



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PELIGROSIDAD POR CAÍDA DE ROCAS EN LA FALLA GEOLÓGICA  
ACTIVA DE PAJACUARÁN, MICHOACÁN

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

ING. MARLENE VARGAS SÁNCHEZ

TUTOR

DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA UMSNH

DRA. LUCÍA CAPRA PEDOL  
CENTRO DE GEOCIENCIAS CAMPUS JURQUILLA UNAM

DR. PABLO DÁVILA HARRIS  
INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

DR. SERGIO RAÚL RODRÍGUEZ ELIZARRARÁS  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA UNAM

M.C. FELIPE GARCÍA TENORIO  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA UNIDAD MICHOACÁN UNAM

MORELIA, MICHOACÁN A FEBRERO 2020



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.



---

# Índice general

---

<b>Índice de cuadros</b> .....	<b>VII</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>IX</b>
<b>Código de ética</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>XV</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XXI</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	3
1.2 Objetivo general .....	4
1.2.1 <i>Objetivos particulares</i> .....	4
1.3 Hipótesis .....	5
<b>2. Marco conceptual</b> .....	<b>7</b>
2.1 Procesos de remoción en masa .....	7
2.2 Caída de rocas .....	12
2.2.1 <i>Factores condicionantes y detonantes</i> .....	12
2.3 Peligrosidad .....	15
<b>3. Antecedentes</b> .....	<b>17</b>
3.1 Impacto potencial .....	17
3.2 Modelo conceptual .....	18
3.2.1 <i>Propiedades de la roca</i> .....	20

3.2.2	<i>Geometría de la ladera</i> .....	21
3.2.3	<i>Coefficientes de restitución</i> .....	22
3.3	Modelo numérico de simulación.....	27
3.3.1	<i>Dimensiones espaciales</i> .....	27
3.3.2	<i>Enfoque cinemático</i> .....	29
3.3.3	<i>Efecto del bosque</i> .....	30
3.3.4	<i>Parámetros de Rockyfor3D</i> .....	31
3.4	LiDAR terrestre.....	34
3.4.1	<i>Aplicaciones y ventajas</i> .....	36
3.5	Caída de rocas en la falla Pajacuarán.....	38
<b>4.</b>	<b>Materiales y métodos</b> .....	<b>41</b>
4.1	Preparación.....	43
4.1.1	<i>Antecedentes</i> .....	43
4.1.2	<i>Trabajo de campo</i> .....	43
4.1.3	<i>Datos de entrada</i> .....	53
4.2	Definición del escenario de desprendimiento.....	59
4.3	Simulación de caída de rocas.....	60
4.4	Verificación y validación.....	62
4.5	Delimitación de los resultados.....	63
4.6	Elaboración de los mapas.....	64
<b>5.</b>	<b>Área de estudio</b> .....	<b>65</b>
5.1	Localización geográfica.....	65
5.2	Marco geológico.....	67
5.2.1	<i>Tectónica</i> .....	68
5.2.2	<i>Geología estructural</i> .....	69
5.2.3	<i>Geomorfología regional</i> .....	72
5.2.4	<i>Estratigrafía regional</i> .....	73
5.2.5	<i>Estratigrafía local</i> .....	76
5.2.6	<i>Litología de Pajacuarán</i> .....	79
5.3	Climatología.....	85

---

5.4 Hidrografía .....	86
5.5 Edafología .....	86
5.6 Uso de suelo y vegetación .....	88
5.7 Población .....	88
5.8 Arqueología .....	90
<b>6. Modelado numérico .....</b>	<b>91</b>
6.1 Modelo digital de elevación .....	91
6.2 Datos de campo .....	92
6.3 Datos de entrada .....	97
6.4 Datos de salida .....	105
6.5 Mapa de peligrosidad por caída de rocas .....	117
<b>7. Análisis y discusión .....</b>	<b>121</b>
7.1 Trabajo de campo .....	121
7.2 Datos de entrada .....	123
7.3 Resultados del modelado numérico .....	125
7.3.1 Limitaciones y ventajas de Rockyfor3D .....	131
7.4 Peligrosidad por caída de rocas .....	133
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>135</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>137</b>
<b>Nomenclatura .....</b>	<b>155</b>
<b>Acrónimos .....</b>	<b>157</b>
<b>Terminología .....</b>	<b>161</b>
<b>Apéndice .....</b>	<b>165</b>
Exploración geológica .....	165
Vuelos con <i>eBee senseFly</i> .....	172
Escaneos con <i>RIEGL VZ-1000</i> .....	175



---

# Índice de cuadros

---

2.1	Clasificación de los procesos de remoción en masa.....	8
2.2	Tipos de mapas de zonificación asociados a la escala y nivel de detalle .....	16
3.1	Principales características de modelos de trayectoria de caída de rocas .....	30
3.2	Parámetros de entrada en <i>Rockyfor3D</i> con respecto a las zonas de la ladera.....	31
3.3	Tipo de suelo utilizado por <i>Rockyfor3D</i> y valores de $R_N$ .....	34
4.1	Fases del estudio de la trayectoria de caída de rocas.....	42
4.2	Datos de campo para <i>Rockyfor3D</i> obtenidos en diferentes zonas de la ladera.....	50
4.3	Datos de entrada requeridos para realizar simulaciones en <i>Rockyfor3D</i> .....	57
6.1	Resumen de los parámetros de las rocas inventariadas .....	95
6.2	Distribución de frecuencias y cantidad de rocas para la MOH .....	96
6.3	Resumen de los datos de entrada para <i>Rockyfor3D</i> .....	98
6.4	Parámetros de la superficie de la ladera en los polígonos homogéneos .....	99
6.5	Parámetros de la cobertura forestal de la ladera en los polígonos homogéneos.....	101
6.6	Datos de salida del modelo numérico de simulación <i>Rockyfor3D</i> .....	106
6.7	Clasificación de los parámetros utilizando la metodología RHV.....	118



---

# Índice de figuras

---

2.1	Clasificación de los procesos de remoción en masa.....	10
3.1	Nomenclatura de la velocidad para trayectorias e impactos.....	19
3.2	Nomenclatura y relación entre los ángulos en la trayectoria de caída de rocas. ....	20
3.3	Zonas de la ladera donde ocurre caída de rocas. ....	22
3.4	Trayectorias con comportamiento inelástico y pérdida de energía. ....	23
3.5	Relación entre las componentes de velocidad y coeficientes de restitución. ....	24
3.6	Relación entre la rugosidad superficial de la ladera y radio de la roca. ....	25
3.7	Efecto de la resistencia de fricción y propiedades de la roca. ....	26
3.8	Análisis del rebote en <i>Rockyfor3D</i> . ....	32
3.9	Visualización de la altura media del obstáculo. ....	33
3.10	Daños que ocasionó la roca proveniente del cerro La Estrella.....	39
3.11	Litología de la zona de despredimiento. ....	39
3.12	Porción sureste de la mancha urbana de la localidad de Pajacuarán. ....	40
4.1	Fotografía satelital de la falla y mancha urbana de Pajacuarán.....	44
4.2	Contenido del paquete estándar <i>eBee</i> y sus principales características.....	45
4.3	Dimensiones, elementos operativos y conectores de <i>RIEGL VZ-1000</i> . ....	48
4.4	Hoja de registro de campo para <i>Rockyfor3D</i> .....	52
4.5	Barra de herramientas del <i>Módulo Lidar</i> de <i>GlobalMapper</i> . ....	54
4.6	Interfaz gráfica de usuario de <i>GlobalMapper</i> .....	55
4.7	Interfaz gráfica de usuario de <i>ArcMap</i> . ....	58
4.8	Interfaz gráfica de usuario de <i>Rockyfor3D</i> antes de ejecutar la simulación. ....	60

4.9	Porción de la interfaz gráfica de usuario de <i>Rockyfor3D</i> .....	61
4.10	Interfaz gráfica de usuario de <i>Rockyfor3D</i> después de ejecutar la simulación. ....	62
5.1	Mapa base de una porción de la falla y mancha urbana de Pajacuarán. ....	66
5.2	Ubicación de la FVTM y sus tres sectores. ....	68
5.3	Mapa tectónico generalizado del sistema de subducción mexicano. ....	69
5.4	Sistemas de fallas del Mioceno-Cuaternario y volcanismo del la FVTM.....	70
5.5	Perfil geológico del rift de Chapala y su estratigrafía. ....	71
5.6	Geomorfología y geología del rift de Chapala. ....	73
5.7	Esquema de la columna estratigráfica del rift de Chapala. ....	75
5.8	Mapa geológico de una porción de la falla y mancha urbana de Pajacuarán.....	78
5.9	Perfil geológico A1-A1' de la falla Pajacuarán.....	79
5.10	Litología de la zona de desprendimiento (1). ....	80
5.11	Litología de la zona de desprendimiento (2). ....	81
5.12	Litología de la zona de tránsito .....	82
5.13	Litología de la zona de depósito.....	83
5.14	Mapa de pendientes de una porción de la falla y mancha urbana de Pajacuarán. ....	84
5.15	Mapa edafológico de una porción de la falla y mancha urbana de Pajacuarán.....	87
5.16	Ortomosaico de 12.64 cm de resolución. ....	89
6.1	Modelo digital de elevación de 2 m de resolución. ....	92
6.2	Ubicación del evento de caída de rocas de noviembre de 2013. ....	93
6.3	Áreas inventariadas y zonas de la ladera.....	94
6.4	Diámetro de las rocas inventariadas en las áreas P1 y P2. ....	95
6.5	Altura media de los obstáculos registrada en las áreas P1 y P2. ....	96
6.6	Mapa de pendientes derivado del modelo digital de elevación.....	97
6.7	Polígonos homogéneos de las zonas de la ladera. ....	98
6.8	Posición de los bloques inventariados en el campo. ....	104
6.9	Archivo de registro de la simulación en <i>Rockyfor3D</i> . ....	105
6.10	Mapa de los valores máximos de energía cinética. ....	108
6.11	Mapa de los valores máximos de altura de salto. ....	109

---

<b>6.12</b>	Mapa de los valores máximos de velocidad .....	110
<b>6.13</b>	Mapa del tiempo mínimo.....	111
<b>6.14</b>	Mapa de los volúmenes máximos.....	112
<b>6.15</b>	Mapa de la posición de los bloques depositados. ....	113
<b>6.16</b>	Mapa de las trayectorias de caída de rocas.....	114
<b>6.17</b>	Mapa de la probabilidad de alcance por caída de rocas. ....	115
<b>6.18</b>	Mapa de la posición de los impactos contra árboles. ....	116
<b>6.19</b>	Mapa de la peligrosidad por caída de rocas.....	119
<b>6.20</b>	Mapa de zonificación de la peligrosidad por caída de rocas. ....	120
<b>7.1</b>	Modelos digitales de sombras generados a partir de MDE y MDS. ....	122
<b>7.2</b>	Nube de puntos TLS con y sin la nube de puntos UAV.....	123
<b>7.3</b>	Simulación en <i>Rockyfor3D</i> con MDE de 1 m de resolución.....	124
<b>7.4</b>	Simulación en <i>Rockyfor3D</i> con MDE de 5 m de resolución.....	125
<b>7.5</b>	Resultados de la simulación a lo largo del perfil A1-A1'. ....	128
<b>7.6</b>	Archivos de registro en <i>Rockyfor3D</i> con y sin la cobertura forestal.....	130



## ***Código de Ética***

*“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.*

***Marlene Vargas Sánchez***

A handwritten signature in black ink, enclosed within a large, hand-drawn oval. The signature is cursive and appears to read 'Marlene Vargas Sánchez'.



*A Dios y a la vida*



## ***Agradecimientos***

***A las instituciones***, que me han brindado la formación académica necesaria para realizar este proyecto de investigación, particularmente la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Por su apoyo económico, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

***A Pajacuarán***, por la hospitalidad de sus habitantes y su contribución en el trabajo de campo, en especial al H. Ayuntamiento, Protección Civil y Colegio de Bachilleres del Estado de Michoacán.

***A mi tutor***, el Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, por su guía, apoyo, paciencia, calidez y comprensión, tanto en el ámbito académico, como en el profesional y personal.

***A mi comité tutorial***, la Dra. Lucía Capra Pedol, el Dr. Jesús Arturo Muñiz Jauregui y el Dr. Antonio Pola Villaseñor, por sus observaciones y aportaciones en el desarrollo del proyecto de investigación. Al Dr. Pablo Dávila Harris, Dr. Sergio Raúl Rodríguez Elizarrarás y M.C. Felipe García Tenorio, por formar parte de mi jurado examinador. Y, al Dr. Mario Rodríguez Martínez y Dr. Gabriel Vázquez Castro, por su orientación como responsables de sede de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia.

***A mis profesores***, el Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy<sup>†</sup>, el Dr. Hilario Rafael Torres de León, el M.C. Felipe García Tenorio, el Dr. Jesús Arturo Muñiz Jauregui, la Dra. Berenice Solís Castillo, el Dr. Gabriel Vázquez Castro, el M.G. Guillermo Cisneros Máximo, la Dra. Gabriela Gómez Vasconcelos, el Dr. Mathieu Pertou, el Dr. Xavier de Bolós, y los docentes del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Alexander Quevedo, Jairo López y Richard Lemoine.

***A mis compañeros***, por su amistad, consejos, apoyo moral y experiencias inolvidables. En particular a Lucy, Ana, Vania, Hugo, Andrés y Pedro.

***A mi familia y seres queridos***, mi mamá y mi papá, mis héroes y modelos a seguir. A mis hermanas, Miryam e Isabel, quienes me apoyan incondicionalmente. A Víctor, por estar a mi lado a pesar de las adversidades. A Gina, por acompañarme en este proceso. Los quiero y admiro.



---

# Resumen

---

En México, durante la temporada de lluvias es común que las regiones montañosas se vean afectadas por distintos procesos de remoción en masa. Tal fue el caso registrado en noviembre de 2013 cuando ocurrió un evento de caída de rocas debido a un período de lluvias prolongado en la falla geológica de Pajacuaran, ubicada al noroeste del estado de Michoacán. La litología del relieve y topografía accidentada, en conjunto con las fuertes precipitaciones, sismicidad local, y actividad antrópica favorecen la caída de rocas en la zona de falla. El propósito de esta investigación es evaluar la peligrosidad por caída de rocas mediante un modelo numérico de simulación en 3D. A lo largo de una porción de la falla Pajacuarán, se llevó a cabo un inventario de las rocas y se realizaron seis escaneos a partir de LiDAR terrestre para adquirir coordenadas de más de 135 millones de puntos. Con base en el procesamiento de nubes de puntos, se obtuvo el modelo digital de elevación de 2 m de resolución para definir la topografía y rugosidad de la superficie de la ladera. Al aplicar el modelo *Rockyfor3D*, logramos establecer la probabilidad de alcance y el punto de depósito de las rocas susceptibles a desprendimiento. Asimismo, se determinaron los valores máximos de energía cinética (~ 110,000 kJ), altura de salto (~ 15 m) y velocidad (~ 42 m/s) de los bloques a lo largo de su trayectoria de caída. Estos resultados proporcionan información de gran utilidad para elaborar mapas temáticos y de zonificación de la peligrosidad por caída de rocas. Nuestros hallazgos pueden ser de provecho para los tomadores de decisiones con respecto a la prevención y mitigación de desastres, así como ayudar en la regulación del crecimiento urbano en este entorno de peligro.

**Palabras clave:** LiDAR, escáner láser terrestre, modelo numérico de simulación 3D, inestabilidad de laderas



---

# Abstract

---

In Mexico, during hurricane season mountain regions are affected by rainfall-induced landslides on a yearly basis. The Pajacuaran Fault, located northwest of the state of Michoacan, experienced an intense rockfall event at the beginning of November 2013 due to an exceptional rainy season. The high precipitation regime and local seismic activity, as well as the rugged topography the town of Pajacuaran has been built on, couple with the lack of a proper urban development plan to contribute to the rockfall hazard in the area. This investigation focuses on a rockfall trajectory study by means of a 3-D simulation model. We conducted a detailed rockfall inventory and a total of six scans through terrestrial laser scanning to acquire coordinates of more than 135 million points along a portion of the active Pajacuaran geological fault. Based on point cloud processing, we created a 2-meter resolution digital elevation model to define the slope's topography and surface roughness. By applying the simulation model, *Rockyfor3D*, we were able to determine the reach probabilities and estimate the runout zones of falling rocks, in addition, to quantify the maximum kinetic energy (~ 110,000 kJ), passing height (~ 15 m) and velocity (~ 42 m/s) along their fall path. Ultimately, these results provide useful information to determine the potential rockfall threat and create a hazard zone map. Our findings can be helpful to authorities in charge of decision making with regards to disaster prevention and mitigation, as well as to aid in the regulation of future expansion in these hazardous settings.

**Keywords:** LiDAR, terrestrial laser scanning, 3-D simulation model, landslide, hazard



# Introducción

---

Los procesos de remoción en masa (PRM) se presentan sobre la superficie terrestre en una extensa variedad de escalas, lugares, condiciones geológicas, climáticas e, inclusive, sociales. El término remoción en masa, también conocido como inestabilidad de laderas, describe los procesos geomorfológicos que resultan en movimientos pendiente abajo de roca, regolito, suelo, relleno artificial o una combinación de estos, bajo la influencia directa de la gravedad. Estos materiales formadores de laderas se pueden desplazar por caída, volteo, deslizamiento, reptación o flujo (Varnes, 1978). La clasificación de los PRM suele referirse al tipo de material involucrado, mecanismo de rotura y propagación del movimiento; considerando también otros aspectos como el contenido de agua, aire o hielo del material, y la velocidad y magnitud del movimiento (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; EPOCH, 1993; Dikau *et al.*, 1996; Cruden y Varnes, 1996; por mencionar algunos). Entre las áreas más propensas a la inestabilidad están las regiones montañosas y relieves con procesos erosivos y de meteorización, así como zonas sísmicas, volcánicas y de precipitación elevada. En lugares como estos se producen los movimientos de ladera masivos que, por su gran extensión y frecuencia, constituyen un peligro geológico muy importante que afecta a la infraestructura pública y privada, llegando en algunos casos a superar el impacto producido por terremotos e inundaciones (Suárez-Díaz, 1998; CENAPRED, 2001; González de Vallejo *et al.*, 2002; USGS; 2004; Guzzetti, 2005; Tarbuck y Lutgens, 2005).

Entre los tipos de inestabilidad de laderas, la caída de rocas es uno de los más destructivos que afecta a los asentamientos humanos. En estos eventos un fragmento de roca de cualquier tamaño se desprende abruptamente de una ladera escarpada o acantilado, y desciende a través del aire por caída libre, rebotando y rodando (Varnes, 1978). El desprendimiento de los

bloques está condicionado principalmente por la litología, las características geométricas de la ladera y la presencia de fallas, fracturas o juntas. Por otro lado, la caída de un bloque lo detonan factores como el clima, vegetación, meteorización, actividad sísmica, volcánica e, incluso, antrópica (Varnes, 1984; Ayala-Carcedo *et al.*, 1987; Sidle y Ochiai, 2006; Turner y Jayaprakash, 2012; Paredes *et al.*, 2015; Wyllie, 2015; Corominas *et al.*, 2017).

La caída de rocas es un proceso repentino y sumamente rápido, que además exhibe energía cinética elevada, lo cual incrementa su capacidad de daño y, a su vez, implica un peligro contundente en vías de comunicación y edificaciones ubicadas en zonas montañosas. Turner y Jayaprakash (2012), prepararon una lista exhaustiva de registros de eventos históricos de caída de rocas que demuestra que inclusive volúmenes relativamente pequeños pueden causar daños significativos en las vialidades y disturbios en el tránsito vehicular. Asimismo, estudios recientes han demostrado que las pérdidas ocasionadas por los PRM y, particularmente, la caída de rocas se concentra en países en vías de desarrollo, en los cuales existe déficit de investigación y, a menudo, falta de recursos (Guzzetti *et al.*, 1999; Glade *et al.*, 2005; Sidle y Ochiai, 2006; Petley, 2012; Corominas *et al.*, 2017).

México es un país expuesto a diversos fenómenos naturales de carácter catastrófico, por su ubicación geográfica, características orográficas e hidrológicas, así como actividad sísmica y volcánica. Por otro lado, el crecimiento urbano en sitios inadecuados debido a la falta de la planificación del territorio y el cambio de uso de suelo aumentan la peligrosidad por inestabilidad de laderas (CENAPRED, 2001; SEGOB y CENAPRED, 2001; Parada-Ávila; 2017).

Durante la temporada de huracanes, los relieves montañosos en México son afectados anualmente por distintos PRM. En la mayoría de los casos, las lluvias torrenciales han sido el factor detonante de estos fenómenos, como el ocurrido en noviembre de 2013 en la localidad de Pajacuarán del estado de Michoacán, donde se desprendió un bloque de aproximadamente 2 m de diámetro y peso de 15 a 20 t (Noticias en Michoacán, 2013). A pesar del impacto que este evento tuvo en la población, la zona no ha sido estudiada con respecto a los procesos de inestabilidad de laderas. Por tal motivo, surge la necesidad de realizar una evaluación de la peligrosidad por caída de rocas en la falla geológica activa de Pajacuarán.

