.18	20.4	449.46	45.50	54.50	
0.85	32.82	482.28	48.83	51.17	
0.6	52.38	534.66	54.13	45.87	
0.425	71.73	606.39	61.39	38.61	
0.25	115.17	721.56	73.05	26.95	
0.18	52.68	774.24	78.38	21.62	
0.15	116.28	890.52	90.16	9.84	
0.075	90.3	980.82	99.30	0.70	
Pasó	6.93	987.75	100.00	0	Finos
Σ=	987.75				

Curva granulométrica

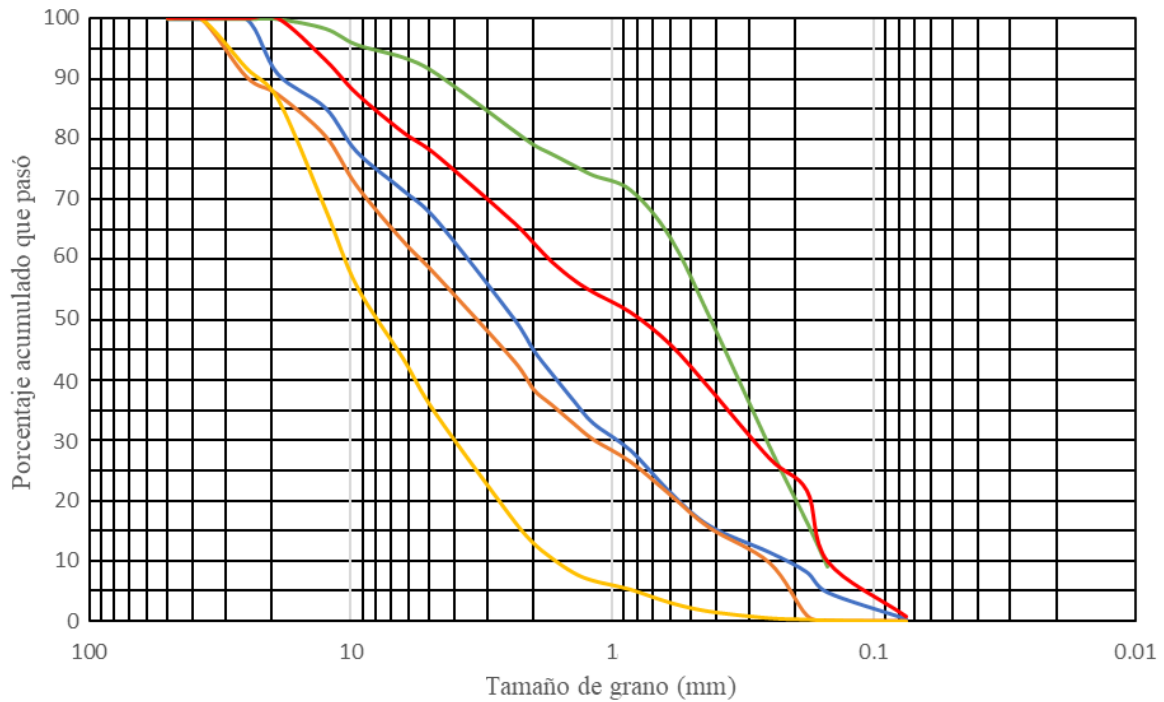


Figura 64. Curvas granulométricas de las muestras, donde la línea azul indica la GRM1, la línea naranja indica la GRM2, la línea verde indica la GRM3, la línea amarilla indica la GRM4 y la línea roja indica la GRM5.

Tabla 11. Datos obtenidos a partir de la gráfica de la Figura en la cual se incluye la clasificación de cada muestra basada en la SUCS del Anexo 6.

	GRM1	GRM2	GRM3	GRM4	GRM5
D10	0.21	0.25	0.15	1.70	0.14
D30	0.95	1.18	0.25	4.00	0.30
D60	3.70	5.50	0.45	10.10	1.80
Cu	17.62	22.00	3.00	5.94	12.86
Cc	1.16	1.01	0.93	0.93	0.36
Clasificación	GW	SW	SP	GP	SP

Tres de las muestras fueron tomadas en terrazas de alta erosión (GMR2, GRM4 y GRM5), y las otras dos en pequeños depósitos del FC no cartografiados, una se encontraba en ladera tendida erosiva (GRM1) y una isleta (GRM3).

5.4 Caracterización dendrogeomorfológica

Los resultados obtenidos mediante el *crossdating* realizado en COFECHA, indicaron una intercorrelación entre las mediciones de series de anillos de 0.428 (>0.328 , umbral mínimo significativo), misma con la cual se puede validar la precisión del fechado entre series, y que es significativo (Holmes, 1983). Con respecto a la cronología de eventos del PRM del 2010, encontramos que varios años presentan DC, particularmente en forma de CRT, lo cual es un indicador de posibles eventos ocurridos. No obstante, la intensidad con la que fueron encontrados fue baja para los años en que se tenían estos disturbios (Tabla 12), por lo cual no se puede afirmar que sean producto de impactos de algún PRM. Mientras que para el año de 2010 los CRT se presentaron en el 96.88% de las muestras, con intensidades que variaron desde las bajas hasta las fuertes, lo que confirma la ocurrencia del FC para dicho año. Se graficaron la profundidad de la muestra de los árboles con disturbios junto con los datos de precipitación acumulada anual en la zona (Figura 65), y se observó que, en los años 1945, 1961, 1982, 2001 y 2014 se presentaron disturbios, no obstante, fueron años de baja precipitación. Mientras que los años 1998 y 2010 fueron años que se vinculan con años de altas precipitaciones.

Las muestras tomadas se encontraron en las geoformas como se muestra en la Tabla 13, donde se puede apreciar que ladera media y ladera media erosiva fueron las unidades con mayor presencia de árboles muestreados con alteraciones macroscópicas, y en menor medida, pero aún con porcentajes notables cuerpo de deslizamiento y terraza de alta erosión. Mientras que en las unidades geológicas la andesita fue la que tuvo un mayor porcentaje de muestreo de árboles con un 51.85%, brecha andesítica con 36.11% y aluvión con 12.04%.

Tabla 12. Perturbaciones encontradas en los anillos de crecimiento de las muestras analizadas.