Para determinar la peligrosidad por caída de rocas, se propone emplear el programa computacional *Rockyfor3D* (Dorren, 2016), un modelo numérico de simulación en tres dimensiones (3D). Los resultados permitirán evaluar la trayectoria de los bloques a lo largo de la ladera y crear un mapa de peligrosidad por caída de rocas. Esto resultará de gran utilidad para las autoridades, gestores y técnicos de la localidad, ya que servirá como herramienta para establecer medidas de prevención y mitigación por caída de rocas.

## **I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La falla geológica de Pajacuarán se caracteriza por su relieve abrupto y laderas escarpadas. Las condiciones topográficas, en conjunto con determinados factores como fuertes precipitaciones y actividad sísmica local, favorecen el desprendimiento de rocas en esta región. Asimismo, el cambio de uso de suelo y crecimiento desmedido de la mancha urbana, han llevado a que esta se desarrolle en sitios altamente vulnerables, donde existe evidencia de zonas susceptibles a la caída de rocas e, incluso, donde ya han ocurrido eventos de esta naturaleza.

Lamentablemente, no se ha llevado a cabo ningún tipo de estudio por inestabilidad de laderas – ni de otros peligros geológicos – en la localidad de Pajacuarán, como en la gran mayoría de las poblaciones de México. No solo han sido escasos los intentos realizados por parte de las autoridades para introducir estrategias de planificación del territorio, sino que tampoco existe normatividad que regule el desarrollo urbano ni que demande estudios previos a la construcción civil.

Por otro lado, la percepción social del peligro en zonas susceptibles a los PRM también supone un problema añadido. La situación ideal sería que estas áreas no fueran ocupadas por asentamientos humanos. Sin embargo, una vez habitadas surge la necesidad de identificar zonas que potencialmente pueden ser afectadas por un evento de caída de rocas, y con ello poder ayudar en la prevención de desastres.

## **I.2 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la peligrosidad por caída de rocas en la falla geológica activa de Pajacuarán mediante un modelo numérico de simulación en 3D con base al modelo digital de elevación de alta resolución espacial obtenido a través de escáner láser terrestre.

### **I.2.1 Objetivos particulares**

- Revisar la información bibliográfica existente a partir de libros de texto que tienen como tema central los PRM y, particularmente, la caída de rocas, así como consultar artículos y trabajos de tesis que hacen referencia al uso de técnicas LiDAR y modelos numéricos de simulación en 3D para casos de inestabilidad de laderas.
- Crear el mapa base y los mapas temáticos del área de estudio a partir de la literatura consultada y sistemas de información geográfica del INEGI como modelo digital de elevación (resolución de 15 m), y cartas geológicas, topográficas, edafológicas, de uso de suelo y vegetación (escala 1: 50'000 y 1: 250'000).
- Adquirir imágenes fotográficas de gran resolución a partir del vehículo aéreo no tripulado (*eBee senseFly*) y registrar nubes de puntos por medio del escáner láser terrestre (*RIEGL VZ-1000*) de la zona urbana y escarpes de la falla geológica de Pajacuarán.
- Generar con software especializado el ortomosaico, el modelo digital de superficie (*eMotion, Postflight Terra 3D*) y el modelo digital de elevación de gran resolución (*RiSCAN PRO, GlobalMapper, ArcMap*), a través del procesamiento de las ortofotos y nubes de puntos del vehículo aéreo no tripulado y escáner láser terrestre, respectivamente.
- Lograr la verificación y validación de los resultados al aplicar el modelo numérico de simulación en 3D (*Rockyfor3D*).
- Elaborar los mapas temáticos y el mapa de peligrosidad por caída de rocas de la zona urbana y escarpes de la falla geológica de Pajacuarán.

### **I.3 HIPÓTESIS**

El proceso de caída de rocas está condicionado por la litología del relieve y morfología abrupta de la zona de falla. Si se determinan con exactitud las formas y tamaños de los fragmentos de roca, se identifican los escarpes susceptibles a desprendimiento, y se define la topografía de la ladera con alta resolución espacial a partir del escáner láser terrestre, será posible realizar el modelado numérico de la caída de rocas para evaluar la probabilidad de alcance y distribución espacial de los bloques depositados, así como cuantificar la energía cinética, altura de salto y velocidad a lo largo de la trayectoria de caída. Emplear el modelo numérico de simulación, *Rockyfor3D*, será de gran utilidad para definir las zonas que potencialmente pueden ser afectadas por caída de rocas y para elaborar un mapa de peligrosidad de una porción de la falla geológica activa de Pajacuarán.



# Marco conceptual

---

### 2.1 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

Existen diferentes términos con los cuales se hace referencia a los procesos de remoción en masa (PRM). Dichas expresiones se utilizan en las distintas disciplinas involucradas para su estudio, de tal manera que conceptos tales como inestabilidad de laderas, procesos gravitacionales, movimientos de ladera o deslizamientos de tierra, son empleados ampliamente.

El término deslizamiento (*landslide*), tal como lo define Cruden (1991), denota “el movimiento de una masa de roca, detritos o suelo por una ladera”. Varnes (1978) indicó que movimiento de ladera (*slope movement*) sería un término más adecuado, ya que no infería el proceso, y lo definió como “un movimiento hacia abajo y hacia fuera de materiales formadores de ladera bajo la influencia de la gravedad”. Dikau *et al.* (1996) prefirieron el término remoción en masa (*mass movement*) y lo distinguieron como “un proceso que no requiere un medio de transporte como agua, aire o hielo”. Por lo tanto, los PRM (*mass movement processes*) se pueden definir como un movimiento descendente de materiales formadores de laderas – como roca, regolito, suelo, relleno artificial o una combinación de estos – bajo la influencia de la gravedad. Los materiales se pueden desplazar por caída, volteo, deslizamiento, flujo o expansión lateral cuando una ladera se vuelve inestable a consecuencia de cambios en el relieve originados por la combinación de varios factores, tanto naturales como antropogénicos (Varnes, 1978; Alcántara-Ayala, 2000; Vargas-Cuervo, 2000; Hungr *et al.*, 2013).

La clasificación de los PRM suele referirse al tipo de materiales involucrados, mecanismo y tipo de rotura, considerando también otras características como el contenido de agua, aire o hielo del material, así como la velocidad y magnitud del movimiento. En la literatura científica y técnica existen diversos sistemas de clasificación de los movimientos de ladera,

propuestos por varios autores. Con respecto a los atributos morfológicos de los movimientos, tanto de la superficie de ruptura como del área de depósito, tenemos las clasificaciones de Skempton (1953), Blong (1973), Brunsden (1973) y Crozier (1973); para el tipo y velocidad del movimiento las de Sharpe (1938), Ward (1945), Hutchinson (1968), Zaruba y Mencl (1969), Nemcok *et al.* (1972), Coates (1977) y Varnes (1978); para el tamaño y tipo de los materiales involucrados tenemos nuevamente a Zaruba y Mencl (1969), Coates (1977), Varnes (1978) y Sassa (1989); para la antigüedad del movimiento a Zaruba y Mencl (1969); para el grado de actividad a Erskine (1973); y para la clasificación climática a Sharpe (1938) y Hutchinson (1968). La primera clasificación de amplia aceptación fue la de Sharpe (1938). Con posterioridad las de Varnes (1958; 1978) y Hutchinson (1988). Y, más recientemente, las de EPOCH (1993), Dikau *et al.* (1996), y Cruden y Varnes (1996).

La clasificación más aceptada y aplicada a nivel internacional se basa en el mecanismo del movimiento, por lo que, de manera general, estos movimientos se dividen en caídas, vuelcos, deslizamientos, flujos, expansiones laterales y movimientos complejos. Una simple y completa clasificación que considera estos aspectos es la ofrecida por el programa EPOCH (1993), la cual a partir de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), elabora una diferenciación entre el mecanismo de movimiento y los materiales involucrados. De acuerdo con esta clasificación, los diferentes movimientos se subdividen según los materiales formadores, los cuales pueden ser rocas, detritos y suelos (Cuadro 2.1).

**Cuadro 2.1** Clasificación de los procesos de remoción en masa

Mecanismo del movimiento	Tipo de material involucrado		
	Rocas	Detritos	Suelos
Tipo			
Caída	Caída de rocas	Caída de detritos	Caída de suelos
Vuelco	Vuelco de rocas	Vuelco de detritos	Vuelco de suelos
Deslizamiento rotacional simple	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo
Deslizamiento traslacional	Deslizamiento de rocas en bloque	Deslizamiento de detritos en bloque	Deslizamiento traslacional de suelos
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de detritos	Coladas de barro
Flujo	Flujo de rocas	Flujo de detritos; reptación	Flujos de tierra, arena o suelo; reptación
Expansión lateral	Expansión lateral de rocas	Expansión lateral de detritos	Expansión lateral de suelos
Movimiento complejo	Combinación de dos o más tipos de movimiento		

Fuente: información tomada de EPOCH (1993) a partir de Varnes (1978) y Hutchinson (1988).

---

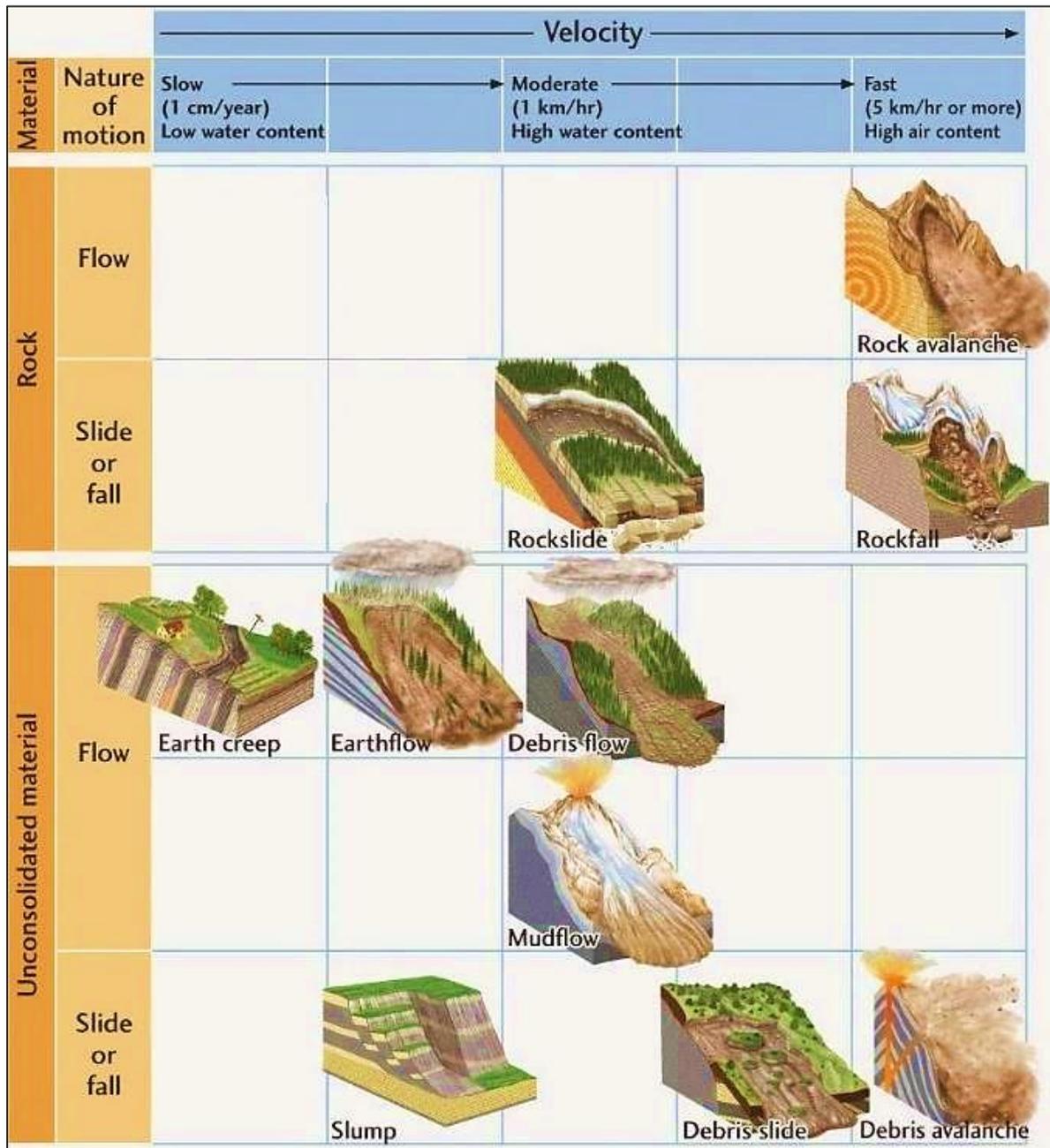
Según el Programa de la Comunidad Europea (EPOCH, 1993), a continuación, se presenta una breve descripción de los tipos de movimiento con un conjunto de características morfodinámicas y morfológicas particulares.

**Caídas.** También conocidos como desprendimientos, son movimientos repentinos en caída libre de una masa de material de cualquier tamaño. Este tipo de movimiento se origina por el desprendimiento del material de una superficie inclinada, el cual puede posteriormente rebotar, rodar o deslizarse ladera abajo. Estos movimientos son definidos con base al material involucrado, por lo que se clasifican de manera general en caída de rocas (*rockfall*; Fig. 2.1), detritos (*debris fall*) y suelos (*soil fall*). La velocidad de estos movimientos puede ser rápida a extremadamente rápida. Este movimiento ocurre en zonas de alta pendiente, tanto de tipo natural como artificial, y la gravedad constituye el principal agente del movimiento.

**Vuelcos.** También conocidos como desplomes, volcamientos o volteos, son movimientos producidos sobre una ladera o talud por la acción de la gravedad y por la rotación, hacia delante, de un material rocoso – como capas litológicas, rocas estratificadas o diaclasas – alrededor de un punto de giro localizado en su parte inferior. Pueden variar en velocidad de extremadamente lentas a extremadamente rápidas, y se clasifican en vuelco de rocas (*rock topple*), detritos (*debris topple*) y suelos (*soil topple*).

**Deslizamientos.** Son movimientos caracterizados por desarrollar una o varias superficies de ruptura, una zona de desplazamiento y una zona de acumulación de material desplazado, bien definidas. Son los movimientos que presentan más criterios de clasificación. Ocurren sobre laderas de pendientes suaves a escarpadas, sobre todo tipo de materiales litológicos. Se propaga a diferentes velocidades y en ellos pueden operar distintamente uno o varios agentes de movimiento como agua, aire o viento.

La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento, de forma que, las superficies curvas o cóncavas se asocian a deslizamientos rotacionales (*rotational slide* o *slump*), mientras que las superficies de ruptura semiplanas u onduladas se relacionan a los movimientos traslacionales (*translational slide*, *block slide* o *slab slide*), y las superficies planas a los deslizamientos planares (*rockslide*, *debris slide*, *mudslide*; Fig. 2.1).



**Figura 2.1** Clasificación de los procesos de remoción en masa de acuerdo con el material dominante (roca o material no consolidado); tipo de movimiento (flujo, deslizamiento o caída); velocidad del movimiento (lenta, moderada o rápida); y, contenido de agua o aire (bajo o alto). Fuente: Geology In, 2015.

**Flujos.** Son movimientos relativos a material litológico de textura fina a gruesa que se desplaza a lo largo de una superficie de falla bien definida, generalmente de tipo planar, la cual sigue una discontinuidad formada por un cambio litológico, estructura geológica o propiedad geotécnica. Aunque comúnmente los flujos están caracterizados como movimientos rápidos y compuestos por lodos, también pueden ser lentos y compuestos por rocas y suelos no saturados. En general, estos movimientos se identifican por su forma alargada y estrecha. Se diferencian de los deslizamientos por su morfología de conjunto en lámina sobre una ladera o por el encauzamiento sobre un drenaje.

Los flujos de lodo (*mudflow*), arena o suelo (*earth creep*, *earthflow*; Fig. 2.1) se caracterizan por presentar baja cohesión. Generalmente se originan en materiales de textura fina (arcilla o limo), aunque en su transporte pueden involucrar materiales rocosos de mayor tamaño (bloques) y restos vegetales. El principal agente de movimiento es el agua que satura el material litológico y este comienza a fluir cuando supera el límite de plasticidad. Los flujos de roca (*rock flow* o *deep creep*) o detritos (*debris flow* o *creep*) ocurren por lo regular en zonas de rocas muy fracturadas, y a lo largo de drenajes de alta pendiente y de régimen temporal. Estos movimientos son de ocurrencia intermitente y velocidades variables.

**Expansiones laterales.** Son movimientos de terreno en sentido lateral o casi horizontal, en donde subyacen masas rocosas fracturadas y materiales de composición arcillosa. Estos movimientos se relacionan con los fenómenos de licuefacción o fluidización de los materiales por la actividad sísmica, principalmente en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad. En general, estos movimientos en masa son lentos, de características complejas y de difícil apreciación sobre el terreno. Se clasifican en expansiones laterales en rocas (*rock spread*), detritos (*debris spread*) y suelos (*soil spread*).

**Movimientos complejos.** Suceden cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al desplazarse ladera abajo. Es decir, un movimiento complejo ocurre cuando se presentan diferentes tipos de mecanismos de ruptura o falla, y la combinación de dos o más movimientos en masa. Entre los más importantes se encuentran los aludes o avalanchas de rocas (*rock avalanche*) o detritos (*debris avalanche*), los flujos deslizantes (*flow slide*), y la rotación con flujo de tierras (*slump-earthflow*; Fig. 2.1).

## 2.2 CAÍDA DE ROCAS

La caída de rocas es un PRM en el cual un fragmento de roca de cualquier tamaño se desprende abruptamente de una ladera escarpada o acantilado, y desciende a través del aire por caída libre, rebotando, rodando y deslizando (Varnes, 1978). Cruden y Varnes (1996) agregan que el desprendimiento de la roca sucede a lo largo de una superficie en la que se produce poco o ningún desplazamiento de cizalla. La característica principal de este proceso es que la masa de roca desciende muy rápidamente y, además, prácticamente no existe interacción entre los fragmentos de roca móviles, ya que estos interactúan principalmente con la superficie de la ladera (Hungry *et al.*, 2014). La caída de rocas se considera un movimiento relativamente pequeño, que se limita al desprendimiento de bloques individuales formados por discontinuidades en los macizos rocosos (Selby, 1982). Por lo tanto, este proceso debe distinguirse de los deslizamientos y avalanchas de rocas que, en cambio, son desprendimientos de grandes volúmenes de masas rocosas debidos al colapso repentino de una porción de toda la ladera (Cruden y Varnes, 1996).

Una roca desprendida desciende a través de distintos tipos de movimiento, es decir, puede caer, rebotar, rodar o deslizarse según el ángulo de inclinación de la ladera. Durante la caída libre pueden ocurrir dos modos diferentes de caída: el bloque gira alrededor de su centro de masa o se produce una traslación del centro del bloque (Azzoni *et al.*, 1995). Si el ángulo de inclinación de la ladera se encuentra por debajo de  $60^\circ$ , la caída se transforma en rebote. Durante el proceso de rebote, el ángulo entre la trayectoria del bloque y la ladera, y las propiedades físicas de la superficie de la ladera, serán lo que determinan el comportamiento del rebote (Hungry y Evans, 1988). Si el ángulo de inclinación es menor a  $45^\circ$ , el bloque empezará a rodar o puede, inclusive, ocurrir una combinación entre rodadura y deslizamiento (Ritchie, 1963). La velocidad de la caída de rocas se clasifica como muy rápida a extremadamente rápida, de 0.3 m/min a más de 5 m/s (Cruden y Varnes, 1996).

### 2.2.1 Factores condicionantes y detonantes

Los factores que controlan la caída de rocas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre la ladera. Los factores pasivos o condicionantes dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los factores activos o detonantes pueden ser considerados como agentes externos que provocan o desencadenan la

---

inestabilidad y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los desprendimientos (Ayala-Carcedo *et al.*, 1987; Norrish y Wyllie, 1996; Wyllie y Mah, 2004; Sidle y Ochiai, 2006; Turner y Jayaprakash, 2012; Paredes *et al.*, 2015; Wyllie, 2015).

En otras palabras, los factores condicionantes son los que controlan la estabilidad de la ladera, por lo tanto, determinan si y donde un mecanismo de inestabilidad es cinemáticamente factible. La separación de los bloques, su tamaño y forma, está condicionada principalmente por la litología, estructura geológica y discontinuidades de los macizos rocosos. Las propiedades físicas y resistentes de los materiales también están directamente relacionadas con la litología. De igual manera, las características morfológicas y geométricas de la ladera son fundamentales para la predisposición a la inestabilidad.

**Geología.** La litología, estratigrafía y estructura geológica determinan la susceptibilidad de la caída de bloques en los macizos rocosos. Del mismo modo, los planos de discontinuidad pueden actuar como superficies de ruptura, por lo que, las características de las discontinuidades existentes – como su orientación, espaciado y persistencia – determinan el mecanismo de falla que puede ser de tipo planar, circular, en cuña, por inclinación, o por colapso de la estructura. Asimismo, las propiedades geomecánicas de la matriz, de las discontinuidades y del macizo rocoso, en su conjunto, controlan la resistencia de los materiales y su comportamiento.

**Topografía.** Las características morfológicas y geométricas de la ladera también representan un factor condicionante para el desprendimiento de bloques de roca, ya que se requiere determinada pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales. En consecuencia, las regiones montañosas son las zonas más propensas a los PRM y, en particular, a la caída de rocas.

Por otro lado, los factores detonantes son aquellos que influyen directamente en el desprendimiento de un bloque y desencadenan el movimiento del mismo. Con respecto a los factores que detonan la caída de rocas, los más importantes son el clima, la meteorización, la erosión, la vegetación, la sismicidad, el vulcanismo y las actividades antrópicas.

**Clima.** Las condiciones climáticas están relacionadas fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones. El agua en los macizos rocosos da lugar a presiones que alteran los estados tensionales e inicia procesos de meteorización física y química, los cuales modifican las propiedades y la resistencia de los materiales. Las precipitaciones

intensas, durante horas o días, pueden desencadenar desprendimientos de bloques previamente separados del macizo rocoso. Asimismo, los periodos lluviosos prolongados, de semanas o meses, suelen ocasionar un incremento importante de los fenómenos de inestabilidad en zonas susceptibles. Los procesos de hielo-deshielo estacionales, a su vez, provocan desprendimientos en macizos competentes, donde el hielo ocasiona la meteorización y fracturación del material.

**Meteorización y erosión.** La meteorización, erosión o socavación de las laderas, escarpes y acantilados modifica el estado tensional en estas zonas. Y, debido a la falta de apoyo en los materiales suprayacentes, este proceso puede generar desprendimientos.

**Vegetación.** En climas húmedos, donde la vegetación y, particularmente, el crecimiento de los árboles suele ser prolífico, las raíces de estos pueden penetrar distancias considerables en las grietas de los macizos rocosos. Las raíces a menudo son lo suficientemente fuertes como para abrir y extender estas grietas e, incluso, fracturar rocas intactas. Un efecto adicional del crecimiento de raíces en las grietas es permitir una mayor infiltración del agua y hielo en los macizos rocosos, lo cual favorece el desprendimiento de rocas.

**Sismicidad y vulcanismo.** Los sismos también pueden generar movimientos de ladera dependiendo de su magnitud, distancia al epicentro y características de los materiales. En ocasiones, las víctimas atribuidas a los sismos son efecto de los deslizamientos que estos desencadenan. Del mismo modo, las erupciones volcánicas pueden detonar la caída de bloques de roca de gran magnitud en las laderas que forman la estructura volcánica. Los efectos de la actividad sísmica y volcánica pueden variar desde la caída de rocas individuales a caídas múltiples, así como detonar otros PRM.

**Actividad antrópica.** Entre las principales causas de inestabilidad por acciones humanas se pueden mencionar la sobrecarga de estructuras ubicadas en laderas, excavaciones y explosiones llevadas a cabo en la minería y en obras de construcción y, sobre todo, la modificación de la geometría y pendiente de las laderas. Además, la presencia de áreas urbanas instaladas de forma irregular sobre las laderas puede alterar las condiciones hidrológicas, y de escurrimiento e infiltración del agua, siendo esta un factor importante en la caída de rocas.

## 2.3 PELIGROSIDAD

La peligrosidad no debe confundirse con peligro (*hazard*), vulnerabilidad (*vulnerability*), susceptibilidad (*susceptibility*) o riesgo (*risk*), que son términos relacionados pero diferentes del de peligrosidad (véase también en *Terminología* del presente trabajo).

Según Crozier y Glade (2005), peligro se refiere a una entidad física real – proceso o situación – potencialmente perjudicial que puede causar la pérdida de vidas, lesiones, daños a la propiedad, trastornos sociales o económicos, y la degradación ambiental (Labiouse y Abbruzzese, 2011). Los peligros pueden tener diferentes orígenes, ya sean naturales – geológicos, hidrometeorológicos, biológicos – o inducidos por procesos humanos – contaminación, tecnológicos. Asimismo, estos pueden ser únicos, secuenciales o combinados en su origen y efectos (Burton *et al.*, 1964; Guzzetti *et al.*, 1999).

Peligrosidad (Crozier y Glade, 2005), por otro lado, tiene una definición más técnica y no se refiere a un proceso, sino a una condición amenazante que resulta del comportamiento de ese proceso, expresada como la probabilidad de ocurrencia de una magnitud dada.

Cabe señalar que no existe un consenso general sobre la definición de peligrosidad. En las ciencias de la Tierra, por ejemplo, el término se utiliza para definir la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período de tiempo específico y en un área determinada, para un fenómeno particular potencialmente dañino de una magnitud e intensidad dada (Varnes *et al.*, 1984; Guzzetti *et al.*, 1999; Fell *et al.*, 2005). Además, la recurrencia temporal de los eventos puede expresarse como una probabilidad de ocurrencia dentro de un período de tiempo determinado o como una frecuencia de ocurrencia.

La evaluación de la peligrosidad debe considerar el análisis de susceptibilidad y asignar una recurrencia temporal a los probables eventos de gran magnitud. Al evaluar la peligrosidad por caída de rocas, es necesario tener en cuenta y caracterizar dos procesos sucesivos: el desprendimiento de fragmentos de roca – mecanismo de falla, ubicación, volumen, frecuencia de ocurrencia – y su propagación de caída cuesta abajo – trayectoria, alcance, energía cinética, altura de salto y velocidad (Dorren *et al.*, 2011; Labiouse y Abbruzzese, 2011).

Según las definiciones anteriores, se debe hacer una distinción entre los tipos de zonificación de caída de rocas, es decir, entre susceptibilidad, peligrosidad y riesgo. Aunque estos términos comúnmente se emplean indistintamente en la literatura (Cascini *et al.*, 2005;

Fell *et al.*, 2008; Labiouse y Abbruzzese, 2011), cada tipo difiere en su propósito, escala de mapeo, nivel de detalle y datos de entrada. El mapa obtenido de un análisis de susceptibilidad considera el mecanismo de falla, magnitud y, en ocasiones, distribución espacial y alcance, pero no toma en cuenta la frecuencia. Por otro lado, una zonificación de peligrosidad debe proporcionar la probabilidad de ocurrencia de caída de rocas y estimación de su intensidad. Por último, un análisis de riesgo es más integral y complejo, ya que define el grado de vulnerabilidad de los elementos con respecto a un peligro determinado, y estima los daños o pérdidas económicas en la zona afectada por dicho fenómeno natural.

Además, la zonificación de caída de rocas se puede realizar a diferentes escalas: regional, local y específica del sitio (Fell *et al.*, 2008; Dorren *et al.*, 2011; Labiouse y Abbruzzese, 2011). Cada una de estas escalas requiere un grado distinto de detalle y precisión de los datos de entrada y, en consecuencia, la cantidad y confiabilidad de la información que proporcionan varían significativamente. El nivel de detalle se califica como preliminar, intermedio o avanzado.

El tipo de mapa de zonificación depende principalmente de la finalidad del estudio (Fell *et al.*, 2008; Dorren *et al.*, 2011; Labiouse y Abbruzzese, 2011). Se debe considerar el área a mapear (escala), nivel de detalle previsto y recursos disponibles (financiamiento, calendario y datos de entrada). El Cuadro 2.2 se basa en las recomendaciones para la elección del tipo y nivel de zonificación propuesta por Fell *et al.* (2008).

**Cuadro 2.2** Tipos de mapas de zonificación asociados a la escala y nivel de detalle

Tipo de zonificación		Nivel de detalle		
		Preliminar	Intermedio	Avanzado
Escala	Regional (1: 25'000 a 1: 250'000)	Susceptibilidad	Peligrosidad*	
	Local (1: 5'000 a 1: 25'000)	Susceptibilidad	Peligrosidad	Riesgo*
	Sitio (1: 1'000 a 1: 5'000)		Peligrosidad	Riesgo

(\*) indica que pudiera ser aplicable la escala y nivel de detalle para el tipo de zonificación. Fuente: información tomada de Labiouse y Abbruzzese (2011) a partir de Fell *et al.* (2008).

# Antecedentes

---

### 3.1 IMPACTO POTENCIAL

Los procesos de remoción en masa (PRM) son considerados como el tercer peligro natural por número de víctimas, después de los terremotos y las inundaciones (Copons-Llorens y Tallada-Masquef, 2009). En el caso de caída de rocas, la peligrosidad está asociada principalmente a su imprevisibilidad con respecto a la zona de desprendimiento y factor detonante. Es decir, los bloques de un macizo rocoso que se han observado estables durante años pueden caer repentinamente. Esto contrasta con otros PRM que normalmente se desarrollan durante un tiempo prolongado antes de llegar a fallar. El colapso repentino en los macizos rocosos se debe a que la resistencia al corte de un plano de discontinuidad en roca competente puede disminuir de pico a residual como resultado de desplazamientos diminutos (Wyllie y Mah, 2002).

Un aspecto adicional de la peligrosidad es que la caída de rocas tiende a seguir trayectorias impredecibles cuando inicia desde acantilados muy elevados. Asimismo, los bloques de roca pueden alcanzar velocidades que van desde muy rápidas a extremadamente rápidas (Cruden y Varnes, 1996), lo cual puede implicar la pérdida de vidas, destrucción de construcciones por impacto y, en casos extremos, una catástrofe de gran violencia.

Otra consideración es que la caída de rocas puede desencadenar un movimiento complejo. Con frecuencia un bloque aislado suele ser la causa de daños a viviendas y vías de transporte. Sin embargo, en ocasiones una porción de toda la ladera se desprende y desintegra en numerosos bloques formando una avalancha de rocas (Ayala-Carcedo *et al.*, s.f.). La caída de rocas no representa el mismo nivel de riesgo económico de los eventos a gran escala, no obstante, el número de personas que mueren por caída de rocas tiende a ser del mismo orden que las víctimas por otros PRM (Hoek, 1998).

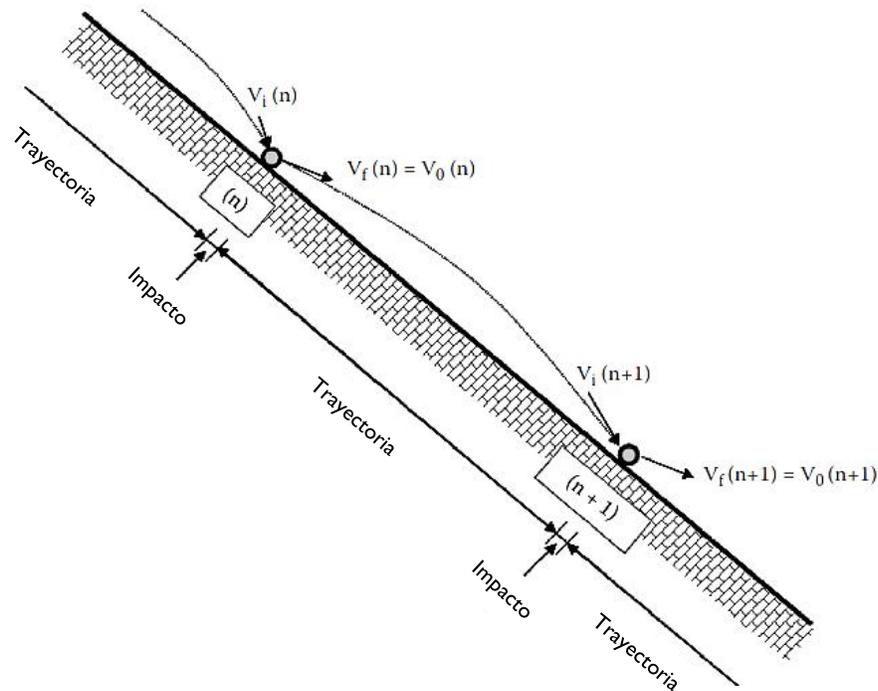
La peligrosidad que implica la caída de rocas es particularmente grave en áreas con fuertes precipitaciones, ciclos frecuentes de hielo-deshielo y eventos sísmicos (TRB, 1996). El peligro asociado a la caída de rocas también puede ser muy alto debido a la densidad de la población (Chau *et al.*, 2003). Por otro lado, estos eventos tienden a concentrarse en países en vías de desarrollo en los cuales existe déficit de investigación y, a menudo, falta de recursos (Sidle y Ochiai, 2006).

Las consecuencias por caída de rocas pueden llegar a ser catastróficas debido a la pérdida de vidas humanas, y daños a la infraestructura, áreas agrícolas y a los diversos ecosistemas (Alcántara-Ayala *et al.*, 2003). Su impacto incluye pérdidas económicas debido a la interrupción de servicios, el costo de la estabilización de laderas, posibles acciones legales y lesiones (Wyllie, 2015). Una gran cantidad de daños por inestabilidad de laderas son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención y mitigación (Brabb y Harrod, 1989; Oporto-Gallardo, 2006).

### **3.2 MODELO CONCEPTUAL**

Un modelo conceptual es la interpretación del comportamiento de un determinado fenómeno, en nuestro caso nos referimos a la caída de rocas. Generalmente, el modelo conceptual es más sencillo que la realidad, pero más complejo que un modelo numérico o modelo de simulación. La interpretación de la caída de rocas implica el estudio de una serie de trayectorias e impactos desarrollados por un bloque de roca a lo largo de la ladera.

La trayectoria de un bloque se describe como un movimiento parabólico en función de la aceleración gravitacional ( $g$ ), la cual incrementa durante la fase de caída libre, asumiendo que no se produce resistencia aerodinámica. Así, la trayectoria se puede determinar por medio de la distancia ( $L$ ) entre dos puntos de impacto y la altura máxima de salto ( $h_{max}$ ) alcanzada por la roca. Por otro lado, el proceso de impacto entre un bloque y la superficie de la ladera se plantea a través del estudio de la mecánica newtoniana. La magnitud del impacto viene definida por los coeficientes de restitución ( $e$ ), los cuales indican la cantidad de energía disipada durante el rebote. Su aplicación a la caída de rocas permite calcular los cambios en las componentes de velocidad tangencial ( $V_T$ ), normal ( $V_N$ ), y angular o rotacional ( $\omega$ ) que se producen durante el impacto, así como los cambios correspondientes en la energía cinética (Wyllie, 2015).

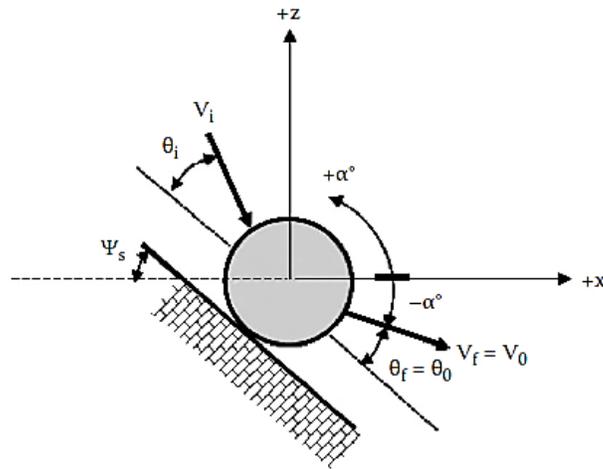


**Figura 3.1** Nomenclatura de la velocidad (donde,  $V_i$  = velocidad inicial;  $V_f = V_0$  = velocidad final) para trayectorias e impactos ( $n$ ;  $n + 1$ ). Fuente: Wyllie, 2015.

La Fig. 3.1 muestra un comportamiento típico de caída de rocas en el que un bloque impacta ( $n$ , punto de impacto) la superficie de la ladera a una velocidad inicial ( $V_i$ ) y rebota a una velocidad final o de restitución ( $V_f$ ), igual a la velocidad al comienzo de la trayectoria, ( $V_0$ ). La orientación de este vector de velocidad se puede definir mediante dos ángulos,  $\alpha_0$  o  $\vartheta_0$  (Fig. 3.2). El ángulo  $\alpha_0$  es relativo al eje X positivo, medido en sentido antihorario ( $+\alpha^\circ$ ) o en sentido horario ( $-\alpha^\circ$ ), y puede tener valores entre 0 y  $360^\circ$ . El ángulo  $\vartheta_0$ , al comienzo de la trayectoria, se utiliza para definir la orientación del vector de velocidad con respecto a la superficie de la ladera y es un parámetro que se emplea más fácilmente en el análisis de datos de campo. Si el ángulo de inclinación de la ladera es  $\psi_s$ , entonces la relación entre estos tres ángulos está dada por:

$$\theta_0 = (\psi_s + \alpha_0) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

De esta manera, los parámetros principales que determinan el comportamiento y la trayectoria en la caída de rocas son las propiedades del bloque desprendido, la geometría de la ladera y los coeficientes de restitución, definidos por las características de la superficie de la ladera (Wyllie, 2015).



**Figura 3.2** Nomenclatura y relación entre los ángulos  $\alpha$ ,  $\vartheta$ ,  $\psi_s$  (donde,  $\psi_s$  = ángulo de la inclinación de la ladera) en la trayectoria de caída de rocas. La ecuación 3.1 se aplica para valores positivos y negativos de  $\alpha$ . Fuente: Wyllie, 2015.

### 3.2.1 Propiedades de la roca

Los parámetros físico-mecánicos como la masa, tamaño y forma de la roca, su resistencia y fragmentación, así como la zona de desprendimiento difícilmente se pueden determinar *a priori* con exactitud; sin embargo, influyen directamente en la velocidad, cantidad de movimiento, energía cinética y, en general, la peligrosidad por caída de rocas (Abellán y Vilaplana, 2003).

Con respecto a las dimensiones de los bloques, se puede mencionar que los fragmentos de roca más grandes adquieren mayor *momentum* ( $p = m \cdot V$ ; donde,  $m$  = masa,  $V$  = velocidad en el centro de gravedad). Por lo tanto, es menos probable que su trayectoria se vea afectada al impactar contra las irregularidades del terreno. Estos bloques, además, tienden a desplazarse a mayores longitudes que los bloques más pequeños.

Por otra parte, la forma de la roca también influye en el alcance de estas, en modo similar que la rugosidad de la ladera, ya que la velocidad rotacional ( $\omega$ ) y de traslación del caído de roca se describen convenientemente en función de los ejes principales de inercia, caracterizados por su forma geométrica.

La resistencia mecánica de la roca es otro parámetro predominante, debido a que esta determina si ocurre fragmentación del bloque durante su impacto contra la superficie de la ladera. De esta manera, al disminuir el tamaño individual de los bloques, también disipa la energía cinética y la velocidad de la roca en función de su resistencia.

### 3.2.2 Geometría de la ladera

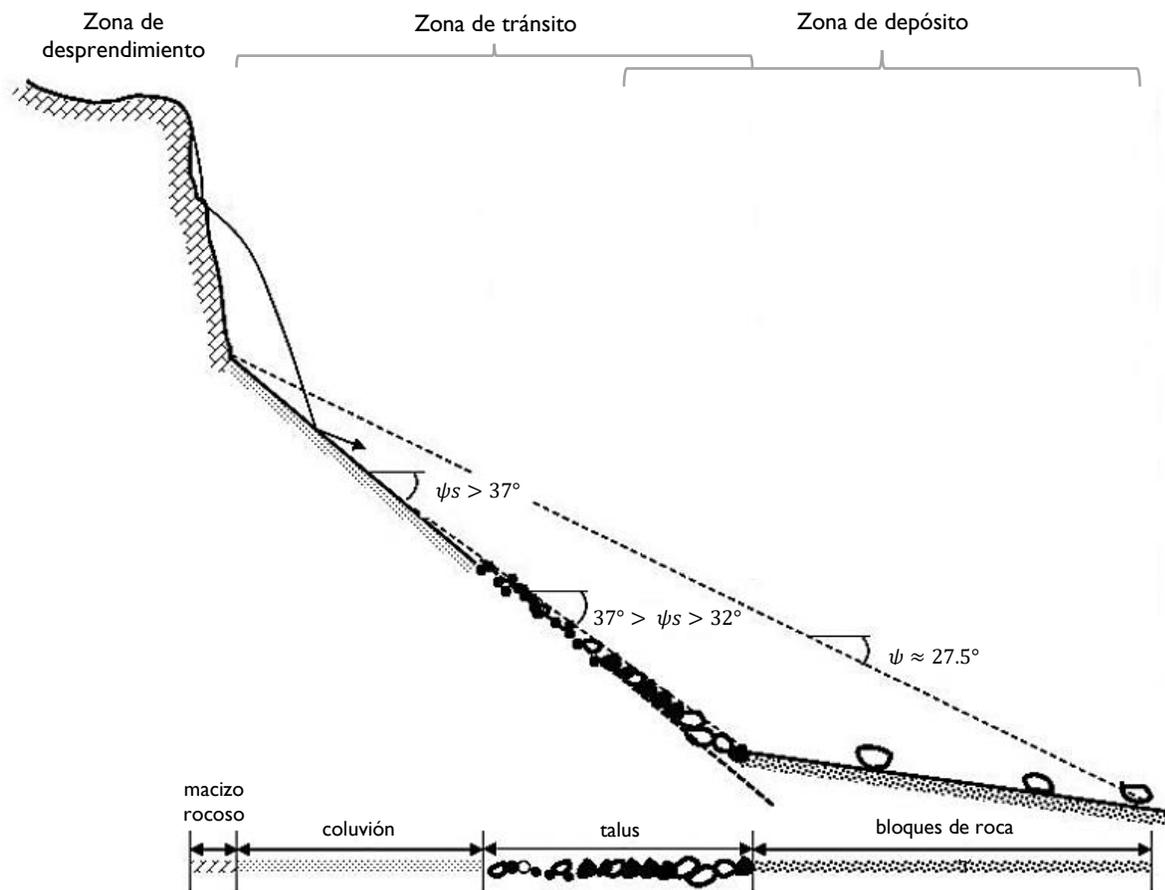
Entre los parámetros geométricos de la ladera, la longitud y el ángulo de inclinación ( $\psi_s$ ) son los más relevantes. La longitud de la ladera determina la distancia sobre la cual el bloque desciende y el alcance que este puede obtener. Por otro lado, el ángulo de inclinación de la ladera y los materiales que la conforman controlan la cantidad de movimiento, o *momentum*, de los bloques de roca desprendidos.