Años	No. De árboles con disturbios	No. De árboles con registro para ese año	Presencia de perturbación (%)
1945	1	45	2.22
1961	1	86	1.16
1982	2	121	1.65
1998	2	128	1.56
2001	1	128	0.78
2010	124	128	96.88
2014	1	128	0.78

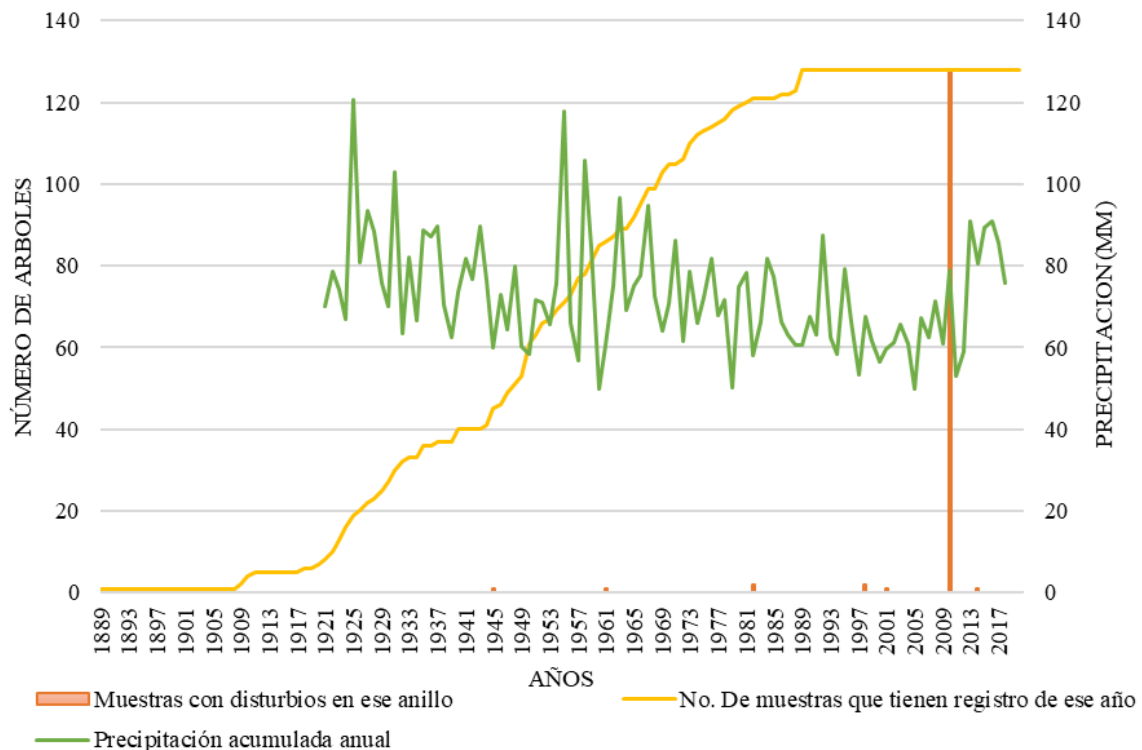


Figura 65. Gráfica comparativa de la estimación de precipitación acumulada anual en la zona de estudio en los años que presentan disturbios los anillos de crecimiento de las muestras.

Tabla 13. Distribución en las unidades geomorfológicas de las muestras tomadas para dendrocronología.

Unidad geomorfológica	Porcentaje de muestras
Cauce activo	0.93
Cuerpo de deslizamiento	7.41
Cúmulo de cantos rodados	0.93
Depósito de flujo lateral erosionado	0.93
Ladera media	54.63
Ladera media erosiva	27.78
Ladera tendida	1.85
Lóbulo de deslizamiento	0.93
Terraza de alta erosión	4.63

5.5 Identificación de la frecuencia de altura de cicatrices

La distribución espacial de las cicatrices (Figura 66) permite observar que las unidades geomorfológicas con menor presencia de cicatrices por impacto del PRM son cúmulo de cantos rodados, depósito de flujo lateral erosionado y lóbulo de deslizamiento, cada uno con solo una cicatriz en toda su área. Unidades geomorfológicas con muy pocas cicatrices en su área son ladera tendida con dos cicatrices, terraza de alta erosión con cinco cicatrices y en cuerpo de deslizamiento se encontraron nueve cicatrices. Mientras que las unidades con mayor número de cicatrices fueron ladera media erosiva con treinta y ladera media con cincuenta y ocho cicatrices.

Al organizar las unidades por el promedio de altura de la cicatriz de mayor a menor, las cicatrices de depósito de flujo lateral erosionado tienen 192 cm, ladera media erosiva 108.2 cm, terraza de alta erosión 100.4 cm, ladera media 82.3 cm, cuerpo de deslizamiento 61.5 cm, ladera tendida 29.5 cm, cúmulo de cantos rodados 29 cm y lóbulo de deslizamiento 2cm.

Las cicatrices de menos de un metro se concentran hacia la cabecera y su concentración va disminuyendo aguas abajo. Las unidades con cicatrices a más de un metro de altura fueron el cuerpo de deslizamiento, el depósito de flujo lateral erosionado, cada uno con una cicatriz, la terraza de alta erosión con dos cicatrices, la ladera media erosiva con trece y la ladera media con quince cicatrices.

Estas cicatrices tienen la mayor concentración entre los perfiles g-g' e i-i', la cual coincide con las mediciones anómalas de bloques rodados, en el caso de los BRM18 y 19, en el caso del BRM18 se encuentra en la parte media de la concentración y el BRM19 en donde se encuentran la mayoría de las cicatrices; además, al final de esta concentración se encuentra la BRM16. La siguiente mayor concentración esta entre los perfiles k-k' y l-l'. Entre los perfiles n-n' y o-o' se encuentra la tercera concentración de estas cicatrices.

Merece la pena recalcar que si bien la concentración de cicatrices a más de un metro de altura es baja, aguas abajo se siguen encontrando una cantidad importante, ya que en los primeros 750 metros a partir de la cabecera se encuentran cuatro cicatrices con dicha altura y en los últimos 750 metros antes de que el cauce principal de la zona de estudio se intercepte con un cauce secundario, hay un total de cinco cicatrices a una altura mayor a un metro por lo que FC aún tenía una considerable fuerza al llegar a esta zona.