Al referirse a la trayectoria de caída de rocas, es común definir tres zonas activas sobre la ladera (Fig. 3.3). La zona de desprendimiento es el área más elevada donde se origina el movimiento por caída de rocas. En la mayoría de los casos, esta corresponde a afloramientos rocosos que forman acantilados o escarpes e, incluso, pequeñas plataformas y bloques sueltos depositadas sobre los flancos de grandes montañas (Dorren *et al.*, 2011). En esta zona rocosa los bloques tendrán impactos muy espaciados, velocidades de traslación y rotación muy rápidas, y ángulo de trayectoria ( $\theta_0$ ) elevado (Wyllie, 2015).

La zona de tránsito corresponde al área ubicada por debajo de la zona de desprendimiento, y a través de la cual las rocas descienden por la ladera (Dorren *et al.*, 2011). Si la ladera tiene un ángulo de inclinación ( $\psi_s$ ) mayor al ángulo de reposo o fricción ( $\phi$ ) de los materiales (por ejemplo,  $\psi_s > 37^\circ$  para fragmentos sueltos de roca), se producirán impactos muy próximos y ángulos de trayectoria ( $\theta_0$ ) menores. En ocasiones, los bloques presentarán trayectorias de gran altura ( $h$ ) debido al impacto contra irregularidades sobre la ladera. Por lo regular, no se acumularán los bloques en la zona de tránsito (Wyllie, 2015).

La zona de depósito se ubica al pie de la ladera y es el área donde los bloques finalmente detienen su movimiento y se acumulan. Lógicamente, las zonas de tránsito y de depósito se superponen y, por lo tanto, los límites entre estas no son estrictos para diferentes rocas en el mismo sitio (Dorren *et al.*, 2011). La mayoría de los fragmentos de roca se depositan cuando el ángulo de inclinación de la ladera se aproxima al ángulo de reposo, desde  $\psi_s \leq 37^\circ$  en la porción superior hasta  $\psi_s \geq 32^\circ$  cerca de la base de esta zona (Fig. 3.3). Estos bloques se someten a una clasificación natural, siendo los fragmentos pequeños los que se acumulan cerca de la porción superior y los grandes los que llegan hasta la base, de manera que los fragmentos de roca se agrandan ladera abajo, creando depósitos coluviales en forma de cono (Statham, 1976; Wyllie, 2015). Las rocas de mayor tamaño naturalmente viajan más lejos, por lo que, pueden llegar más

allá de la base de la ladera y hacia una superficie semiplana. La distancia máxima de alcance para estos bloques está definida por una línea inclinada de aproximadamente  $\psi \approx 27.5^\circ$  desde la base de la zona de desprendimiento (Fig. 3.3); este ángulo representa el coeficiente de fricción o de rozamiento dinámico ( $\mu$ ) de la caída de rocas (Hungry y Evans, 1988). En la zona de depósito, los bloques descienden por medio de una serie de impactos estrechamente espaciados o simplemente rodando, lo que significa que las rocas en esta zona se pueden detener fácilmente a través de barreras o cunetas de poca profunda (Wyllie, 2015).



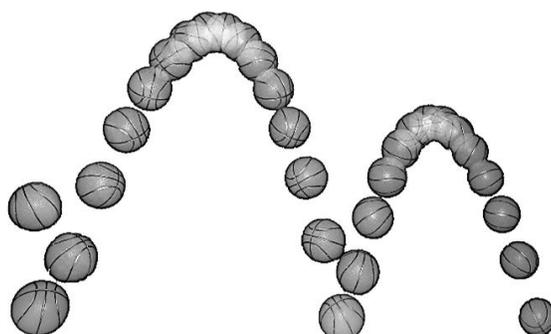
**Figura 3.3** Zonas de la ladera donde ocurre caída de rocas, y la relación entre el ángulo de inclinación ( $\psi_s$ ) y el comportamiento dinámico de caída. Fuente: modificada de Wyllie, 2015.

### 3.2.3 Coeficientes de restitución

El concepto de coeficiente de restitución fue desarrollado por Isaac Newton en 1686, quien suspendió esferas del mismo material sobre péndulos y midió la altura del rebote después de su impacto. En el momento de los experimentos de Newton se asumió que los coeficientes de

restitución eran propiedades de los materiales. Sin embargo, ahora se comprende que el impacto entre cuerpos rugosos y rotatorios de diferentes materiales, como los bloques de roca, y la reducción de la velocidad depende, no sólo del material que forma el cuerpo, sino también de las condiciones de impacto como la masa y forma del cuerpo, así como la velocidad y ángulo de impacto.

Por consiguiente, los coeficientes de restitución ( $e$ ) cuantifican los cambios de velocidad durante el impacto y ayudan a comprender cómo las características de la superficie de la ladera influyen en el comportamiento y trayectoria de la caída de rocas. La [Fig. 3.4](#) muestra tres impactos y dos trayectorias, e ilustra la reducción de la velocidad y altura de la segunda trayectoria debido a la pérdida de energía en el primer impacto. Ejemplifica, además, el comportamiento típico de una pelota de goma, aunque la caída de rocas siempre tendrá trayectorias de menor altura que estas debido a su bajo coeficiente de restitución, de  $e < 1$  (Wyllie, 2015).



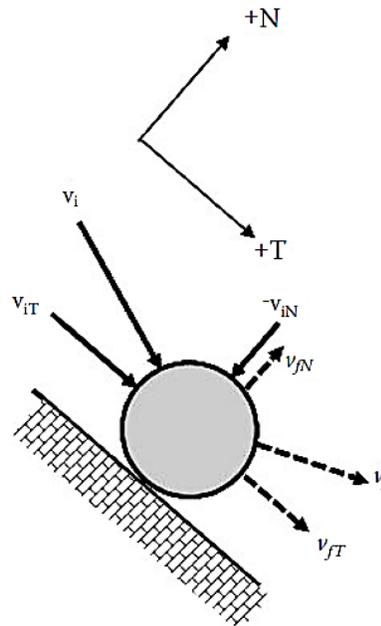
**Figura 3.4** Trayectorias sucesivas que muestran un comportamiento inelástico y pérdida de energía durante el impacto, donde la segunda trayectoria (a la derecha) alcanza una altura máxima de salto inferior a la primera. Fuente: Micheal Maggs, Wikimedia Commons, 2007.

En la caída de rocas, el impacto ocurre cuando el bloque desprendido rebota contra la superficie de la ladera. La magnitud del impacto viene definida por los coeficientes de restitución, los cuales indican la cantidad de energía disipada como resultado de la deformación y la fricción en la superficie de contacto. Al examinar los cambios de velocidad durante el impacto, es útil calcular los cambios en las componentes de velocidad normal ( $V_N$ ) y tangencial ( $V_T$ ). Los cambios en las componentes de velocidad se pueden cuantificar en términos de los coeficientes de restitución normal ( $e_N$ ) y tangencial ( $e_T$ ) definidos en las siguientes dos ecuaciones:

$$\text{Coeficiente de restitución normal, } e_N = -\frac{\text{velocidad final normal, } V_{fN}}{\text{velocidad inicial normal, } V_{iN}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$\text{Coeficiente de restitución tangencial, } e_T = \frac{\text{velocidad final tangencial, } V_{fT}}{\text{velocidad inicial tangencial, } V_{iT}} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

El coeficiente de restitución normal (Ec. 3.2) explica la relación entre las velocidades normales a la ladera antes ( $-V_{iN}$ ) y después ( $V_{fN}$ ) del impacto. Del mismo modo, el coeficiente de restitución tangencial (Ec. 3.3) explica la relación entre las velocidades tangenciales a la superficie de la ladera antes ( $V_{iT}$ ) y después ( $V_{fT}$ ) del impacto. En otras palabras, los parámetros básicos que definen los cambios en las componentes de velocidad normal ( $V_N$ ) y tangencial ( $V_T$ ) durante el impacto son los coeficientes de restitución correspondientes (Fig. 3.5).



**Figura 3.5** Relación entre los cambios en las componentes de velocidad normal ( $V_N$ ) y tangencial ( $V_T$ ), y los respectivos coeficientes de restitución normal ( $e_N$ ) y tangencial ( $e_T$ ). Fuente: Wyllie, 2015.

El coeficiente de restitución normal está directamente relacionado con el ángulo inicial ( $\theta_i$ ) con el cual la roca impacta el terreno, y depende de las características de compresión elástica de los materiales. Cuanto más deformable sea el material, mayor será la pérdida de energía y velocidad después del impacto. Por lo tanto, las laderas con superficies de materiales sueltos, blandos y con vegetación, absorben y reducen la energía cinética del bloque desprendido y, en algunos casos, pueden inclusive detener el movimiento. En consecuencia, estas condiciones de impacto implican bajo coeficiente de restitución normal (Wyllie, 2015).

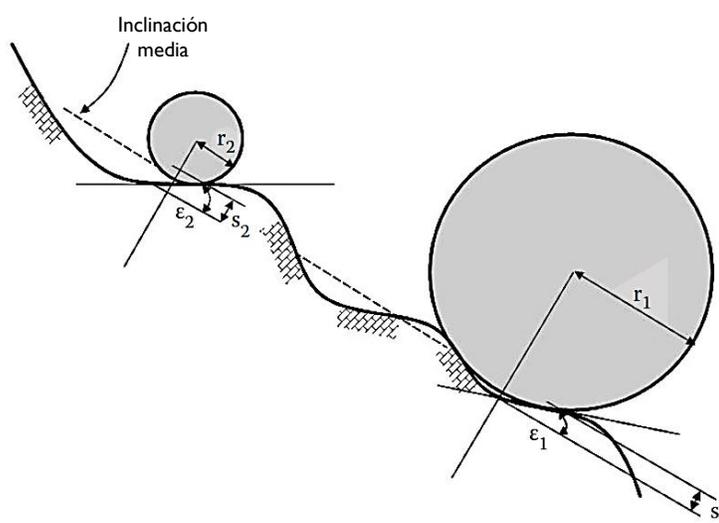
Por otro lado, el coeficiente de restitución tangencial está en función del coeficiente de fricción ( $\mu$ ) y ángulo de rozamiento interno ( $\varphi$ ) de los materiales. La relación entre estos dos parámetros está dada por:

$$\mu = \tan \varphi \quad (\text{Ec. 3.4})$$

La rugosidad superficial ( $\varepsilon$ ), en consecuencia, también influye en el coeficiente de restitución tangencial. La rugosidad se refiere al tipo de material que conforma la ladera y a las irregularidades encontradas sobre el terreno como otras rocas, vegetación y árboles. La interacción del bloque con la rugosidad de los materiales tiene un efecto significativo en el comportamiento y trayectoria de la caída de rocas, ya que altera el ángulo inicial ( $\theta_i$ ) con el cual la roca impacta la ladera, por lo que, generalmente la altura de salto aumenta al incrementar la rugosidad (Wyllie, 2015). La rugosidad de la superficie se puede cuantificar relacionando las variaciones perpendiculares de la ladera ( $s$ ) a partir de su inclinación media, dentro de una distancia de ladera igual al radio ( $r$ ) del cuerpo rocoso (Pfieffer y Bowen, 1989). Así, el ángulo creado por la rugosidad superficial se define de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left( \frac{s}{r} \right) \quad (\text{Ec. 3.5})$$

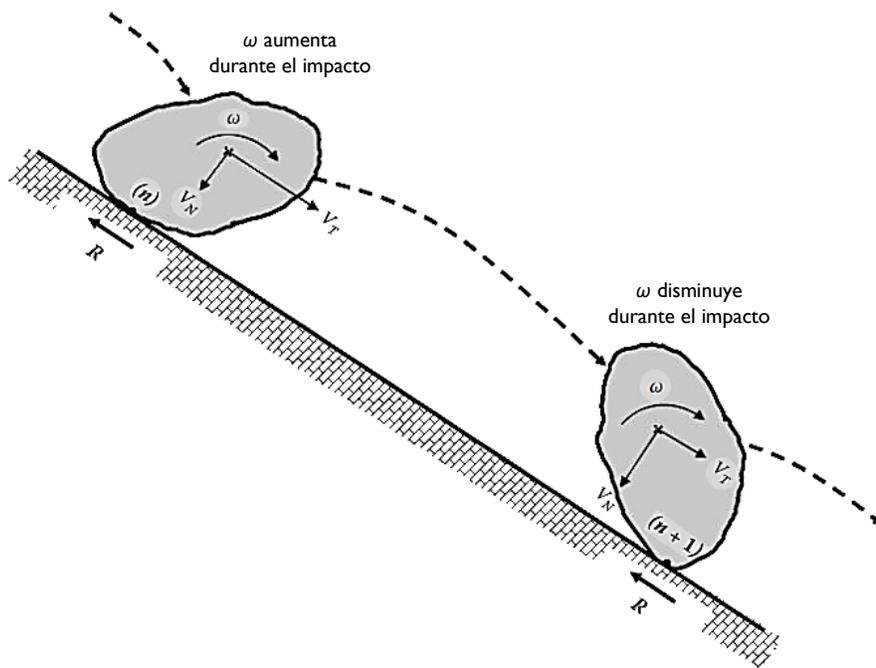
La Fig. 3.6 muestra como el valor del ángulo ( $\varepsilon$ ) disminuye al aumentar el radio de la roca. Es decir, para aproximadamente la misma rugosidad de la ladera, el ángulo de la rugosidad disminuirá a medida que aumenta el tamaño del bloque, ( $r_1 > r_2$ ) y ( $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ ).



**Figura 3.6** Relación entre la rugosidad superficial de la ladera ( $\varepsilon$ ) y el radio de la roca ( $r$ ). Fuente: Wyllie, 2015.

Como factor adicional de esta disipación de velocidad durante el impacto, tenemos los cambios correspondientes a las energías de traslación y rotación de la roca. Para un impacto perfectamente elástico de un bloque suave y no rotatorio, las velocidades ( $V_i = V_f$ ), y ángulos de impacto ( $\theta_i = \theta_f$ ) inicial y final serían idénticos. Sin embargo, para un evento de caída de rocas, en el cual el bloque se encuentra en rotación ( $\omega$ ) a lo largo de su trayectoria, se desarrolla resistencia de fricción ( $R$ ) en el punto de impacto, y ocurre compresión plástica de los materiales de la ladera, los coeficientes de restitución cambiarán durante el impacto.

La mecánica newtoniana define el efecto de la rotación o velocidad angular ( $\omega$ ) en la caída de rocas como resultado del momento generado por la velocidad tangencial ( $V_T$ ) y la resistencia a la fricción ( $R$ ) entre la masa rocosa y la superficie de la ladera (Fig. 3.7). La rotación del bloque tiene efectos evidentes en el comportamiento de la caída de rocas. La rotación angular en sentido horario ( $+\omega^\circ$ ) hace que las trayectorias sean más planas que para una roca no giratoria. Es decir, cuanto mayor sea la velocidad angular, menor será el valor del ángulo de impacto final ( $\theta_f$ ). De esta manera, a medida que la trayectoria se vuelve más plana (más cerca a la inclinación de la ladera,  $\psi_s$ ), la velocidad de impacto final ( $V_f$ ) aumenta. Por lo contrario, si la rotación angular es en sentido antihorario ( $-\omega^\circ$ ) su efecto es producir trayectorias más altas ( $\theta_f$ ) y más lentas ( $V_f$ ).



**Figura 3.7** Efecto en la velocidad angular ( $\omega$ ) de la resistencia de fricción ( $R$ ) y las propiedades de la roca durante el impacto ( $n$ ;  $n+1$ ) sobre la ladera. Fuente: Wyllie, 2015.

Para resumir, los coeficientes de restitución son cambios de energía como resultado de la deformación plástica del bloque de roca y la superficie de la ladera en la dirección normal (+ $N$ ), así como de la resistencia de fricción al deslizamiento y rodadura, y la rugosidad superficial en la dirección tangencial (+ $T$ ) (Wyllie, 2015).

### 3.3 MODELO NUMÉRICO DE SIMULACIÓN

La investigación respecto a la caída de rocas se ha llevado a cabo desde el siglo XIX (Baltzer, 1875; Landolt, 1886; Lehmann, 1933). Los primeros enfoques de modelado para caída de rocas que podrían usarse para evaluar su trayectoria y alcance fueron desarrollados en la década de 1930. Heim (1932) fue el primer autor en describir el comportamiento de los bloques durante la caída libre y los tipos de movimiento subsecuentes a través de su descenso, así como la complejidad del impacto de una roca contra la superficie de la ladera, incluyendo el grado potencial de fragmentación y la dispersión de las trayectorias. El primer modelo matemático de caída de rocas data de los años sesenta (Ritchie, 1963). A partir de ese momento, se han desarrollado modelos informáticos para la simulación numérica de la trayectoria de caída de rocas (Cuadro 3.1). Paralelamente al desarrollo de modelos, se han llevado a cabo estudios experimentales para mejorar la comprensión de la caída de rocas, los parámetros del modelo conceptual de impacto y el efecto de los bosques para disipar la energía. Algunos ejemplos son experimentos a escala completa (Broillil, 1974; Bozzolo y Pamini, 1986; Hestnes y Schieldrop, 1987; Jahn, 1988; Dorren *et al.*, 2005; Wyllie, 2014; 2015) y de laboratorio a media y pequeña escala (Kirkby y Statham, 1975; Peng, 2000; Chau *et al.*, 2002; Uehara *et al.*, 2003; Heidenreich, 2004; Pichler *et al.*, 2005).

#### 3.3.1 Dimensiones espaciales

Los modelos numéricos de simulación frecuentemente se dividen en los siguientes grupos según sus dimensiones espaciales: modelos 2D, modelos 2.5D y modelos 3D (Dorren, 2003; Volkwein *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2013; Sellmeier, 2015). Los modelos bidimensionales (2D) simulan la trayectoria de caída de rocas en un dominio espacial definido por dos ejes; es decir, a lo largo de un perfil de pendiente representado por la distancia horizontal en el eje X o Y, y la altitud en el eje Z, sin considerar la dispersión lateral sobre la ladera. El movimiento durante el proceso de caída se describe como fases de trayectoria e impacto, donde la trayectoria se modela como

tiro parabólico, y la aceleración del bloque se basa en la gravedad (Dorren, 2003). La desventaja principal de los modelos 2D es que el perfil de la ladera donde se simula el proceso por caída de rocas debe ser definido de antemano por el usuario con base a la línea de descenso más inclinada, observaciones de campo y/o eventos históricos registrados. No obstante, existen numerosos modelos 2D ampliamente empleados en la literatura científica debido a la sencillez de su interfaz y costo accesible. Algunos ejemplos de estos modelos son *CRSP* (Pfeiffer y Bowen, 1989), *CADMA* (Azzoni *et al.*, 1995) y *RocFall* (Stevens, 1998).

Otro grupo es el de los modelos 2.5D, también llamados modelos cuasi-3D. Estos son simplemente modelos bidimensionales asistidos por sistemas de información geográfica (SIG) para obtener recorridos predefinidos de caída de rocas. La característica clave de estos modelos es que la dirección de la trayectoria de caída en los ejes X y Y es independiente de la cinemática de la roca desprendida y su trayectoria en el plano vertical. Es decir, en estos modelos, el cálculo de la dirección horizontal de caída (en el plano de referencia XY) podría separarse completamente del cálculo de la cinemática de caída de rocas, así como de los puntos de impacto y altura de salto de la trayectoria. Esto significa que los modelos 2.5D realmente realizan dos cálculos en 2D por separado. El primero determina el perfil de pendiente en un plano XY, y el segundo es una simulación de caída de rocas 2D a lo largo del perfil previamente definido. Por lo tanto, estos modelos calculan la cinemática de caída de rocas a lo largo de un perfil de la ladera que sigue la línea de descenso más inclinada, según se defina utilizando datos digitales del terreno. Como ejemplo tenemos el modelo *Rocky3* (Dorren y Seijmonsbergen, 2003).

En cambio, un modelo en tres dimensiones (3D) calcula la trayectoria de caída de rocas en un plano definido por tres ejes (X, Y, Z). Estos modelos suelen basarse en análisis SIG y manejan un modelo digital de elevación (MDE) que representa la topografía de la ladera. Como tal, existe interdependencia entre la dirección de la trayectoria de caída en el plano de referencia XY, y la cinemática de la roca, sus puntos de impacto y altura de salto de la trayectoria, así como impactos en los árboles si se incluye este proceso (Volkwein *et al.*, 2011). La ventaja principal de los modelos 3D es que generan las trayectorias más probables en función de la topografía y tipo de movimiento seguido por la roca a partir de un origen conocido. Esto ofrece una importante mejora con respecto a los modelos 2D, los cuales analizan únicamente un perfil topográfico predefinido y no múltiples trayectorias. Asimismo, los modelos 3D son capaces de

---

considerar la forma de la roca en el comportamiento dinámico resultante (Chen *et al.*, 2013). Por lo regular, se puede identificar con facilidad si existe alguna anomalía en los mapas resultantes por efectos de la topografía. Su desventaja consiste en la necesidad de crear mapas de parámetros espacialmente definidos, los cuales requieren trabajo de campo altamente detallado. Ejemplos de modelos 3D son *STONE* (Guzzetti *et al.*, 2002), *HY-STONE* (Crosta *et al.*, 2004), *Rotomap* (Scioldo, 2006), *RAMMS::Rockfall* (Christen *et al.*, 2007) y *Rockyfor3D* (Dorren, 2011).

### 3.3.2 Enfoque cinemático

Otra característica que permite distinguir entre diferentes modelos numéricos, es la representación o forma de la roca simulada, la cual está estrechamente relacionada con el cálculo del impacto (Volkwein *et al.*, 2011). Esto se puede hacer por medio de una masa concentrada (*lumped mass*); en otras palabras, el bloque se representa por un único punto sin dimensiones. Otro enfoque es el del cuerpo rígido (*rigid body*), en el cual la roca se representa por una forma geométrica real, que a menudo es una esfera, cubo, cilindro o elipsoide. En general, este enfoque se utiliza en los modelos deterministas. El último es el enfoque híbrido (*hybrid approach*). Este puede combinar dos enfoques, haciendo uso de la masa concentrada para simular la caída libre y el cuerpo rígido para simular rotación, impacto y rebote. Algunos modelos con enfoque híbrido son *CRSP* (Pfeiffer y Bowen, 1989), *CADMA* (Azzoni *et al.*, 1995), *HY-STONE* (Crosta *et al.*, 2004; Frattini *et al.*, 2008; Agliardi *et al.*, 2009) y *Rockyfor3D* (Dorren, 2011).

La mayoría de los modelos numéricos de simulación de caída de rocas manejan un coeficiente de restitución normal y tangencial para calcular el impacto de la roca en la superficie de la ladera, y un coeficiente de fricción para la rotación angular. Los modelos que utilizan coeficientes de restitución generalmente aplican un enfoque probabilístico para elegir los valores de los parámetros aplicados para el cálculo del impacto. Se emplea un enfoque probabilístico a causa de la gran variabilidad en los valores reales de estos parámetros, debido al terreno, forma del bloque y cinemática de la roca durante el impacto. También hay modelos que utilizan enfoques deterministas para calcular el impacto de caída de rocas. Estos modelos se basan principalmente en el método de elementos discretos o *Discrete Element Method* (Cundall, 1971), como la teoría de percusión en *STAR3-D* (Dimnet, 2002) o el análisis de deformación discontinua en *DDA* (Yang *et al.*, 2004).

**Cuadro 3.1** Principales características de modelos existentes de trayectoria de caída de rocas

Modelo	Referencia	Dimensiones	Enfoque	Probabilístico	Bosque
S.N.	(Ritchie, 1963)	2D (perfil)	<i>Lumped mass</i>	No	No
<i>Discrete Element Method</i>	(Cundall, 1971)	2D (perfil)	<i>Rigid body</i>	No	No
<i>Computer Rockfall Model</i>	(Piteau y Clayton, 1976)	2D (perfil)	<i>Lumped mass</i>	Parcialmente	No
ROCKSIM	(Wu, 1985)	2D (perfil)	<i>Lumped mass</i>	Sí	No
SASS	(Bozzolo y Pamini, 1986)	2D (perfil)	Híbrido	Sí	No
S.N.	(Hungry y Evans, 1988)	2D (perfil)	<i>Lumped mass</i>	No	No
CRSP (4.0)	(Pfeiffer y Bowen, 1989) (Jones et al., 2000)	2D (perfil)	Híbrido	Sí	No
<i>Rotomap</i>	(Scioldo, 1991)	3D (x, y, z)	<i>Lumped mass</i>	Sí	No
CADMA	(Azzoni et al., 1995)	2D (perfil)	Híbrido	Sí	No
<i>RocFall</i>	(Stevens, 1998)	2D (perfil)	<i>Lumped mass</i>	Sí	No
STONE	(Guzzetti et al., 2002)	3D (x, y, z)	<i>Lumped mass</i>	Sí	No
STAR3-D	(Dimnet, 2002) (Le Hir et al., 2006)	3D (x, y, z)	<i>Rigid body</i>	No	Sí
Rocky3	(Dorren y Seijmonsbergen, 2003)	2.5D (x, y con perfil)	Híbrido	Sí	Sí
HY-STONE	(Crosta et al., 2004) (Frattini et al., 2008) (Agliardi et al., 2009)	3D (x, y, z)	Híbrido	Sí	Sí
RockyFor	(Dorren et al., 2004) (Dorren et al., 2006) (Bourrier et al., 2009)	3D (x, y, z)	Híbrido	Sí	Sí
DDA	(Yang et al., 2004)				
RAMMS::Rockfall	(Christen et al., 2007)	3D (x, y, z)	<i>Rigid body</i>	Sí	Sí
<i>RockFall Analyst</i>	(Lan et al., 2007)	3D (x, y, z)	<i>Lumped mass</i>	Parcialmente	No
<i>Rockyfor3D</i>	(Dorren, 2011)	3D (x, y, z)	Híbrido	Sí	Sí

Fuente: información tomada de Volkwein et al. (2011) a partir de Guzzetti et al. (2002).

### 3.3.3 Efecto del bosque

Existen pocos modelos numéricos de la trayectoria de caída de rocas que explícitamente consideren el efecto mitigador de la cobertura forestal y sus características, tales como la distribución espacial y densidad del bosque, diámetro del tallo a la altura del pecho y especie de los árboles. A través de estos modelos, es posible determinar combinaciones y ubicaciones óptimas de barreras técnicas y silvícolas en un sitio determinado. Además, permiten la zonificación de la peligrosidad de caída de rocas con y sin el efecto de mitigación de los bosques. Algunos ejemplos son *HY-STONE* (Crosta et al., 2004), *RAMMS::Rockfall* (Christen et al., 2007) y *Rockyfor3D* (Dorren, 2011).

### 3.3.4 Parámetros de Rockyfor3D

En el presente trabajo se empleó *Rockyfor3D* de *ecorisQ* (Dorren, 2016), un modelo numérico que combina algoritmos deterministas con enfoques estocásticos para simular la caída de rocas mediante datos vectoriales en 3D, al calcular secuencias consecutivas de la trayectoria de un bloque, rebote en la superficie de la ladera e impactos contra árboles. El software *Rockyfor3D* tiene enfoque cinemático híbrido basado en procesos probabilísticos y se puede aplicar para simulaciones a escala regional, local y en laderas específicas del sitio.

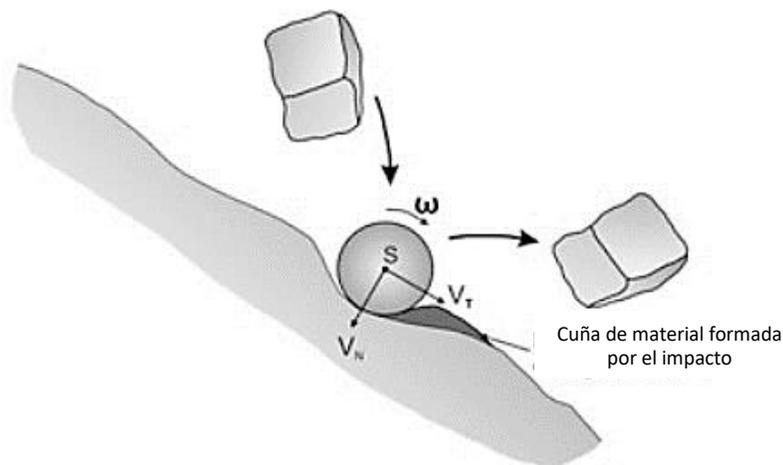
Los datos de entrada (Cuadro 3.2) consisten en un conjunto de mapas ráster en formato ASCII, los cuales definen la topografía, bloques de roca susceptibles a desprendimiento y características de la superficie de la ladera, junto con medidas de protección.

**Cuadro 3.2** Parámetros de entrada necesarios en *Rockyfor3D* con respecto a las zonas de la ladera

Parámetro	Zona de desprendimiento	Zona de tránsito - depósito
Topografía	X	X
Densidad del bloque	X	
Dimensiones del bloque	X	
Forma del bloque	X	
Rugosidad de la ladera		X
Tipo de suelo de la ladera		X
Vegetación de la ladera		X

*Rockyfor3D* brinda la opción de definir los bloques de roca en tipo rectangular, elipsoidal, esférico y/o disco como dato de entrada para las simulaciones. La forma del bloque determina su masa, volumen y momento de inercia. Estos parámetros se calculan a partir de la densidad del bloque y sus tres dimensiones, definidas como  $d1$ ,  $d2$  y  $d3$  (de menor a mayor, respectivamente). Por su enfoque híbrido, *Rockyfor3D* considera la roca como una esfera de un diámetro compuesto por la media de los dos ejes de bloque más largos,  $d2$  y  $d3$ , para el cálculo de la posición del bloque, el rebote en la ladera y el impacto contra los árboles (Fig. 3.8).

La trayectoria de la roca se determina con un algoritmo estándar del movimiento parabólico uniformemente acelerado. Este cálculo permite determinar la posición y velocidad en la intersección del bloque con la topografía 3D, representada por el MDE. Como tal, *Rockyfor3D* simula una trayectoria 3D calculando la evolución de su posición a lo largo de los tres ejes (X, Y, Z). En el modelado numérico, el eje X corresponde a la dirección este-oeste, el eje Y a la dirección norte-sur, y el eje Z a su posición vertical.



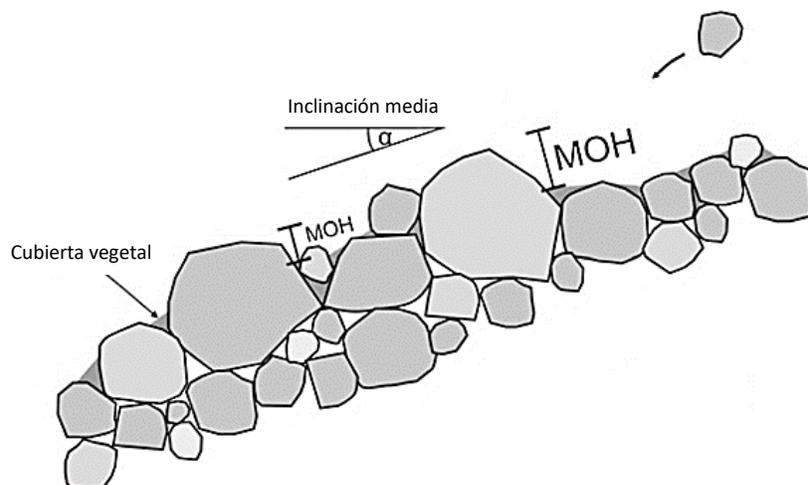
**Figura 3.8** Análisis del rebote en *Rockyfor3D*; la roca se considera como una esfera durante el impacto, con su centro de masa ( $S$ ) en el punto central de la esfera (donde,  $\omega$  = velocidad angular,  $V_N$  = velocidad normal,  $V_T$  = velocidad tangencial). Fuente: Sellmeier, 2015.

Los dos parámetros principales que caracterizan las condiciones de la superficie de la ladera son el tipo de suelo y la rugosidad, los cuales a su vez determinan el coeficiente de restitución normal ( $R_N$ ) y tangencial ( $R_T$ ), respectivamente. Los coeficientes de restitución son necesarios para el cálculo de la profundidad de penetración del bloque de roca en el material del suelo y su velocidad después del impacto.

Para calcular estos parámetros, *Rockyfor3D* primero realiza la conversión de la velocidad horizontal (plano XY) y vertical (plano Z), a la velocidad normal ( $V_N$ ) y tangencial ( $V_T$ ) con respecto al ángulo de inclinación de la ladera. Posteriormente, calcula la profundidad de penetración del bloque en el punto de impacto (Pichler *et al.*, 2005). Los datos requeridos para este algoritmo son el coeficiente de restitución normal, diámetro y masa de la roca, y velocidad inicial ( $V_i$ ) de impacto del bloque. Además, se emplean las constantes  $k = 1.207$ , atribuida a la forma esférica de la roca, y  $B = 1.2$ , parámetro de compresibilidad del material impactado. En *Rockyfor3D*, la profundidad máxima de penetración es igual al radio del bloque de roca.

Como se mencionó anteriormente, un parámetro esencial para calcular la velocidad final ( $V_f$ ) es el coeficiente de restitución tangencial (Chau *et al.*, 2002). Dorren *et al.* (2004) demostraron que dicho coeficiente ( $R_T$ ) se determina por la composición y tamaño del material que cubre la superficie de la ladera, así como el radio del bloque desprendido, ya que, para rocas más grandes, la rugosidad efectiva de la superficie de la ladera es menor que para rocas más pequeñas (Kirkby y Statham, 1975; Dorren, 2003).

La rugosidad superficial ( $\varepsilon$ ) se puede describir por el diámetro de los bloques que conforman la ladera. La forma de medir el efecto de la rugosidad en campo es a través de la altura media del obstáculo (MOH, *mean obstacle height*). El MOH representa la altura de los bloques que una roca pudiera impactar en su descenso por la ladera (Fig. 3.9).



**Figura 3.9** Visualización de la altura media del obstáculo (MOH). Se mide la cara del obstáculo en dirección ladera arriba, de donde provienen las rocas desprendidas. Fuente: Dorren, 2016.

Como trabajo de campo, no es factible medir la MOH a detalle en toda la ladera susceptible a la caída de rocas. Sin embargo, sí es posible mapear polígonos representativos para extrapolar los diámetros medios del material que cubren la superficie de la ladera. Se mapean tres clases de MOH, *rg70*, *rg20* y *rg10*, que son representativas del diámetro medio que un bloque descendente puede encontrar durante el 70%, 20% y 10% de los impactos en la ladera, respectivamente. Por último, el algoritmo de *Rockyfor3D* deriva el coeficiente de restitución tangencial a partir de dichos mapas.

El coeficiente de restitución tangencial ( $R_T$ ) se utiliza para calcular la componente de velocidad tangencial a la superficie de la ladera después del impacto ( $V_{JT}$ ). Lo mismo aplica para el coeficiente de restitución normal ( $R_N$ ), que se emplea para calcular la componente de velocidad normal a la superficie de la ladera después del impacto ( $V_{JN}$ ).

*Rockyfor3D* incluye ocho tipos de suelo, que se describen en el Cuadro 3.3, los cuales están directamente relacionados con los valores del coeficiente de restitución normal. Para describir el subsuelo en campo, se recomienda cavar un pozo pequeño con un martillo geológico, y observar el tipo y composición del material existente debajo de la cubierta vegetal.

**Cuadro 3.3** Tipo de suelo utilizado por *Rockyfor3D* y los valores correspondientes de  $R_N$ 

Tipo de suelo	Descripción general del subsuelo	Media ( $R_N$ )	Rango ( $R_N$ )
0	Río, o pantano, o material en el que una roca podría penetrar completamente	0	0
1	Material fino del suelo (profundidad > 100 cm)	0.23	0.21 – 0.25
2	Material fino del suelo (profundidad < 100 cm), o mezcla de arena / grava en el valle	0.28	0.25 – 0.31
3	Derrubio ( $\varnothing < 10$ cm), o suelo semi compacto con pequeños fragmentos de roca, o camino forestal	0.33	0.30 – 0.36
4	Talus ( $\varnothing > 10$ cm), o suelo compacto con grandes fragmentos de roca	0.38	0.34 – 0.42
5	Macizo rocoso con material fino erosionado o cubierta de suelo	0.43	0.39 – 0.47
6	Macizo rocoso	0.53	0.48 – 0.58
7	Carpeta asfáltica	0.35	0.32 – 0.39

Fuente: información tomada de Dorren, 2016.

Por último, *Rockyfor3D* proporciona la opción de incluir en las simulaciones medidas de protección como redes o bosques. Dado que el modelo numérico utiliza soluciones analíticas, la posición exacta del bloque simulado se conoce continuamente. Por lo tanto, se puede calcular la posición de impacto en los tallos de los árboles y su influencia en la disipación de energía durante dichos impactos. Además de la posición de impacto en el tallo del árbol, el modelo requiere conocer el diámetro del árbol impactado, el tipo de árbol como coníferas o de hoja ancha, y la energía cinética del bloque de roca. Las posiciones y diámetros de los árboles están constantemente disponibles en una lista con coordenadas XY, y valores del diámetro del tallo a la altura del pecho (DBH, *stem diameter at breast height*). Finalmente, si se produce el impacto contra algún árbol, el bloque pierde una fracción de su energía.

### 3.4 LIDAR TERRESTRE

Desde la década de 1990, se ha observado el desarrollo paulatino y sin precedente en la obtención y manejo de datos espaciales. Este proceso es el resultado de la unión entre la informática y las ciencias de la Tierra, alianza de disciplinas denominada geomática. A manera de definición, la geomática se ocupa de la integración sistemática de técnicas y metodologías de adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis, presentación y distribución de información geográficamente referenciada (Aguirre-Gómez, 2009). Para la gestión de dichos datos, la geomática se apoya en disciplinas tales como: geodesia, topografía, cartografía, teledetección o percepción remota, fotogrametría, geoestadística o análisis espacial, sistema global de navegación por satélite (GNSS) y sistemas de información geográfica (SIG).

En la actualidad, los datos espaciales se adquieren a partir de una amplia gama de instrumentos, tecnologías y métodos matemáticos. En particular, la percepción remota es una técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre a través de sensores que detectan energía electromagnética, por lo que no se requiere estar en contacto directo con el objeto de estudio (Chuvienco, 2007; Aguirre-Gómez, 2009). La teledetección resulta de gran importancia cuando se requieren datos distribuidos sobre amplias zonas geográficas, incluyendo información tridimensional o modelos digitales de elevación (MDE).

La percepción remota consta de cuatro elementos básicos: fuente de radiación, trayectoria o medio de transmisión, objetivo, y sensor (Aguirre-Gómez, 2009; Mas y Ramírez, 2011). De manera que, la energía reflejada o emitida por la superficie terrestre sigue su trayectoria de regreso a través de la atmósfera, donde se atenúa por dispersión y es capturada por sensores remotos. Estos sensores pueden ser clasificados como pasivos o activos. Los sistemas pasivos detectan la radiación proveniente de fuentes naturales, ya sea emisión térmica o solar reflejada. Campbell (2002) propone que se agrupen en sensores pasivos de tipo Landsat, de alta resolución espacial, de alta resolución temporal, e hiperespectrales. Los sistemas activos, por otra parte, emiten su propia fuente de radiación y la reciben reflejada del objeto de estudio. Entre los sensores activos, principalmente se dispone del radar y LiDAR. La ventaja de estos sensores radica en que permiten la adquisición de información a cualquier hora y en cualquier condición atmosférica; y que, al generar su propia señal, esta puede ser controlada y ajustada a los fines específicos.

Los sistemas activos, a su vez, se pueden dividir en tres tipos: SAR (*Synthetic Aperture Radar*), InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) y LiDAR, que proviene del acrónimo en inglés, *Light Detection and Ranging*, o bien, detección por luz y distancia.