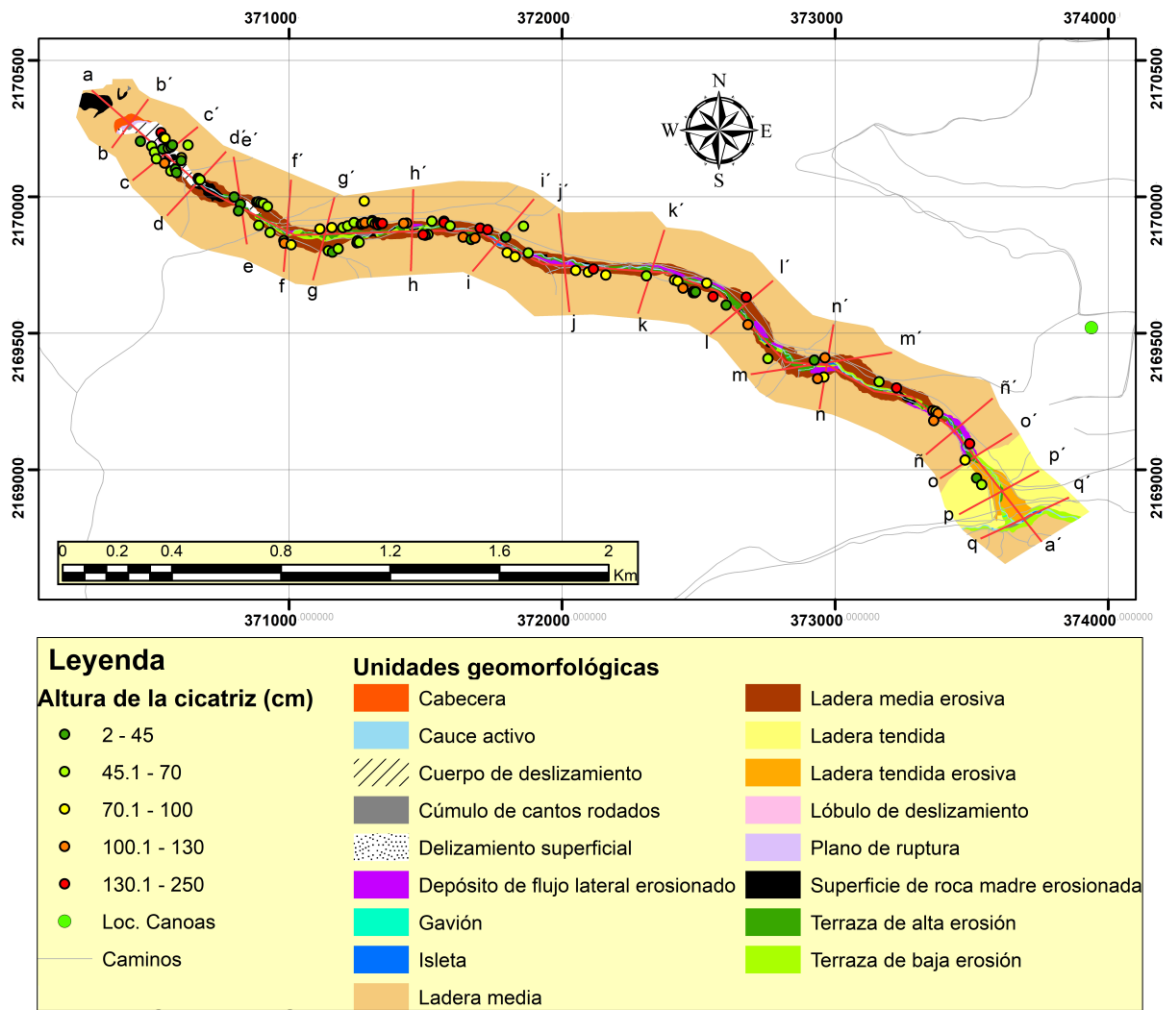


Figura 66. Representación espacial de las alturas de cicatrices medidas, con respecto a las unidades geomorfológicas.

5.6 Caracterización de precipitación

El resultado del análisis de precipitación acumulada anual se muestra en la serie de datos conformada por las 4 estaciones (Figura 67), donde se observa que los años de mayor precipitación acumulada fueron 1925 y 1955. Además, se aprecia una tendencia a la reducción con dos ciclos más secos, uno de 1930 a 1951 y otro de 1966 a 2005. De igual manera se encontró que el año 2010, fue un año de menor precipitación, aunque en años posteriores la precipitación acumulada anual comenzó a elevarse hacia un ciclo de mayor precipitación.

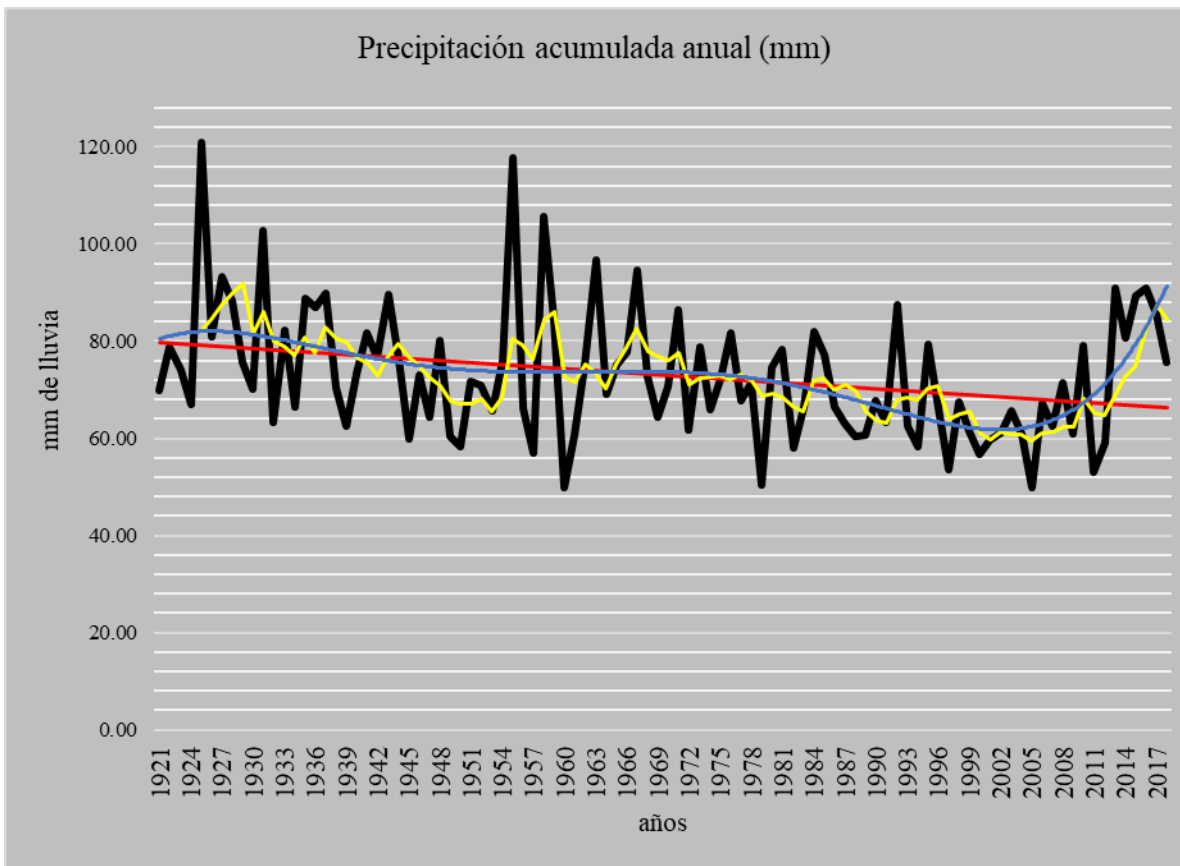


Figura 67. Gráfico de la estimación de la precipitación acumulada anual en la zona de estudio. Donde, la línea negra son los datos de la precipitación acumulada anual en la zona de estudio, la línea roja es la línea de tendencia, la amarilla es la media móvil cada 5 años y la azul tendencia polinómica cada 5 años.

Capítulo 6 Discusión

El mapa geológico final mostró diferencias significativas en comparación con los mapas geológicos de INEGI (1978) y SGM (2000) utilizados como referencia, ya que en dichos mapas se reporta que toda la roca que aflora en esta zona es únicamente andesita. Estructuralmente, se encontró que, tampoco existe correspondencia, de acuerdo con lo reportado en el mapa de INEGI (1978), debido a que los rumbos encontrados difieren de lo encontrado en campo. Además, en las observaciones realizadas para el estudio no se encontraron evidencias de una de las fracturas reportadas por INEGI (1978), aunque claramente la diferencia de escalas entre los mapas consultados y lo obtenido en este estudio difieren entre sí. Así mismo el trabajo de campo pudo resultar ser un factor determinante en las

discrepancias entre los resultados de este trabajo y lo publicado por las fuentes consultadas.