LiDAR es una técnica de teledetección que emite pulsos de luz láser para obtener la distancia desde el mismo sistema emisor a la superficie del suelo y los objetos sobre este (Salamanca y Pérez, 2008). La distancia se calcula midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su recepción a través de la señal reflejada. Para determinar la posición de cada punto, se correlaciona el tiempo de cada rayo, con la información registrada por la unidad de medida inercial (IMU) y receptor del Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

Durante las últimas siete décadas, el LiDAR ha evolucionado drásticamente y, como resultado, hoy en día existen una gran variedad de sistemas (Lemmens, 2011; Fernandez-Diaz *et al.*, 2013). Estos sistemas LiDAR se pueden clasificar según su aplicación (Geist *et al.*, 2009; Haneberg *et al.*, 2009; Sturzenegger y Stead, 2009; Mazzanti *et al.*, 2015), técnica de medición – tiempo de vuelo, triangulación, diferencia de fase (Petrie y Toth, 2008; Lemmens, 2011; Abbas *et al.*, 2014; Feng y Röshoff, 2015; Mazzanti *et al.*, 2015), principio de detección del objetivo – dispersión, fluorescencia, reflexión (Fernandez-Diaz *et al.*, 2013) e, inclusive, basado en la plataforma en la que se implementa el sistema – terrestre, terrestre móvil, aerotransportado, aeronaves espaciales, marino, submarino (Petrie y Toth, 2008; Feng y Röshoff, 2015; Mazzanti *et al.*, 2015; Francioni *et al.*, 2017).

Uno de los sistemas más accesibles dentro de esta clasificación es el LiDAR terrestre o escáner láser terrestre (TLS, *Terrestrial Laser Scanner*) (Carr *et al.*, 2013; Abbas *et al.*, 2014). El resultado de un levantamiento con TLS es una nube densa de puntos tridimensionales, es decir, una matriz de puntos definidos en un sistema de coordenadas en 3D (X, Y, Z), que puede incluir atributos adicionales como intensidad, número de devoluciones, clasificación de puntos, bandas RGB (rojas, verdes y azules), tiempo de registro del GPS, entre otros. Cuando se equipa el LiDAR terrestre con una cámara digital, las imágenes fotográficas RGB se pueden combinar con los datos de nubes de puntos para producir imágenes tridimensionales fotorrealistas. Asimismo, las nubes de puntos permiten analizar cualquier superficie con gran precisión y exactitud, en tiempos muy cortos en comparación con otras tecnologías (Kliche, 1999; Derron *et al.*, 2011).

### **3.4.1 Aplicaciones y ventajas**

El LiDAR terrestre es una herramienta cada vez más popular en las ciencias de la Tierra para el mapeo topográfico, monitoreo temporal y espacial de fenómenos naturales como sismos, volcanes e inestabilidad de laderas, estudios de morfología de arroyos, balance de masa de glaciares y medición de profundidades de nieve. TLS también se utiliza ampliamente en investigaciones de biomasa en silvicultura y para numerosas aplicaciones de ingeniería (Abellán *et al.*, 2006; 2009; 2010; 2011; Carr *et al.*, 2013; Feng y Röshoff, 2015).

---

Empleada en el estudio de PRM, el LiDAR terrestre permite la adquisición de información muy detallada respecto a la configuración estructural y geometría de la ladera, especialmente importante en el caso de pendientes pronunciadas e inaccesibles (Fernández-Díaz *et al.*, 2013; Mazzanti *et al.*, 2015; Francioni *et al.*, 2017). Entre sus ventajas principales se puede mencionar la rápida recolección de datos, amplio campo de visión, y medición de alta precisión y exactitud. Debido a que TLS es un instrumento estático, brinda una excelente cobertura espacial que va desde varios metros hasta más de un kilómetro. Además, proporciona datos de resolución centimétrica y, en situaciones ideales, es posible alcanzar una resolución milimétrica. Esto se compara con los sistemas LiDAR aerotransportados y satelitales que tienen resolución de decímetros a metros, respectivamente. Otra importante ventaja es que, en las últimas décadas, el LiDAR terrestre se ha considerado más seguro y eficaz que los métodos tradicionales de caracterización de macizos rocosos (Gordon *et al.*, 2001; Slob y Hack, 2004; Armesto *et al.*, 2009; Bollinger *et al.*, 2012; Pratesi *et al.*, 2015).

Por lo regular, la obtención de datos respecto a las zonas de desprendimiento se realiza a partir del ascenso a los afloramientos o mediante fotogrametría terrestre. También se utilizan diversos instrumentos de medición para detectar desplazamientos y deformación en las paredes rocosas; por ejemplo, distanciómetro, extensómetro, fisurómetro (Derron *et al.*, 2011). Sin embargo, estas técnicas presentan inconvenientes considerables, ya que requieren contacto directo con el área de estudio, lo cual muchas veces puede ser peligroso, difícil e, incluso, imposible (Geist *et al.*, 2009; Feng y Röshoff, 2015; Mazzanti *et al.*, 2015).

Actualmente, una herramienta indispensable para el manejo y análisis de datos espaciales son los SIG (Guzzetti *et al.*, 1999). A pesar de sus diversas aplicaciones, en México existen limitaciones importantes. Particularmente, destacan la desactualización y la falta de disponibilidad de la cartografía oficial mexicana. Por ejemplo, los datos espaciales proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM), por lo general, son a escala gruesa o regional (1: 50'000 a 1: 250'000) y de baja resolución espacial (5 hasta 100 m).

El LiDAR terrestre, entre otras técnicas de percepción remota y disciplinas de geomática, provee información indispensable en la evaluación de la peligrosidad por PRM. Las nubes de puntos y modelos tridimensionales pueden superar muchas limitaciones y dificultades para

reducir la incertidumbre relacionada con los parámetros de entrada, especialmente, cuando se combinan con otra información geográficamente referenciada como fotografías aéreas, imágenes satelitales o datos topográficos. Al presente, la mayoría de los países del mundo utilizan la geomática en la solución de problemas que requieren del análisis espacial y México no es la excepción.

### **3.5 CAÍDA DE ROCAS EN LA FALLA PAJACUARÁN**

Cada año las regiones montañosas en México son afectadas por distintos PRM, y las precipitaciones intensas han sido el factor detonante en la mayoría de estos fenómenos. Tal fue el caso registrado el viernes, 8 de noviembre de 2013 en la localidad de Pajacuarán, Michoacán (Changoonga, 2013; Noticias en Michoacán, 2013; Quadratín, 2013; CENAPRED, 2014). Debido a un periodo de lluvias prolongado (CONAGUA, 2015a), un fragmento de roca de aproximadamente 2 m de diámetro y peso de 15 a 20 t se desprendió de la corona de la ladera norte del cerro La Estrella en la sierra de Pajacuarán. La roca destruyó cuatro viviendas entre las calles 5 de febrero y Álvaro Obregón de la colonia La Esperanza (Fig. 3.10), ubicada al pie de la ladera. Dos de estas viviendas se encontraban habitadas. Afortunadamente, no hubo pérdidas humanas que lamentar.

Derivado de este evento, la Dirección Estatal de Protección Civil de Michoacán recomendó a los propietarios de las viviendas afectadas y vecinos de la zona, desalojar las viviendas de por lo menos dos manzanas, que equivalen a una población de aproximadamente 400 habitantes (CENAPRED, 2014).

Autoridades de Protección Civil del Estado de Michoacán, en conjunto con el investigador en riesgos geológicos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Alberto Enrique González Huesca, e investigador del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Víctor Manuel Hernández Madrigal, realizaron una inspección visual de la zona a través de un sobrevuelo para valorar las condiciones de la ladera y zona de desprendimiento (Changoonga, 2013; Noticias en Michoacán, 2013).



**Figura 3.10** Daños que ocasionó la roca proveniente del cerro La Estrella. Fotografía: Quadratín, 2013.

La Fig. 3.11 muestra un ejemplo de las características y dimensiones de los bloques de roca susceptibles a desprendimiento en el escarpe de la falla Pajacuarán. La mayoría de los bloques son grandes y subangulares con diámetros entre 1 a 5 m, presentan un acomodo aleatorio y varios de ellos se posicionan en cantiléver.



**Figura 3.11** Litología de la zona de desprendimiento con bloques mayores a 2 m de diámetro. Fotografía: Hernández-Madrigal, 2013.

En la Fig. 3.12 se observa la ubicación de las viviendas destruidas por el evento y el suelo erosionado donde la roca desprendida inició su descenso por la ladera (esquina inferior izquierda), así como las afectaciones sobre la vegetación de la trayectoria de caída. A causa de su gran energía cinética, el impacto de un bloque deja profundas marcas en los árboles e, incluso, es capaz de arrancarlos de raíz.



**Figura 3.12** Porción sureste de la mancha urbana de la localidad de Pajacuarán vista desde la zona de desprendimiento. La flecha negra señala las viviendas afectas por el evento de caída de rocas. Fotografía: Hernández-Madriral, 2013.

A pesar del impacto que este fenómeno tuvo en la población, la zona no ha sido estudiada con respecto a los PRM. El evento de caída de rocas de 2013 y sus consecuencias nos alerta acerca de la problemática actual en el escarpe de la falla geológica activa de Pajacuarán, una zona susceptible a desprendimientos de bloques de roca, y de gran peligrosidad y riesgo para los habitantes e infraestructura de la localidad.

# Materiales y métodos

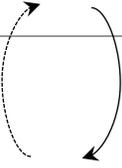
---

Para evaluar la peligrosidad por caída de rocas, se requiere determinar la probabilidad de alcance y distribución espacial de los bloques depositados, así como cuantificar la energía cinética, altura de salto y velocidad a lo largo de la trayectoria de caída. Por lo tanto, es necesario implementar un modelo numérico de simulación con el fin de obtener dichos resultados y producir un mapa de peligrosidad mediante la zonificación del territorio.

Sin embargo, no es suficiente simplemente aplicar el modelo de simulación. Un estudio confiable de caída de rocas demanda diferentes etapas que deben prepararse y ejecutarse a fondo. Por ejemplo, durante una fase de preparación, se recomienda recopilar toda la información existente de la zona de interés, realizar un estudio de campo detallado y definir los parámetros de entrada para el modelo numérico. Sólo entonces, se puede iniciar una evaluación de la trayectoria de caída de rocas.

Por lo anterior, la adquisición y procesamiento de los datos de campo representan etapas fundamentales de la metodología, necesarias para obtener resultados válidos que reflejen la peligrosidad por caída de rocas al emplear el modelo numérico de simulación, *Rockyfor3D* (Dorren, 2016). El flujo de trabajo empleado en este proyecto (Cuadro 4.1; modificado de Dorren *et al.*, 2011), se divide en seis fases para una escala local entre 1: 5'000 y 1: 10'000.

**Cuadro 4.1** Fases del estudio de la trayectoria de caída de rocas

<b>Flujo de trabajo</b>	
<b>A. Preparación</b> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Caracterizar área de estudio y revisar registros de eventos históricos</li> <li>2. Trabajo de campo               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zona de desprendimiento                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- Definir volúmenes de rocas potencialmente inestables</li> </ul> </li> <li>- Zona de tránsito / depósito                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapear características de la superficie de la ladera</li> <li>- Registrar ubicación, tamaño y forma de rocas depositadas</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>3. Entrevistar a habitantes y expertos locales</li> <li>4. Preparar datos de entrada del modelo               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Preparar y verificar MDE</li> <li>- Digitalizar parámetros de la superficie de la ladera</li> <li>- Digitalizar el bosque</li> </ul> </li> </ol>
 <b>B. Definición del escenario de desprendimiento</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definir zonas de desprendimiento</li> <li>2. Definir tamaño y forma de los bloques de roca</li> <li>3. Definir la probable frecuencia temporal, si es posible</li> </ol>
 <b>C. Simulación de caída de rocas</b>	<p>Repetir las simulaciones hasta que los resultados (e.g. energía, altura, alcance) converjan. Es decir, la diferencia entre los resultados simulados y las observaciones de campo de la zona de interés sean menores a un porcentaje dado</p>
 <b>D. Verificación y validación</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comparar con observaciones de campo (e.g. posiciones de depósito, alturas de impacto en los árboles, cráteres de impacto)</li> <li>2. Estimar el efecto de los elementos no representados en el modelo (e.g. zanjas, terraplenes de carretera, formas complejas de roca, condiciones extremas de la superficie de la ladera)</li> <li>3. Comparar con métodos simples (e.g. enfoque de línea de energía)</li> <li>4. Si después de los pasos 1, 2 y 3, los resultados de la simulación no se pueden explicar, las fases C y D se pueden repetir iterativamente con modificaciones leves en el parámetro que genere incertidumbre</li> </ol>
 <b>E. Delimitación de los resultados del modelo</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Post procesamiento para remover valores atípicos, si es que existen</li> <li>2. Asignar el rango de validez de los resultados del modelo</li> </ol>
 <b>F. Elaboración de los mapas de peligrosidad por caída de rocas</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Crear un conjunto de datos distribuidos espacialmente, utilizando los resultados interpretados que han sido validados y fijados en la fase E, los cuales proporcionan información respecto a la zona de alcance y la cinemática de rocas para el área de estudio</li> <li>2. Si se considera apropiado, se puede definir la probabilidad de frecuencia temporal para la elaboración de mapas de peligrosidad</li> </ol>

Fuente: modificada de Dorren *et al.*, 2011.

## **4.1 PREPARACIÓN**

Una evaluación formal de la trayectoria de caída de rocas requiere una fase de preparación exhaustiva la cual incluye revisión de antecedentes y registros de eventos históricos, realización de estudios de campo, y preparación de los datos de entrada del modelo de simulación.

### **4.1.1 Antecedentes**

Primero, se realizó una revisión bibliográfica de textos, trabajos y mapas locales para caracterizar el área de estudio. Esta etapa también consistió en recopilar y evaluar todos los registros existentes respecto a los eventos históricos de caída de rocas que han ocurrido en la falla de Pajacuarán. Con estos datos fue necesario precisar cuándo, dónde y qué evento ocurrió para que nos fueran de utilidad en el estudio de la trayectoria de caída de rocas. En otras palabras, se investigó la fecha del evento de caída de rocas, la ubicación exacta del evento – el punto de inicio y depósito – y el tamaño del bloque desprendido. Dichos registros se revisaron y verificaron en cuanto a su plausibilidad e incertidumbre.

Esta descripción general de los antecedentes históricos nos brindó una noción sobre la magnitud y frecuencia de los eventos de caída de rocas en el sitio de interés. Desafortunadamente, en la mayoría de los casos, y este no es la excepción, se carece de registros completos. Cuando faltan datos, los parámetros de otras laderas con características similares (por ejemplo, geología, topografía, rugosidad y material de la superficie) pueden ayudar a deducir información relevante respecto a la zona de estudio.

Algunas fuentes de información adicionales fueron los habitantes y expertos locales que trabajan en el área, ya que tienen conocimiento de los eventos más recientes y frecuentes de caída de rocas. Se pueden consultar detalles de la exploración geológica en el *Apéndice 1*.

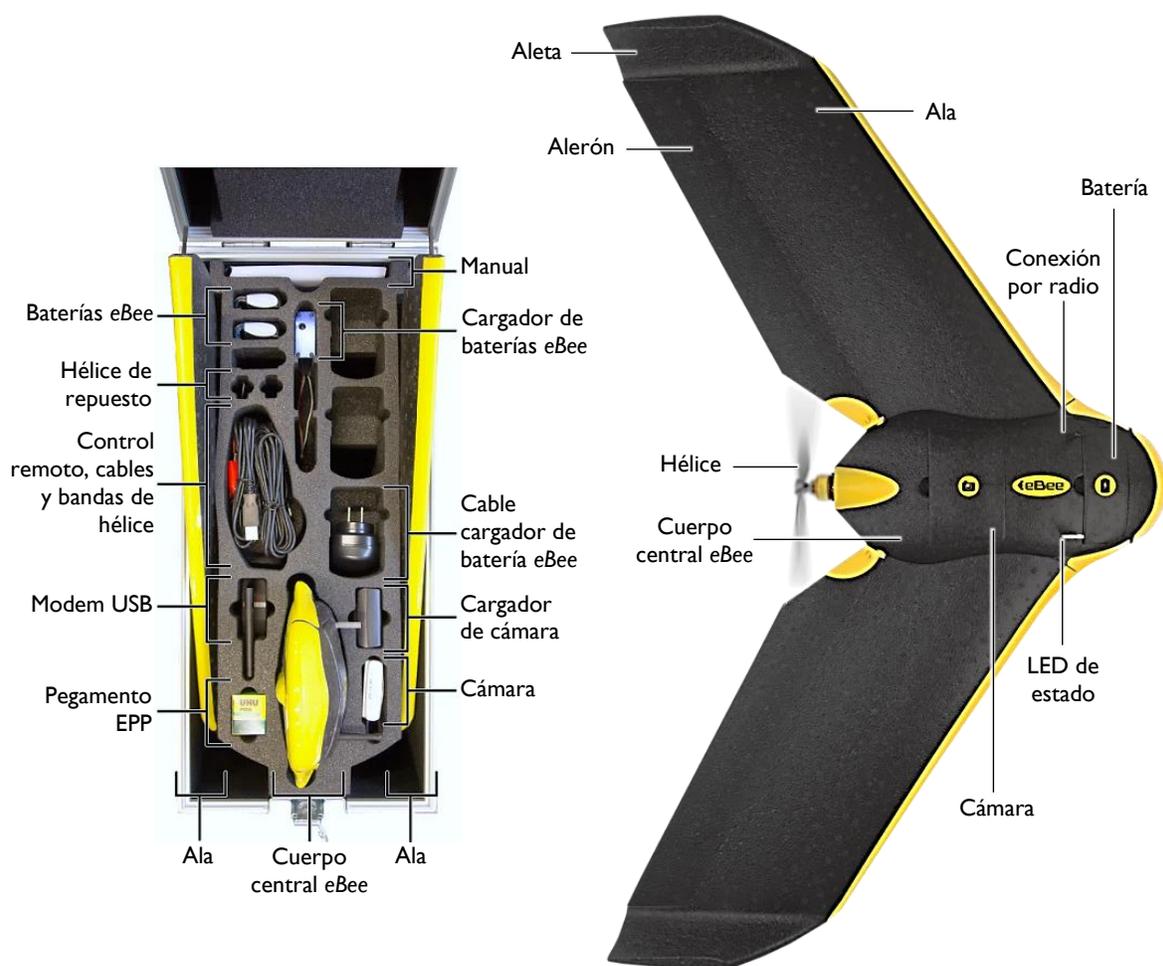
### **4.1.2 Trabajo de campo**

Durante la fase de preparación fue crucial llevar a cabo trabajo de campo detallado para obtener la topografía de toda la ladera, y caracterizar las zonas de desprendimiento, tránsito y depósito. La topografía en el área de estudio se obtuvo a través de levantamientos por medio de escáner láser terrestre (TLS, *Terrestrial Laser Scanner*) y vehículo aéreo no tripulado (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*). Cabe señalar que la realización de vuelos de la zona de interés fue un paso adicional para obtener tanta información como nos fuera posible.



una cobertura máxima de 12 km<sup>2</sup> en un solo vuelo automatizado. Además, en condiciones óptimas es posible conseguir hasta 45 minutos de autonomía de vuelo. El paquete *eBee* también cuenta con los programas *eMotion* y *Postflight Terra 3D*.

El software de planificación y control, *eMotion* (senseFly, 2014), permite interactuar con el dron durante el vuelo autónomo. A través de su interfaz, se puede planificar la trayectoria del vuelo desde gabinete o directamente en el campo. Una vez que despegar el *eBee*, la conexión inalámbrica de *eMotion* rastrea su posición, monitorea el progreso de su vuelo y envía comandos, si estos se requieren. El software también muestra los parámetros de vuelo del aparato, nivel de batería y avance de adquisición de imágenes en tiempo real, mientras la inteligencia artificial integrada en el piloto automático analiza de forma constante los datos IMU y GPS con el fin de controlar y optimizar el vuelo.



**Figura 4.2** Contenido del paquete estándar eBee (izquierda) y cara superior del vehículo aéreo no tripulado eBee con sus principales características (derecha). Fuente: senseFly, 2014.

Una vez que el dron regresa de su trayectoria de vuelo, se pueden procesar y analizar las imágenes del *eBee* en el programa de fotogrametría, *Postflight Terra 3D* (senseFly, 2014). El software permite crear productos georreferenciados en 2D y 3D de alta resolución como ortomosaicos, nubes de puntos, curvas de nivel, mallas 3D con textura y modelos digitales de elevación. Estos resultados son compatibles con otros programas como *ESRI ArcGIS*, *QGIS*, *GlobalMapper*, *Autodesk*, *Google Maps*. Además, inmediatamente después del vuelo, *Postflight Terra 3D* analiza la calidad de las imágenes capturadas y genera un informe para garantizar que estas cumplan con los requisitos del levantamiento.

**Flujo de trabajo con UAV.** El objetivo general de un levantamiento con dron es obtener imágenes claras y nítidas que se traslapen en toda la trayectoria de su vuelo. El trabajo de campo se puede dividir en tres fases principales (senseFly, 2014). Todo levantamiento comienza con la planificación cuidadosa del recorrido de vuelo, ya sea un vuelo rápido sobre un área pequeña o de varias etapas en terrenos complejos. Los vuelos se pueden realizar de forma manual, asistida o autónoma. Generalmente, los vuelos se planean en trayectos lineales o circulares para optimizar la captura de información y asegurar una superposición consistente (Shervais 2015; 2016; Federman *et al.*, 2017).

Una vez que se completa la planificación, se ejecuta el vuelo para la adquisición de imágenes. Se recomienda que estas tengan una superposición del 60 al 80%, se tomen de manera convergente y desde varios ángulos para reducir las distorsiones. Es importante considerar la hora del día en la que se lleva a cabo el levantamiento. Como regla general, la mañana y la tarde son ideales para adquirir imágenes. Debido a que la luz es baja, las fotografías no serán demasiado brillantes, lo cual oculte detalles (Shervais 2015; 2016). A todo momento se debe monitorear y mantener el control del UAV, considerando su posición y nivel de batería. Al finalizar, el dron aterriza, regularmente de forma autónoma.

Un paso adicional al proceso de adquisición de imágenes es colocar puntos de control terrestre en el sitio antes del vuelo. Estos puntos de control se capturan en las fotografías tomadas por el dron para alinear y escalar correctamente el objeto de interés en el procesamiento de datos. Dado que los UAV están equipados con tecnología de sistema global de navegación por satélite (GNSS), otra opción es combinar las imágenes únicamente con esa información (Federman *et al.*, 2017).

---

El último paso es el procesamiento de las imágenes capturadas por el UAV. Esto se realiza utilizando paquetes de software fotogramétricos para crear productos georreferenciados de alta resolución como ortomosaicos, nubes de puntos, modelos digitales de superficie y de terreno, entre otros (senseFly, 2014; Federman *et al.*, 2017).

#### **4.1.2.2 Topografía de detalle con RIEGL VZ-1000**

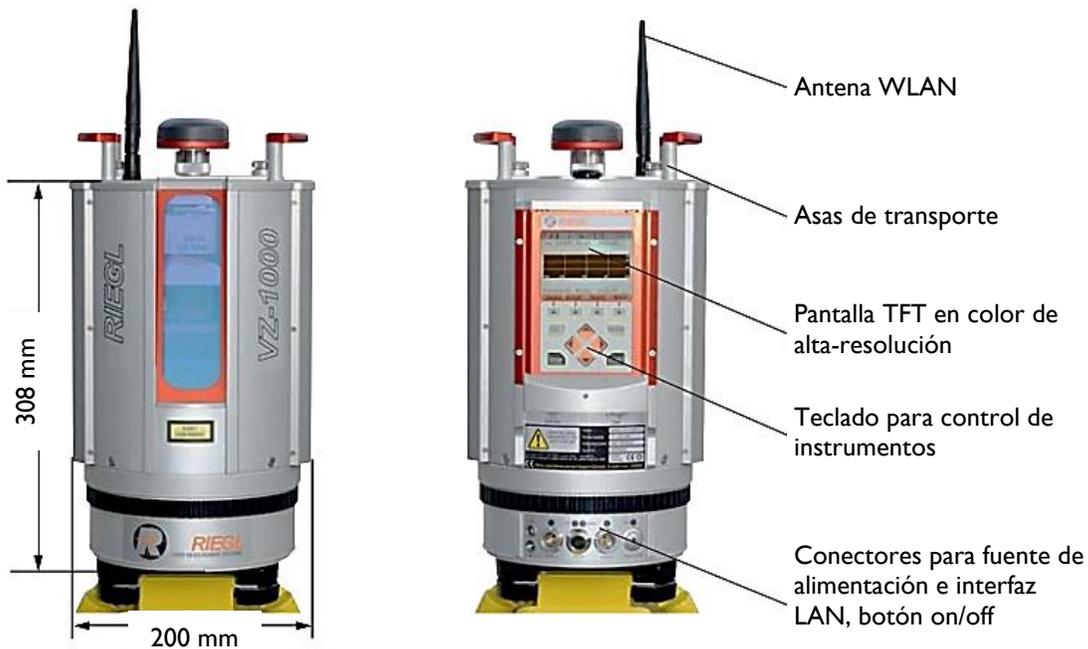
Una parte esencial del trabajo de campo fueron los levantamientos por medio de TLS. Realizamos seis escaneos y adquirimos coordenadas de más de 135 millones de puntos (especificaciones en el *Apéndice 3*), lo cual nos permitió obtener la topografía de detalle a lo largo de una sección de la falla Pajacuarán (*Fig. 4.1*). En la zona de desprendimiento, se llevó a cabo el escaneo panorámico del escarpe de la falla y escaneo fino de cuatro afloramientos principales. En las zonas de tránsito y depósito de bloques, se obtuvieron el relieve de la ladera y mancha urbana del sector sureste de la localidad de Pajacuarán.

El equipo empleado fue el escáner láser 3D, *RIEGL VZ-1000* (RIEGL, 2015b; *Fig. 4.3*), con un rango de medición de más de 1,400 m, resolución angular de 5 mm y tasa de medición de hasta 122,000 puntos/s. El instrumento ofrece un amplio campo de visión de 100° en dirección vertical y 360° en dirección horizontal. Cuenta con montaje de alta precisión para cámara DSLR (*digital single lens reflex*) opcional, *Nikon D800* de 36.3 Mpx de resolución, sensores de inclinación integrados, plomada láser, receptor GPS con antena, interfaz para receptor GNSS externo, almacenamiento interno de datos y varias interfaces, como LAN, WLAN, USB 2.0.

*RiSCAN PRO* (RIEGL, 2015a) es el software que manejan los sistemas LiDAR terrestre de *RIEGL*. El programa es fundamental para todas las etapas del flujo de trabajo. Los datos adquiridos durante el levantamiento se organizan y almacenan en una serie de carpetas para elaborar un proyecto en *RiSCAN PRO*. Estos datos incluyen los escaneos generales, escaneos finos, imágenes digitales, datos de GPS, coordenadas de puntos de control y puntos de enlace, y todas las matrices de transformación necesarias para convertir los datos de escaneos múltiples a un sistema de coordenadas global.

*RiSCAN PRO* cuenta con cinco funciones principales: adquisición, visualización, procesamiento, análisis e intercambio de datos. En el campo, el software optimiza el flujo de trabajo, ya que proporciona herramientas para la inspección visual de la cobertura de datos justo

después de la adquisición. Además, cuenta con una variedad de funciones para el procesamiento – registro, ajuste, georreferenciación, filtrado – y análisis – mallado, cálculo de volumen, comparación de superficie, creación de polilíneas, secciones, curvas de nivel – de datos. Por su amplia variedad de formatos de importación y exportación, el software permite una fácil transferencia de datos a numerosos paquetes de post procesamiento.



**Figura 4.3** Dimensiones, elementos operativos y conectores del escáner láser terrestre RIEGL VZ-1000. Fuente: RIEGL, 2015b.

**Flujo de trabajo con TLS.** Con respecto al trabajo de campo, el primer paso es seleccionar posiciones de escaneo efectivas para maximizar la cobertura del objetivo y minimizar las obstrucciones que pueden generar vacíos en las nubes de puntos. Estas estaciones deben ser accesibles y, de preferencia, estar ubicadas en lugares públicos y permanentes, de tal manera que sean confiables para futuros escaneos. Es recomendable elegir al menos dos posiciones oblicuas al objeto de interés, aunque es mejor tener una tercera estación para capturar puntos de vista izquierda, media y derecha, que brinden fuertes ángulos de incidencia con el objetivo.

Es esencial manejar puntos de control al registrar múltiples escaneos, ya que estos marcadores estáticos permiten unir fácilmente varias nubes de puntos. Los puntos de control no deben agruparse ni colocarse de forma lineal, sino que deben estar lo más uniformemente distribuidos alrededor de todo el sitio de escaneo. Se puede emplear un mínimo de tres puntos

---

de control, sin embargo, es recomendable contar con al menos cinco en caso de que existan obstáculos inesperados. Cuantos más puntos haya en común entre escaneos adyacentes, mayor será la precisión de la nube de puntos. Cabe señalar, los puntos de control no deben moverse durante el escaneo. Su movimiento introducirá errores, posiblemente tan graves como para tener que reiniciar el levantamiento. Seleccionar las posiciones de escaneo y puntos de control son los pasos más importantes para un levantamiento exitoso (Carr *et al.*, 2013; UNAVCO, 2013), y esto debe planificarse antes del escaneo.

Para georreferenciar el proyecto en TLS comúnmente se aplican dos técnicas: GPS estático y GPS cinemático en tiempo real (RTK, *Real Time Kinematic*) (Carr *et al.*, 2013, UNAVCO, 2013; Abbas *et al.*, 2014). El método que se utilice depende de las especificaciones del levantamiento y la disponibilidad del equipo. Ambas son formas de GPS diferencial que requieren visibilidad y una estación base dentro del alcance del TLS para realizar mediciones exactas y precisas.

Se recomienda considerar varios parámetros antes de comenzar el levantamiento (Lerma y Biosca, 2008; Márquez, 2010; Lemmens, 2011). Tener en cuenta la divergencia del haz láser, resolución angular y ángulo de incidencia, permitirá obtener una cobertura máxima y superposición entre los escaneos. Las condiciones ambientales como la posición del sol con respecto al TLS, reflectividad del material escaneado, y limitación de visibilidad debido a nubes, polvo, relieve y vegetación, también afectan la calidad de los datos de las nubes de puntos.

Una vez que se hayan establecido los puntos de control y georreferenciado el proyecto, se puede iniciar la adquisición de datos (Carr *et al.*, 2013, UNAVCO, 2013). Se comienza con un escaneo panorámico del área de estudio acompañado de la captura de imágenes fotográficas. Posteriormente, se realiza un escaneo fino de los puntos de control como parte del proceso de registro. Si es necesario, también se puede llevar a cabo un escaneo fino de las zonas de particular interés para el proyecto. Después de que se haya completado el primer escaneo, es necesario moverse a la siguiente estación. Para cada posición de escaneo sucesiva, se repiten los pasos básicos anteriores y en seguida se registran los escaneos adyacentes encontrando los puntos en común. Los datos GPS se pueden importar al proyecto después del escaneo. Finalmente, una vez que se haya completado el levantamiento, uno debe asegurarse de guardar todos los datos.

### 4.1.2.3 Datos de campo

Con respecto a la recolección de los datos de campo en las zonas de desprendimiento, tránsito y depósito, fue necesario dividir el área de estudio en polígonos homogéneos, los cuales representan regiones donde los parámetros de entrada para el modelo de simulación, *Rockyfor3D* (Dorren, 2016), son constantes. Esta parte del trabajo de campo consistió en delimitar las tres zonas de la ladera, mapear los polígonos homogéneos, y determinar los datos de entrada para *Rockyfor3D* en dichos polígonos, a través de áreas inventariadas. El Cuadro 4.2 muestra la relación entre las zonas de la ladera y datos obtenidos en campo, necesarios para ejecutar el software.

**Cuadro 4.2** Datos de campo para *Rockyfor3D* obtenidos en diferentes zonas de la ladera

Topografía de detalle de la ladera	Zona de desprendimiento	Zona de tránsito - depósito
Modelo digital de elevación (con resolución entre 2 - 10 m)	Densidad del bloque (kg/m <sup>3</sup> )	Rugosidad de la ladera ( <i>rg70</i> , <i>rg20</i> , <i>rg10</i> , MOH en m)
	Dimensiones del bloque ( <i>d1</i> , <i>d2</i> , <i>d3</i> , en m)	Tipo de suelo de la ladera ( <i>soiltype</i> 0 - 7, en el Cuadro 3.3)
	Forma del bloque (1 rectangular, 2 elipsoidal, 3 esférico, 4 disco)	Vegetación de la ladera (DBH en cm, tallos/ha, especie, coníferas en %)

Durante la recopilación de campo, los parámetros para cada polígono homogéneo se determinaron de acuerdo a una hoja de registro de *Rockyfor3D* (Fig. 4.4), al relacionar los datos de campo con las zonas de la ladera a las que pertenecen (Cuadro 4.2).

**Zona de desprendimiento.** Se realizó una exploración geológica de los afloramientos y escarpes de la falla para determinar la litología y propiedades estructurales del macizo rocoso. En general, se evaluaron las dimensiones y forma de los bloques en la zona de desprendimiento, así como en las zonas de tránsito y depósito a lo largo de la ladera. Los ejes de la roca representan los parámetros *d1*, *d2* y *d3*, donde *d1* corresponde al eje más corto y *d3* al eje más largo. La forma del bloque se define en cuatro categorías: 1, rectangular, 2, elipsoidal, 3, esférico, y 4, disco (Dorren, 2016). La densidad de la roca depende de su litología, por lo que estos valores se basaron en referencias de la literatura, o bien, se pueden determinar con pruebas de laboratorio.

Para caracterizar los bloques de roca de la zona de desprendimiento, se empleó la sección 1 de la hoja de registro (Fig. 4.4). En el subcapítulo 4.2, se explicará a detalle cómo se definió el escenario de desprendimiento.

**Zona de tránsito - depósito.** Se registraron y mapearon las características de la superficie de la ladera a través de áreas inventariadas. En general, estas propiedades se refieren a la resistencia, rigidez, rugosidad e inclinación del material de la ladera. Estos parámetros son de suma importancia, ya que determinan la pérdida de energía entre los componentes de traslación y de rotación durante el impacto, y, por lo tanto, definen la trayectoria del bloque.

Al implementar el modelo numérico *Rockyfor3D* (Dorren, 2016), los dos parámetros principales que caracterizan las condiciones de la superficie de la ladera fueron la rugosidad y tipo de suelo. En el campo, la rugosidad superficial se cuantificó a partir de la altura media del obstáculo (MOH) la cual representó la altura de los fragmentos de roca que un bloque determinado pudiera impactar en su descenso por la ladera. La MOH se determinó midiendo el lado del obstáculo que se encuentra en dirección ladera arriba, es decir, de donde provienen las rocas descendentes (Fig. 3.9). Es necesario considerar la desviación estándar de la MOH para las áreas inventariadas, por lo tanto, se mapearon tres clases, *rg70*, *rg20* y *rg10*, que son representativas del diámetro medio que un bloque descendente puede encontrar durante el 70%, 20% y 10% de los impactos en la ladera. El MOH está directamente relacionado con el coeficiente de restitución tangencial ( $R_T$ ).

Por otro lado, el tipo de suelo se definió de acuerdo con ocho categorías desde tipo 0, río o pantano (material en el que una roca podría penetrar completamente) hasta tipo 7, carpeta asfáltica (Cuadro 3.3). Estas categorías describen el subsuelo de la ladera – el suelo debajo de la cubierta vegetal – y están vinculadas al coeficiente de restitución normal ( $R_N$ ). Los parámetros de rugosidad superficial y tipo de suelo se evaluaron y registraron durante el mapeo conforme a las secciones 2 y 3 de la hoja de registro (Fig. 4.4).

*Rockyfor3D* proporciona la opción de incluir medidas de protección. Para nuestra área de estudio, no se puede despreciar el efecto mitigador que produce la vegetación existente, por lo que las características del bosque también fueron inventariadas y mapeadas en la sección 4 de la hoja de registro (Fig. 4.4). Esto incluyó datos como la especie, posición y distribución espacial de los árboles, y diámetro del tallo a la altura del pecho (DBH). No aplicó para este caso porque no existen, sin embargo, también es posible registrar las medidas técnicas de protección. Debe anotarse su tipo, posición, tamaño, altura y capacidad de absorción de energía.

General			
Date*		Nr. Polygon <sup>#</sup>	<sup>#</sup> each polygon represents a homogeneous unit; size depends on the mapping scale
Location*		Slope angle*	( ° / % )
Name*		Zone*	<input type="checkbox"/> start / source <input type="checkbox"/> transit <input type="checkbox"/> deposit
Polygon characteristics			
1. Dominating rock (deposited in the polygon or potentially falling from release area)			
Block shape	<input type="checkbox"/> 1. rectangle	<input type="checkbox"/> 2. ellipsoid	<input type="checkbox"/> 3. Sphere <input type="checkbox"/> 4. Disc
Block dimensions (d1, d2, d3):    ..... (m)    x    ..... (m)    x    ..... (m)			
Rock density (kg.m <sup>-3</sup> ):			
2. Soil / underground type in the polygon			
Material constituting the underground	<input type="checkbox"/> river / swamp / other material in which a rock could penetrate completely	<input type="checkbox"/> fine soil material (depth > ~100 cm)	<input type="checkbox"/> fine soil material (depth < ~100 cm) / sand/gravel mix in the valley
	<input type="checkbox"/> scree (Ø < ~10 cm) / medium compact soil with small rock fragments / forest road	<input type="checkbox"/> talus slope (Ø > ~10 cm) / compact soil with large rock fragments	<input type="checkbox"/> bedrock with thin weathered material or soil cover <input type="checkbox"/> bedrock <input type="checkbox"/> asphalt road
(soiltype) values needed for Rockyfor3D	0	1	2    3    4    5    6    7
3. Surface roughness in the polygon			
MOH: typical obstacle height normal to the slope surface (m) that block encounters in 70%, 20% and 10% of the cases during a rebound on the slope surface. <b>Should be measured looking down the slope!</b>			MOH for 70% of the sample area (rg70)
			MOH for 20% of the sample area (rg20)
			MOH for 10% of the sample area (rg10)
Lying tree stems*	Mean height =	m	Area covered = %
4. Forest*			
Representative plot size:    ..... m    x    ..... m			
DBH <sup>#</sup> (cm)	<sup>#</sup> DBH: Tree diameter at breast height (usually measured 1.3 m above ground upslope from the stem) Record all the DBH ≥ 5 cm measured in the plot: e.g., 8, 31, 17, 13, ...		
Stems / ha			
Mean DBH (cm)		Coniferous (%)	
Stddev DBH (cm)			
Species*			
5. Rockfall activity indicators / silent witnesses*			
Mean nr. of rockfall impacts on trees*		Height(s) of rockfall impacts on trees (m)*	
Depth impact craters (m)*		Fresh, deposited rocks in Polygon*	Yes / No
6. Remarks / sketch*			
* optional fields; these are not required for Rockyfor3D			

Figura 4.4 Hoja de registro de campo para Rockyfor3D. Fuente: Dorren, 2016.

---

Además, se requirió registrar y mapear la actividad de caída de rocas sobre la ladera, incluyendo información como el tipo, tamaño, forma y posición de las rocas depositadas en las zonas de tránsito y depósito. Otros indicadores que se consideran en la sección 5 de la hoja de registro (Fig. 4.4) son las huellas de desprendimiento en los macizos rocosos, distancia entre los cráteres de impacto de los bloques, así como profundidad de penetración, distribución espacial, altura de las heridas en el tallo de los árboles y ramas dañadas.

### **4.1.3 Datos de entrada**

El último paso de esta fase fue preparar los datos de entrada para *Rockyfor3D* (Dorren, 2016). Esto involucró analizar y procesar los datos obtenidos en el trabajo de campo para crear un modelo digital de elevación (MDE) representativo de la topografía del área de estudio. Además, implicó digitalizar y exportar mapas ráster a partir de los parámetros que definen las rocas en la zona de desprendimiento y la superficie de la ladera en las zonas de tránsito y depósito.

La resolución de los datos de entrada tiene gran influencia en los resultados del modelado numérico (Dorren *et al.*, 2011). A medida que disminuye la resolución o aumenta el tamaño de las celdas del MDE, también disminuye la exactitud de la cinemática simulada y la precisión espacial de los resultados, debido a que los ráster de baja resolución carecen de demasiados detalles. Por otro lado, una resolución muy alta podría introducir ruido al MDE y conducir a enormes conjuntos de datos, lo que disminuye la velocidad de cálculo del modelo numérico. Según Dorren (2016), un MDE de 1 m de resolución no necesariamente mejora la calidad de los resultados de *Rockyfor3D*, pero sí aumenta sustancialmente la cantidad de datos y el tiempo de simulación. Por lo tanto, la resolución ideal del MDE se encuentra entre 2 y 10 m.

#### **4.1.3.1 Modelo digital de elevación**

El MDE es una representación gráfica 3D de la superficie del terreno generado a partir de los datos de elevación, es decir, la altura de los puntos de la superficie sobre el nivel medio del mar (Durón-Díaz, 2007). MDE es el término genérico dentro del cual se describen los modelos digitales de superficie y de terreno. El modelo digital de superficie (MDS) representa la superficie de la Tierra, incluyendo todos los objetos sobre la misma, mientras que el modelo digital de terreno (MDT) representa la superficie del suelo desnudo, sin elementos ajenos al mismo como la vegetación, edificaciones y demás objetos.