Uno de los elementos que más resalta en este trabajo es el categorizar FC al PRM ocurrido en la zona, ya que a los flujos ocurridos en ese evento extraordinario del 2010 en otros trabajos se le llaman FD (De la Peña-Guillén, 2023) o flujos de escombros (Alcántara-Ayala et al., 2011). Si bien se tiene un conflicto en la literatura en español para nombrar PRM (Alcántara-Ayala, 2000), esta decisión se tomó debido a que se deseaba enfatizar el hecho de que en la zona ocurrió un PRM complejo y el término deslizamiento complejo o compuesto ha sido usado (Suarez-Díaz, 1998; Suarez, 2012; Novotný, 2013; Montero-Olarte, 2017), por esto se consideró aceptable el uso de este término.

En los resultados de la caracterización geomorfológica resalta que no se encontraron levées en la zona, o al menos ninguno con un tamaño mínimo cartografiable. Cabe resaltar que, en otros FD ocurridos en ambientes de montaña suelen encontrarse frecuentemente, incluso existen casos donde los levées son la unidad geomorfológica predominante como el caso de un flujo de escombros en la Sierra Norte de Puebla (Pablo-Pablo et al., 2020). Sin embargo, en PRM contemporáneos ocurridos en otra zona de la RBMM tampoco fueron reportados levées (Alcántara-Ayala et al., 2011) aunque se podría deber a la diferencia de escala entre los mapas geomorfológicos, aunque esta ausencia de levées en la zona se atribuye principalmente que este FC se encuentra muy alterado teniendo incluso caminos en su interior. La gran presencia de terrazas en las geoformas resultantes del PRM del 2010 en este ambiente de montaña es concordante con lo encontrado en otro ambiente de montaña como el reportado por Figueroa-García (2020).

Algo muy importante que debe resaltarse en el apartado geomorfológico es el contraste de los resultados respecto a los obtenidos por De la Peña-Guillén (2023), ya que al tratarse de la misma zona se destaca que su interpretación geomorfológica se constituyó de 12 unidades, mientras que en el presente trabajo se interpretaron 17 unidades. La unidad de cúmulo de cantos rodados se consideró importante de incluir debido a la relevancia que tuvieron estos bloques rodados (siendo así que se decidieron tomar medidas para observar su

distribución de tamaños en el FC). Además, la unidad de depósito de flujo lateral erosionado se consideró vital su inclusión por la necesidad de resaltar las evidencias de PRM previos que no dejaron evidencia en los árboles muestreados. Las otras 3 unidades restantes se derivan de que en este trabajo se dividieron las laderas en 4 unidades distintas, esto se debe a la diferencia entre los extremos para las categorías entre ladera media y tendida; además, de que se buscó remarcar la zona afectada por el FC al diferenciar entre laderas medias y tendidas de sus contrapartes erosivas.

Normalmente en los trabajos relacionados a FD la zona se divide en tres subzonas: de ruptura o fallamiento, de transporte y deposición. Este PRM ha sido clasificado de esta manera en otro trabajo (De la Peña-Guillén, 2023). Sin embargo, en este trabajo no se realizó dicha subdivisión al considerarse que el área afectada por el FC no se encuentra en su totalidad dentro de la zona de estudio y se necesitaría ampliar la zona de estudio para poder clasificar en zona de ruptura, transporte y deposición.

Los resultados de este trabajo mostraron que los DC más frecuentes encontrados en los árboles muestreados (*Abies religiosa*) fueron los CRT, lo cual es concordante con lo reportado por Figueroa-García (2020) y Franco-Ramos et al. (2019) en otras zonas montañosas afectadas por PRM. Cabe resaltar que en dichos estudios los autores mencionan que también encontraron otros tipos de disturbios como el realce de crecimiento, madera de compresión y supresión.

Los resultados de la caracterización de precipitación acumulada anual muestran el año 2010, como un año de relativamente de baja precipitación. Sin embargo, en estudios de mayor detalle señalan el claro papel protagónico como detonante de los PRM del 2010 en la RBMM, ya que en un periodo de 5 días se llegó a acumular 236 mm de precipitación (De la Peña-Guillén, 2023) y en otra zona de la RBMM en un PRM contemporáneo de igual manera se señaló a la precipitación como el detonante (Alcántara-Ayala et al., 2011).

Capítulo 7 Conclusiones

Con base en las cartografías generadas, la interpretación mediante percepción remota y el trabajo de campo se determinó que el PRM ocurrido fue un FC, contrastando con la hipótesis original de que se trataba de un FD. Si bien el uso de las técnicas dendrogeomorfológicas no proporcionó evidencia contundente de múltiples eventos de PRM en la zona de estudio si permitió el fechado del PRM más reciente, lo cual prueba la eficacia del método en la zona. Además, es indudable que en campo se encontraron depósitos de otros PRM ocurridos previamente. Reconocer la temporalidad de los depósitos más antiguos, resultado de PRM, requeriría la aplicación de otras técnicas de datación, las cuales no fueron utilizadas en esta investigación; sin embargo, para una mejor comprensión de la historia de los peligros de la zona requiere realizar futuras investigaciones que integren otros métodos de fechado para dichos depósitos.

La caracterización geológica brindó una mayor representación de las unidades geológicas que afloran en esta zona de la RBMM y sus fracturas regionales. Se sugiere que a futuro se realicen estudios sobre el comportamiento físico-mecánico de la brecha andesítica, con la intención de comprender con mayor detalle, su papel en la inestabilidad de ladera, dado que se encuentra con un alto grado de intemperización, y es el mismo tipo de roca encontrada en el sitio donde se detonó el FC.

Los datos de la granulometría de depósitos, las mediciones de bloques rodados y altura de cicatrices permitieron interpretar el comportamiento del FC y cómo se movió el material pendiente abajo. De igual manera con base a los datos de las mediciones de altura de cicatrices junto a los órdenes de corriente de Strahler determinados, se sugiere realizar un futuro trabajo que amplíe la zona de estudio para poder determinar todo el alcance que tuvo el FC y hasta donde se extendió su zona de deposición.

En conclusión, este trabajo ofrece una base geológica y contribuye con más elementos a la geomorfología previamente analizada, con lo cual es posible generar estudios a futuro sobre evaluación de susceptibilidad y peligro a PRM en

este sitio. Además, resalta la necesidad de generar más cartografía geológica detallada en la RBMM.

Referencias

- Acosta-Hernández, A. C., Pompa-García, M., Camarero, J. J., 2017, An updated review of dendrochronological investigation in Mexico, a megadiverse country with a high potencial for tree-ring sciences: *Forest*, 8 (5), p 1-18, DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/f8050160>
- Agisoft LCC, 2006, Agisoft: St. Peterburg, Russia, < <https://www.agisoft.com/about/>>, consultado 22/08/2022
- Alcántara-Ayala, I., 2000, Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología: *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 41, p 7-25.
- Alcántara-Ayala, I., Murillo-García, F.G., 2008, Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional: *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 66, p 47-64, ISSN 0188-4611.
- Alcántara-Ayala, I., López-García, J., Garnica, R. J., 2011, On the landslide event in 2010 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Angangueo, Michoacán, México: *Landslides*, 9, p 263-273. DOI: 10.1007/s10346-011-0291-7
- Alestalo, J., 1971, Dendrochronological interpretation of geomorphic processes: *Fennia - International Journal of Geography*, 105(1).
- ASTM D422-63(2007), 2007, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., 2008, Dendrogeomorfología: los árboles como fuente de conocimiento de los desastres naturales: *Revista de arboricultura*, 52, p 4 - 10.
- Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Génova, M., Gutiérrez, E., Moya, J., Muntán, E., Oller, P., Rubiales, J.M., Ruiz, V., Saz, M.A., 2010, Dendrogeomorfología: los árboles, fuente del conocimiento de los procesos y desastres naturales: 1ª edición, Asociación Española de Arboricultura, España, 119 p.

- Ballesteros-Cánovas, J. A., Bodoque del Pozo, J. M., Díez Herrero, A., Ruiz Villanueva, V., Nadal Romero, M. E., Génova Fúster, M., Rubiales Jiménez, J. M., Baeza Chico, E., Hernández Ruiz, M., Gutiérrez Pérez, I., 2012, Investigaciones dendrogeomorfológicas aplicadas a la gestión de los impactos por erosión hídrica acelerada de suelos en las sendas del parque nacional de Monfragüe (Cáceres) (resumen), en Congreso Nacional del Medio Ambiente, Madrid, España, p 1-22.
- Barger. L., Nyhan, J. C., 1960, Climatology at work, Washington D.C.
- Belousov, B. B., 1979, Geología estructural (Llanos Mas, V., trad.): 2da ed., editorial Mir. Moscú.
- Bernal-Salazar, S., Terrazas-Salgado, T., 2000, Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en Abies religiosa: Madera y Bosques, 6, p 73-86.
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Vázquez-Selem, L., Palacios, D., 2010, Tree-ring reconstruction of past lahar activity at Popocatepetl Volcano, México: The Holocene, 20, p 265-274.
- Brower, L. P., Castilleja, G., Peralta, A., López-García, J., Bojórquez-Tapia, L., Díaz, S., Melgarejo, D., Missrie, M., 2002, Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the Monarch Butterfly in Mexico, 1971-1999: Conservation Biology, 16(2), p 346-359.
- Bräker, O., 2002, Measuring and data processing in tree-ring research – a methodological introduction: Dendrochronologia, 20, p 203-216.
- Camargo P., J. A., 2011, Orientación de planos y líneas (en línea): desconocido, disponible en <<https://es.slideshare.net/georgehsterling/geologia-estructural-orientacion-de-estructuras>> consultado: 06/11/2022.
- Carlón-Allende, T., Macías, J. L., Mendoza, M. E., Villanueva-Díaz, J., 2022, Influence of volcanic ash deposits on the radial growth of trees in Central Mexico: the case of Parícutin volcano: European Journal of Forest Research, 141, p 605-6015.
- Carlón-Allende, T., Mendoza, M. E., Villanueva-Díaz, J., Pérez-Salicrup, D. R., 2015, Análisis espacial del paisaje como base para muestreos

- dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México: *Madera y Bosques*, 21, p 11-22.
- Carlón-Allende, T., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D. R., 2016, Climatic responses of *Pinus pseudostrabus* and *Abies religiosa* in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Central Mexico: *Dendrochronologia*, 38, p 103-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2016.04.002>
- Carlón-Allende, T., Villanueva Díaz, J., Soto Castro, G., Mendoza, M.E., Macías, J.L., 2021, Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, central Mexico: *Ecological Indicators*, 120, p 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106920>.
- Carlón-Allende, T., Mendoza Cantú, M. E., Macías Vázquez, J. L., 2022, Interpretación de eventos históricos a partir de anillos de crecimiento de árboles, en Urquijo, P. S., Lazos, A. E., Lefebvre, K., *Historia ambiental de América Latina*: CDMX, México, Universidad Nacional Autónoma de México, p 456-479.
- Cenderelli, D. A, y Kite, J. S., 1998, Geomorphic effects of large debris flows on channel morphology at North Fork Mountain, eastern west Virginia, USA: *Earth Surface processes and landforms*, 23, p 1-19.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2015, Análisis Granulométrico norma ASTM D422: Puebla, disponible en <<https://msc.cfe.mx/Aplicaciones/NCFE/Concursos/Procedure/GetAnexo/54528>>, consultado 18/07/2022
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 1998, carta nacional, Subcuencas hidrológicas, escala (1:1000000): México, CONABIO.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2021, Información Estadística Climatológica (en línea): México, disponible en <<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>>, consultado 10/04/2022.
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Estrada-Ávalos, J., 2009, *Medición y calidad de fechado en anillos de árboles*: CDMX, México,

- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y pecuarias, 48 p.
- Cuanalo C., Oscar A., Quezada P., Paúl, Aguilar M., Araceli, Olivan R., Alejandra M., Barona D., Edgar, 2006, Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México: e-Gnosis, 4, p 1-14.
- Das, B. M., 2015, Fundamentos de ingeniería geotécnica: México, editorial Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., 636 p.
- Davis, W. M., (1973), The Geographical Cycle, en Editorial E. Derbyshire, Climatic Geomorphology, Macmillan, London, p 19-50.
- De la Noë, G., Margerie, E., 1988, Les formes du terrain: Inglaterra, Editorial British Library, 348 p.
- De la Peña-Guillén, K. A., 2023, Evaluación de peligro por procesos de remoción en masa en laderas asociadas a ambientes montanos intertropicales: Morelia, Michoacán, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 115 p.
- Dieterich, J. H., Swetnam, T. W., 1984, Dendrochronology of a Fire-Scarred Ponderosa Pine: Forest Science, 30, p 238-247, <https://doi.org/10.1093/forestscience/30.1.238>
- Díez-Herrero, A., Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Eguibar, M. A., Fernández, J. A., Génova, M. M., Lain, L., Llorete, M., Rubiales, J. M., Stoffel, M., 2007. Mejoras en la estimación de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas: Boletín Geológico y Minero, 118 (4), p 789-802, ISSN: 0366-0176.
- Díez-Herrero, A., 2015, Buscando riadas en los árboles: Dendrogeomorfología: Enseñanzas de las ciencias de la Tierra, 23(3), p 272-285, ISSN 1132-9157.
- Duque-Escobar, G., Escobar, P., C: E., 2016, Geomecánica: Manizales, Universidad Nacional de Colombia, 441 p.
- Figuroa-García J.E., 2020, Estudio de la frecuencia y distribución de lahares en la barranca Jamapa, Pico de Orizaba, a partir de un análisis dendrogeomorfológico: CDMX, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría, 202 p.

- Franco-Ramos, O., 2014, Dendrocronología: método de fechamiento para procesos geomorfológicos en México, sacado de Geomorfología: Experiencias de Investigación en México (en línea): Toluca, Estado de México, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del estado de México, publicado en octubre del 2014, <http://www.igg.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/ssmg/memorias/Memorias_IX%20RNG.pdf#page=128>, consultado 02 de mayo del 2021.
- Franco-Ramos, O., Ballesteros-Cánovas, J.A., Figueroa-García, J.E., Vázquez-Selem, L., Stoffel, M., Caballero, L., 2020, Modelling the 2012 Lahar in a Sector Jamapa George (Pico de Orizaba Volcano, Mexico) Using RAMMS and Tree-Ring Evidence: *Water*, 12, p 1-15.
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M., Ballesteros-Cánovas, J. A., 2019, Reconstruction of debris Flow activity in a temperate mountain forest catchment of central Mexico: *Journal of Mountain Science*, 16 (9), p 2096-2109, DOI [10.1007/s11629-019-5496-6](https://doi.org/10.1007/s11629-019-5496-6)
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M., Vázquez-Selem, L., Capra, L., 2013, Spatiotemporal reconstruction of lahars on the southern slopes of Colima Volcano, México - A dendrogeomorphic approach: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 267, p 30-38.
- Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Stoffel, M., Villanueva-Díaz, J., 2018, Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México: *BOSQUE* 39(2), p 191-204, 2018 DOI: 10.4067/S0717-92002018000200191
- Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Zamorano-Orozco, J.J., Villanueva-Díaz, J., 2017, Edad, dinámica geomorfológica y tipología de barrancas en el sector norte del volcán Popocatepetl, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), p 1-19.
- Fritts, H. G., 1976, *Tree rings and climate: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, Arizona, U.S.A., 567p,* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.X5001-0>
- Holmes, R. L., 1983, Computer-assisted quality control in tree dating and measurement: *Tree Rings*, 43, p 69-73.

- García, E., 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, México, pp. 98.
- Garduño, M. E., 2014, Identificación de eventos excepcionales, a través de análisis de anillos de crecimiento de los árboles en el margen de los ríos Catingón y San Pedro en Angangueo Michoacán, México: Morelia Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría, 151 p.
- Gómez-Guerrero, A., Martínez-Molina, Martínez-Trinidad, T., Velázquez-Martínez, A., Sardiñas Gómez, O., Rivera, C., José Toruño, P., 2015, Índices de anillos de crecimiento en dos coníferas del centro de México: Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático, 1(1), p 134-148.
- Gómez-Pompa A. y Dirzo R., 1995, Reservas de la Biosfera y otras Áreas Naturales Protegidas de México. SEMARNAP, INE y CONABIO, México, D.F
- Grissino-Mayer, H. D., 2001, Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. Tree-Ring Research, 7 (2), p 205-221.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 1978, Carta Geológica, 1:50000, D.F., México, E14A26.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 1982, Carta Edafológica, 1:50000: Ciudad Hidalgo E14-A-25, SPP, México.
- INEGI, 2019, Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000, 2019: México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2021, Información topográfica, 1:50000: Aguascalientes, México, Serie III, E14A26.
- LaMarche, V.C. Jr., 1963, Origin and geologic significance of buttress roots of bristlecone pines, White Mountains, California, U.S.: Geological Survey Professional Paper 475-C, C149-C150.
- Lavell, A., Mansilla, E., Smith, D., 2003, La gestión local del riesgo: nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica: Guatemala, CEPREDENAC – PNUD, 101 P.

- López-García, J., 2009, Análisis de cambio en la cobertura forestal en la Zona Núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, 2003-2006, en Aguirre-Gómez, R., coordinador, Conceptos de Geomática y estudios de caso en México: México, p 195-211.
- Lugo-Hubp, J. I., 1988, Elementos de geomorfología aplicada (métodos cartográficos): México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 128 p.
- Lugo-Hubp, J. I., 2011, Diccionario geomorfológico: México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 479 p.
- Manzanilla, H., 1974, Investigaciones Epidométricas y Silcícolas en Bosques Mexicanos de Abies religiosa: Dirección General de Información y Relaciones Públicas de la SAG, México, D.F.
- Marlès-Magre, J., Valor Ivars, T., Claramunt López, B., Pérez Salicrup, D. R., Maneja Zaragoza, R., Sánchez Mateo, S., Boada Juncà, M., 2015, Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca: Boletín del Instituto de Geografía, 88, p 19-35.
- Maskrey, A., 1993, Los desastres no son naturales, en Romero G. y Maskrey, A. eds., Como entender los desastres naturales: Panamá, Red de Estudios Sociales en prevención de Desastres en América Latina, p 6-10.
- Mendoza L., M.J., Domínguez M., L., 2004, Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos: 1ª edición, CDMX, México, 386 p.
- Mendoza, M. E., Carlón-Allende, T. y Giardino, R. (en prensa). Dendrogeomorfología: un enfoque en el análisis de peligros naturales. En: González Sosa, E y Pineda Martínez, L, (Eds.) "La Red De Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos y la Atención de los Problemas Nacionales Estratégicos. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Miranda, R., Puy, M. J., & Martínez, J. J. ,2007, El árbol: fuente de información de las ciencias de la tierra: Elementos: Ciencia y Cultura, 14(67), p 41–43.

- Montero-Olarte, J., 2017, Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia: Colombia, Servicio Geológico Colombiano, 156 p.
- Nash, S., 2002, Archaeological Tree-Ring Dating at the Millennium: Journal of Archaeological Research, 10 p 243-275.
- Novotný, J., 2013, Varnes landslide classification (1978) (en línea), 1ª edición, Ethiopia, octubre-noviembre 2013, <<https://drive.google.com/file/d/1kQYba9TLlrUEyelBPQlqf40sOeS6JDgJ/view>>, consultado 16/08/2021.
- Obando-Francis, A. A., Zeledón-Cruz, H. A., 2016, Comportamiento y reacción de suelos mediante pruebas de laboratorio en terrenos de la Bluefields Indian & Caribbean University, trocha Nueva Guinea: Nicaragua, Bluefields Indian & Caribbean University, tesis de ingeniería, 50 p.
- Ocampo-Balleza, R., 2016, la inestabilidad de Laderas apoyada por cartografía geológica y estudios de teledetección: Tlamati Sabiduria, 7(2), p 1-13.
- Pablo-Pablo, M.A., Franco-Ramos, O., Alcántara-Ayala, I., 2020, Análisis de flujos de escombros desde un enfoque dendrocronológico en Ixtacamaxtitlán, Sierra Norte de Puebla, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 37(2), p 109-120.
- Pedraza-Gilsanz, J., 1996, Geomorfología principios, métodos y aplicaciones: Madrid, España, Editorial Rueda, S. L., 414 p.
- Pérez-Salicrup, D. R., Cantú-Fernández, M., Carlón-Allende, T., Garduño-Mendoza, E., Jaramillo-López, P. F.; Sáenz-Ceja, E., Martínez-Torrez, L., 2016, Restauración de un proceso: el fuego en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en los estados de México y Michoacán, **en** Pérez-Salicrup, D. R., Cantú-Fernández, M., Carlón-Allende, T., Garduño-Mendoza, E., Jaramillo-López, P. F.; Sáenz-Ceja, E., Martínez-Torrez, L., (eds.), Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas: Cuernavaca, Morelos, México, p 215-234.

- Phipps, R. L., 1985, Collecting, preparing, crossdating, and measuring tree increment cores: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Water Resources Division, 48 p.
- Poriles, R., 2018, Dips 6.0: desconocido, publicado 21/04/2018, disponible en <https://post.geoxnet.com/dips-6-0/>, consultado 04/05/2023.
- RAN (Registro Agrario Nacional), 2019, Perimetales núcleos agrarios SHAPE Entidad Federativa Estado de México: México, RAN, actualizado 31/12/2019, disponible en < <https://datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado--formato-shape/resource/a64dd169-4c4b-44a0-bfc3-20bedb152171>>, consultado 07/02/2022.
- Sánchez-Núñez, J. M., Pola, A., Cisneros, G., Sereno, H. I., Serrano-Flores, M. E., Jiménez, L.Á., Rodríguez, P., 2021, Physical-mechanical behavior of fresh and completely altered rocks as an important factor of slope instability in the El Rosario Monarch Butterfly Sanctuary, Michoacán, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 38, p 272-282. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.3.1674>
- Sarwar-Rais, A. S., 2019, Granulometric Analysis of Rajmahal Inter-Trappen Sedimentary Rocks (Early Cretaceous), Eastern India, Implications for Depositional History: International Journal of Geosciences, 10, p 238-253.
- Schulman, E., 1944, Dendrochronology in Mexico: Tree-Ring, Bulletin, 10(18), 24 p.
- Schweingruber, F. H., D. Eckstein, F. Serre-Bachet, O. U. Bräcker. 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. Dendrochronologia, 8, p 9–38.
- Scott, S. D., 1966, Dendrochronology in Mexico: Papers of the Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona Press, Tucson. 80 p.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2000, Angangueo E14-A26, 1:50000, Pachuca, Hidalgo, México.
- SGM, 2007, Inventario físico de los recursos minerales del municipio Ocampo Michoacán (en línea): México SGM, publicado en agosto 2007, disponible en <https://1library.co/document/zk0g2p8y-inventario-f%C3%ADsico->

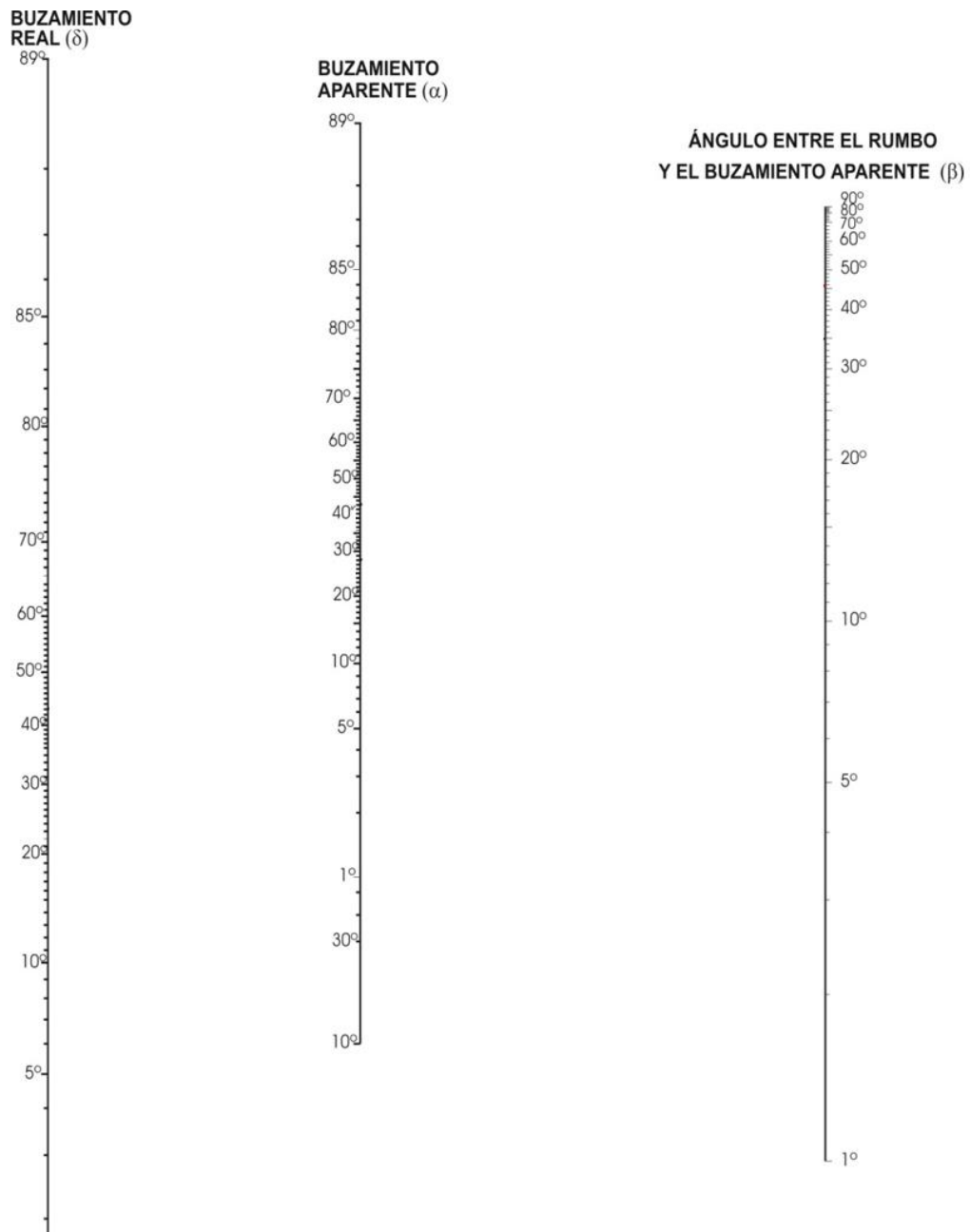
[recursos-minerales-municipio-ocampo-michoac%C3%A1n.html](#), consultado 14/04/2022

- Shroder J.F. Jr., 1978, Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah: *Quaternary Research*, 9, p 168–185. doi:10.1016/0033-5894(78)90065-0
- Sifagos, R.S., 1964, Botanical evidence of floods and flood-plain deposition: *Geological Survey Professional Paper (United States)*, 485-A, p 1-35.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca), 1998, Ordenamiento ecológico para la región de la Mariposa Monarca, Instituto Nacional de Ecología, Colegio de México, A.C., México
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2016, Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (en línea): México, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicado 10/11/2016, disponible en <<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/reserva-de-la-biosfera-mariposa-monarca-79228>>, consultado 07/02/2022.
- Solomina, O., Pavlova, I., Curtis, A., Jacoby, G., Ponomareva, V., Pevzner, M., 2008, Constraining recent Shiveluch volcano eruptions (Kamchatka, Russia) by means of dendrochronology: *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 8, p 1083–1097, <https://doi.org/10.5194/nhess-8-1083-2008>.
- Stewart, J. H., LaMarche Jr, V. C., 1967, Erosión and deposition produced by the Flood of December 1964 on coffee creek Trinity Country, California: 1ª ed., Ed. Geological Survey, Washington, D.C., E.U., 22 p.
- Stoffel, M., Corona, C., 2014, Dendroecological Dating of Geomorphic Disturbance in Trees: *Tree-Ring Research*, 70(1), p 3-20.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., 2009, What Tree Rings Can Tell About Earth-Surface Processes: Teaching the Principles of Dendrogeomorphology: *Geography Compass*, 3(3), p 1013-1037.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Vázquez-Selem, L., Franco-Ramos, O., Palacios, D., 2011, Dendrogeomorphic dating of rockfalls on low-latitude, high- elevation slopes: Rodadero, Iztaccíhuatl volcano, Mexico: *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, p 1209-1217.

- Suarez-Díaz, J., 1998, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales: Colombia, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, 540 p.
- Suarez, J., 2012, Deslizamientos. Tomo 1: Análisis Geotécnico: Colombia, Geotecnología S.A.S, 438 p.
- Strahler, A. (1957) Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. Transactions, American Geophysical Union, 38, p 913-920. <http://dx.doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Tarback, E.J., Lutgens, F. K., 2005, Ciencias de la Tierra una introducción a la geología física: Madrid, PEARSON PRENTICE HALL, 686 p.
- Ugyen Wangchuck Instiute for Conservation and Enviromental Research (UWICER), 2017, Dendrochronology Manual: Lamai Goempa, Bumthang, Bután, UWICER Press, 41 p.
- Varnes, D. J., 1958, Landslide types and processes, en Eckel, E. B. ed., Landslides in Engineering Practice, Highway Research Board: Special report, 29, p 20-47.
- Varnes, D. J., 1978, Slope movement types and processes, en Schuster, R. L., Krizek, R. J. eds., Landslides: análisis and control: Transportation Research Board. Special report, 176, p 11-33.
- Vargas-Cuervo, G., 2000, Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa: Boletín de Geología, 22 (37), p. 40-67.
- Vázquez-Ríos, M., Franco-Ramos, O., 2022, Reconstrucción dendrogeomorfológica de procesos de remoción en masa y lahares en las Barrancas Seca y Ojo Salado, Pico de Orizaba, México: Investigaciones geográficas, 107, p 1-11, DOI: [dx.doi.org/10.14350/rig.60470](https://doi.org/10.14350/rig.60470)
- Villanueva-Díaz, J., McPherson, G. R., 1995, Forest stand structure in mountains of Sonora, México and New México, USA. In: DeBano, L. F., P. E. Ffolliott, A. Ortega-Rubio, G. J. Gottfried, R. H. Hamre, and C. E. Edminster (Tech. Coord.). Biodiversity and Management of the Madrean Archipelago: The Sky Islands of the Southwestern United States and Northern Mexico. USDA-Forest Service, General Technical Report RM-GTR-264. Pp. 416-423.

- Villanueva-Díaz, J., McPherson, G. R., 1996, Reconstruction of precipitation and PDSI from tree-ring chronologies developed in mountains of New Mexico, USA and Sonora, Mexico. Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest. Hydrology Section, Arizona- Nevada Academy of Science 26:45 54.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano Paredes, J., Sthale, S. W., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., Sánchez Cohen, I., 2004, Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México: Gómez Palacio, Durango, México, eaCENID-RASPA, 37 p.
- VoorTech, 2014, Measure J2X user guide (en línea): Holderness, actualizado 21/01/2014, disponible en <http://www.voortech.com/projectj2x/docs/userGuide.htm> consultado: 14/03/2022.
- WMO, 1966, Some Methods of Climatological Analysis, WMO – No. 199. TP, 103
- WMO, 1983, Guide to Climatological Practices, WMO – 100.

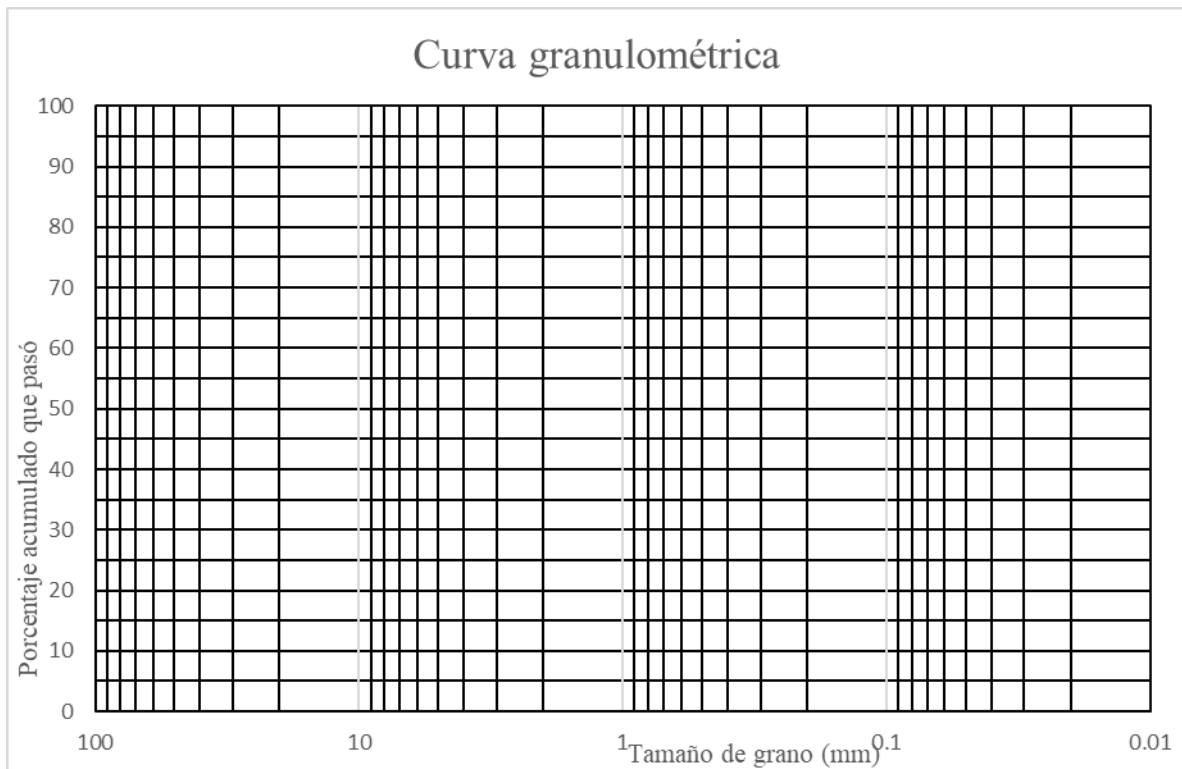
Anexos



Anexo 1. Diagrama de alineación. Tomado de Camargo (2011).

Anexo 2. Formato base para llenado de tamizados

Abertura (mm)	Peso retenido (gr)		Acumulado retenido (%)	Acumulado que pasa (%)	Clasificación
	Parcial	Acumulado			
50					Grava
37.5					
25					
19					
12.5					
9.5					
6.3					
4.75					
2.36					Arena
2					
1.7					
1.4					
1.18					
0.85					
0.6					
0.425					
0.25					
0.18					
0.15					
0.075					
Pasó					Finos
$\Sigma=$					



Anexo 3. Esquema base para trazar la curva granulométrica.

Anexo 4. Hipervínculo al mapa geológico (Figura 34) en mayor resolución.

https://drive.google.com/file/d/1MQsd5Bf_Pf2UGjysHbhvBYiXHJRftwrl/view?usp=sharing

Anexo 5. Hipervínculo al mapa geomorfológico (Figura 39) en mayor resolución.

https://drive.google.com/file/d/1BUDHPV63lc_0-0goO6awWoMLWXxsF5vq/view?usp=sharing

Criterio para la asignación de símbolos de grupo		Simbolos de grupo		
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 4	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos ^a Gravas con finos Más de 12% finos ^{a,d}	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$ ^c $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$ ^c $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GW GP GM GC
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias Menos de 5% finos ^b Arenas con finos Más de 12% finos ^{b,d}	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$ ^c $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$ ^c $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SW SP SM SC
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico Orgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e Límite líquido: secado Límite líquido: no secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OL	CL ML OL
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico Orgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2) Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2) Límite líquido: secado Límite líquido: no secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OH	CH MH OH
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico			Pt

Anexo 6. Clasificación SUCS, donde para suelos de grano grueso la G significa grava, S arena, W bien graduado, P mal graduado, M limoso y C arcilloso tomada de Das (2015).