Para crear un MDE de alta resolución y gran exactitud, representativo del relieve del área de estudio, fue necesario procesar las nubes de puntos obtenidas a partir de LiDAR terrestre. El procesamiento se llevó a cabo en la aplicación SIG, *GlobalMapper* (Blue Marble Geographics, 2018; 2019) a través del *Módulo Lidar*. El *Módulo Lidar* complementa la versión estándar de *GlobalMapper* con una colección de herramientas para el procesamiento de nubes de puntos y creación de superficies, incluyendo clasificación automática de nubes de puntos, extracción de elementos – como edificaciones, árboles y líneas eléctricas – visualización y edición de perfiles, entre otras funciones (Fig. 4.5).



**Figura 4.5** Barra de herramientas del *Módulo Lidar* de *GlobalMapper*. Fuente: Blue Marble Geographics, 2018.

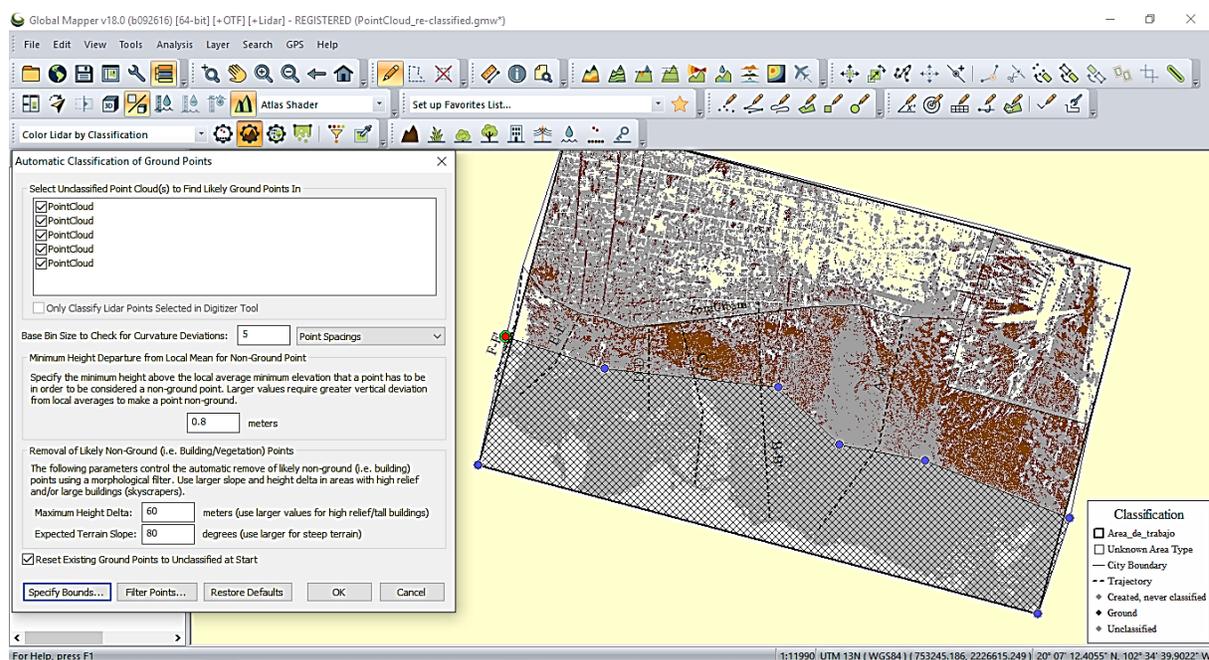
El procesamiento a través de *GlobalMapper* (Blue Marble Geographics, 2019) inició con la importación de los datos LiDAR, comúnmente en dos tipos de formato estándar: LAS y LAZ. LAS es un formato de archivo público para el intercambio de nubes de puntos 3D; es un archivo binario que conserva la información específica de los datos LiDAR, a diferencia de un ASCII genérico. El formato LAZ es una versión comprimida de LAS. Todos los formatos de archivo compatibles con la *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) – .las, .laz, .tar, .gz, .tgz, .zip – se pueden importar directamente a *GlobalMapper*. Asimismo, el cuadro de diálogo *Opciones de carga Lidar* permite a los usuarios filtrar y delimitar las nubes de puntos antes de cargar los datos al programa.

Posteriormente, se requiere analizar y clasificar las nubes de puntos (Blue Marble Geographics, 2019). Los puntos se pueden clasificar en nunca clasificado, sin asignar, suelo, vegetación baja, vegetación media, vegetación alta, edificación, agua, ferrocarril, carretera, por mencionar algunos. Con el *Módulo Lidar*, se pueden clasificar manualmente los puntos LiDAR, además de usar herramientas de clasificación automática para datos LiDAR no clasificados.

Estas herramientas de clasificación están disponibles en la barra de herramientas del *Módulo Lidar* (Fig. 4.5) y se distribuyen en varios menús de edición, carga y exportación.

Para nuestro caso de estudio, primero se realizó una clasificación automática de puntos de suelo para datos LiDAR no clasificados. Primero, se delimitó la nube de puntos según la inclinación del terreno (por ejemplo, corona, lomo y pie de la ladera, planicie lacustre), ya que cada zona requería parámetros distintos para su clasificación (Fig. 4.6). Es decir, la clasificación automática de puntos de suelo se ejecuta al especificar la altura mínima en metros (por encima del promedio local) que un punto debe tener para ser considerado como punto no terrestre.

Después de la clasificación automática, fue necesario analizar la nube de puntos a través del comando *Path Profile / LOS* (Blue Marble Geographics, 2019). Esta herramienta de perfil de ruta 3D o línea de visión (LOS, *line of sight*) muestra un perfil vertical a lo largo de una ruta específica de datos LiDAR, el cual permite revisar y verificar que se hayan clasificado adecuadamente los puntos. A través de esta, se efectuó una reclasificación manual de los puntos de suelo que no fueron clasificados automáticamente.



**Figura 4.6** Interfaz gráfica de usuario de *GlobalMapper* al ejecutar la clasificación automática de puntos de suelo (izquierda) y la nube de puntos dividida en zonas de la ladera (derecha). Fuente: captura de pantalla de Blue Marble Geographics, 2018.

La precisión y resolución espacial del MDE depende principalmente de la clasificación de los puntos de suelo y el método de interpolación de los puntos. Para dicha interpolación, se realizaron varias pruebas con diversas especificaciones y empleando todos los métodos con los que cuenta el programa *GlobalMapper*. El método que generó el MDE más representativo fue el de triangulación o *Triangulation (Grid TIN of points)*, a partir de la opción *Crear cuadrícula de elevación a partir de datos vectoriales 3D*, el cual utiliza una red irregular de triángulos (TIN, *triangular irregular network*) que conecta los valores conocidos de elevación entre los puntos (Blue Marble Geographics, 2019).

Como resultado final del procesamiento de nubes de puntos, se obtuvo un MDE de 2 m de resolución que nos sirvió para definir la topografía de detalle de la ladera en estudio. Cabe mencionar, el MDE es un híbrido creado a partir de la combinación de un MDT y un MDS. El MDT representa el relieve a lo largo de la corona, lomo y pie de la ladera, mientras que el MDS contempla la elevación de las edificaciones en la mancha urbana de Pajacuarán, ubicada sobre la planicie lacustre. Esta combinación de modelos permite considerar el efecto que tienen las construcciones en la trayectoria y probabilidad de alcance por caída de rocas.

#### **4.1.3.2 Mapas ráster**

Para que los resultados sean confiables y representativos de la realidad, el modelo numérico *Rockyfor3D* (Dorren, 2016) debe reproducir una caracterización precisa del área de estudio. Por lo tanto, esta etapa final de la preparación implicó digitalizar y exportar mapas ráster a partir de los parámetros que definen las rocas inestables y la superficie de la ladera.

Los datos de entrada al programa consisten en un mínimo de diez ráster de formato ASCII (Cuadro 4.3), los cuales definen la topografía, condiciones de la zona de desprendimiento y características de la superficie de la ladera. Es indispensable que todos los mapas ráster tengan el mismo formato, extensión y tamaño de celda. El encabezado de un ráster en formato ASCII proporciona información sobre el número de filas y columnas (*nrows* y *ncols*), el tamaño de celda o resolución (*cellsize*, en m), las coordenadas X, Y del centro o esquina inferior izquierda de la celda inferior izquierda (*xllcenter* / *xllcorner* y *yllcenter* / *yllcorner*, respectivamente), y el valor que representan las celdas sin datos (*NODATA\_value; default = -9999*). Por último, los decimales deben ir precedidos por un punto (.) y no por coma (,).

**Cuadro 4.3** Datos de entrada requeridos para realizar simulaciones en *Rockyfor3D*

No.	Nombre	Descripción
1	<i>dem.asc</i>	El MDE rasterizado representa la topografía de detalle de la ladera
2	<i>rockdensity.asc</i>	Un mapa ráster que define la densidad de la roca ( $\text{kg/m}^3$ ) indicada en cada celda de inicio
3	<i>d1.asc</i>	Tres mapas ráster que definen las dimensiones del bloque de roca: altura, ancho y longitud (m) respectivamente, indicados en cada celda de inicio
4	<i>d2.asc</i>	
5	<i>d3.asc</i>	
6	<i>blshape.asc</i>	Un mapa ráster que define la forma del bloque de roca indicado para cada celda de inicio. Valores: 0 sin bloque, 1 rectangular, 2 elipsoidal, 3 esférico, y 4 disco
7	<i>rg70.asc</i>	Tres mapas ráster que definen la rugosidad superficial de la ladera. No representa la micro-topografía, sino las rocas sobre la ladera con las que impacta el bloque desprendido. Este dato se determina en campo, identificando zonas homogéneas del área de estudio y representándolas por medio de polígonos en un mapa. Cada polígono representa el tamaño del material cubriendo la ladera por medio de tres clases probables <i>rg70</i> , <i>rg20</i> , y <i>rg10</i> . Cada clase representa un ráster y corresponde a la altura media del obstáculo (MOH, en m) con el que se impacta la roca desprendida en el 70%, 20% y 10% de los casos. Valores: 0 a 100 m (0 sin fricción, 100 alto), directamente relacionados al coeficiente de restitución tangencial ( $R_T$ )
8	<i>rg20.asc</i>	
9	<i>rg10.asc</i>	
10	<i>soiltype.asc</i>	Un mapa ráster que define el tipo de suelo. Representa la rigidez del material y también debe ser mapeado por polígonos en el campo. Valores: 8 tipos de suelo, directamente relacionados al coeficiente de restitución normal ( $R_N$ )

Fuente: información tomada de Dorren, 2016.

Con base al mapa *dem.asc* o MDE rasterizado – a partir del procesamiento de datos LiDAR – se digitalizaron los otros nueve ráster utilizando la herramienta *ArcMap* de la familia *ArcGIS Desktop* (ESRI, 2018). *ArcGIS* es un conjunto de productos de sistemas de información geográfica (SIG), comercializado por el *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Bajo el nombre genérico *ArcGIS* se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Estas aplicaciones se engloban en familias temáticas. *ArcGIS Desktop*, la familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas *ArcMap*, *ArcReader*, *ArcCatalog*, *ArcToolbox*, *ArcScene* y *ArcGlobe*.

El primer paso para usar *ArcMap* (ESRI, 2018) fue configurar el proyecto SIG, indicando el sistema de coordenadas. Enseguida, se importaron los datos existentes del área de estudio como fotografías aéreas, ortomosaicos, modelos digitales de superficie y de terreno, así como mapas temáticos de sombreado y pendiente del MDE. A partir de estos mapas y los parámetros registrados en el trabajo de campo, se digitalizó la superficie que delimita la zona de estudio (dato vectorial o *shapefile*) y se dividió en polígonos homogéneos, asignando en estos los nueve



## 4.2 DEFINICIÓN DEL ESCENARIO DE DESPRENDIMIENTO

Esta fase tiene como propósito determinar qué tamaño de roca puede caer de qué área de desprendimiento y, lo que resulta más difícil, con qué frecuencia (Dorren *et al.*, 2011). El tamaño y la forma de los bloques de roca se definió a través del análisis de las propiedades estructurales del macizo rocoso en la zona de desprendimiento, y de los fragmentos de rocas depositadas en las zonas de tránsito y depósito de la ladera. Este análisis proporciona información respecto a la distribución de las dimensiones de los bloques que podrían caer de los afloramientos, así como la estabilidad del macizo rocoso (Hoek y Bray, 1981). Sin embargo, a escala local y regional, tales métodos son difícilmente factibles, ya que es imposible analizar ampliamente las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos por varios kilómetros. Esto resulta ser una gran limitante si se requiere un estudio de trayectoria de caída de rocas para crear un mapa de peligrosidad en áreas más extensas.

Ante esta problemática, con frecuencia se aplica un umbral al mapa de pendientes derivado del MDE para determinar la zona potencial de caída de rocas (Dorren y Seijmonsbergen, 2003; Frattini *et al.*, 2008). El valor del umbral de pendiente depende de la geología del área de estudio, así como de la resolución del MDE. Troisi *et al.* (2008) proponen la siguiente relación entre el umbral del ángulo de pendiente requerido para definir la zona de desprendimiento ( $SAT_{RA}$  o *slope angle threshold for rockfall release areas*, en °) y la resolución del MDE ( $RES_{MDE}$ , en m):

$$SAT_{RA} = 55 \cdot RES_{MDE}^{-0.075} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Esta relación se derivó de una comparación entre zonas de desprendimiento mapeadas en el campo y múltiples MDE con resoluciones entre 1 y 50 m en más de 20 áreas de estudio en los Alpes austriacos, franceses y suizos (Troisi *et al.*, 2008). Para nuestra zona de interés, se aplicó un umbral  $> 52.2^\circ$ , a partir de la ecuación (4.1), al mapa de pendientes derivado del MDE de 2 m de resolución para determinar la zona susceptible a la caída de rocas.

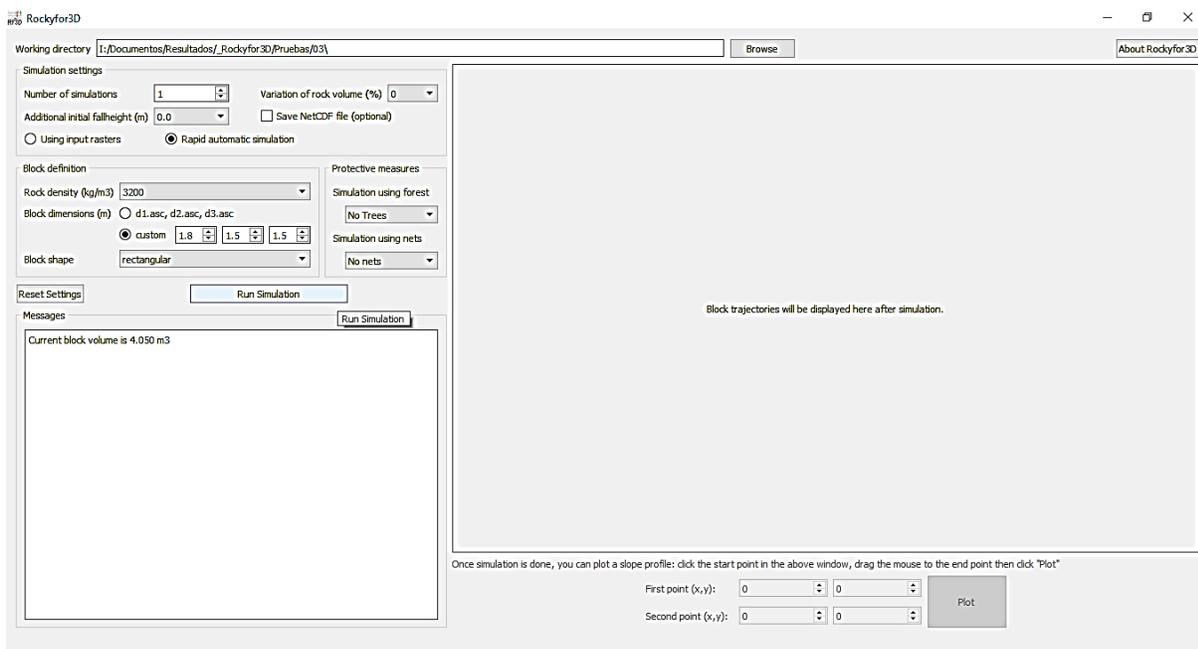
Como se mencionó anteriormente, la frecuencia con la que un tamaño de roca o volumen dado se desprende de un macizo rocoso es extremadamente difícil de definir. Si se dispone de un registro completo de eventos históricos de caída de rocas para un sitio determinado, se puede obtener una noción confiable de la relación magnitud-frecuencia para la zona de desprendimiento.

### 4.3 SIMULACIÓN DE CAÍDA DE ROCAS

El modelo numérico *Rockyfor3D* (Dorren, 2016) simula la caída de rocas mediante datos vectoriales en 3D, calculando secuencias consecutivas de la trayectoria de una roca y su rebote en la superficie de la ladera. Como se mencionó en la fase anterior, los datos de entrada consisten en un conjunto de mapas ráster (Cuadro 4.3), los cuales definen la topografía, bloques susceptibles a desprendimiento y características de la superficie de la ladera.

Para ejecutar *Rockyfor3D*, el primer paso es elegir el directorio de trabajo que incluye los archivos ráster de entrada (Fig. 4.8). Luego de seleccionar la carpeta de archivos, se define la configuración de la simulación a través del número de simulaciones, altura adicional de la caída inicial (m), variación del volumen de la roca (%), y se elige entre las opciones de simulación: utilizando los ráster de entrada o simulación automática rápida.

Si se opta por utilizar los mapas ráster, estos se emplean a partir del directorio de trabajo al ejecutar la simulación, mientras que en la simulación automática se definen los parámetros de la roca en la interfaz gráfica de usuario (GUI, *graphical user interface*). La definición del bloque incluye establecer su densidad ( $\text{kg/m}^3$ ), dimensiones (m), y forma. Por último, se indica si se emplearán en la simulación medidas de protección mediante bosque o redes. Si es así, los ráster se ejecutan desde el directorio indicado (Fig. 4.9).



**Figura 4.8** Interfaz gráfica de usuario de *Rockyfor3D* antes de ejecutar la simulación. Fuente: captura de pantalla de Dorren, 2016.

The image shows a software interface for configuring a simulation. It is divided into three main sections:

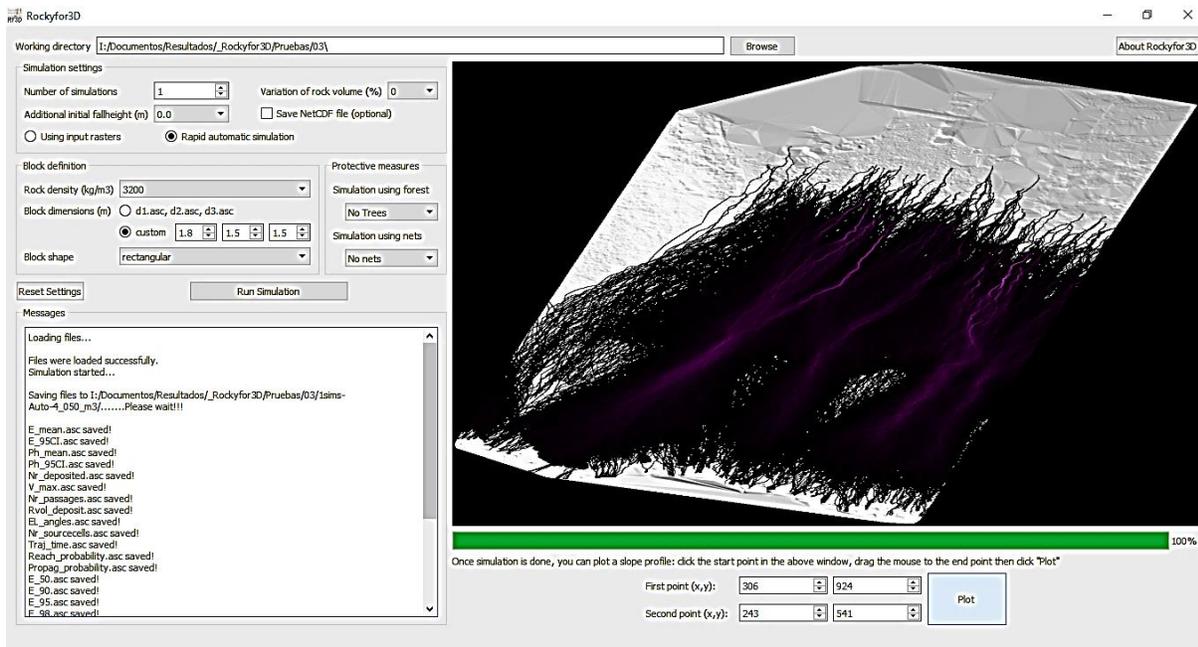
- Simulation settings:** Includes a dropdown for 'Number of simulations' (set to 1), a dropdown for 'Variation of rock volume (%)' (set to 0), a dropdown for 'Additional initial fallheight (m)' (set to 0.0), a checkbox for 'Save NetCDF file (optional)' (unchecked), and two radio buttons: 'Using input rasters' (unchecked) and 'Rapid automatic simulation' (checked).
- Block definition:** Includes a dropdown for 'Rock density (kg/m3)' (set to 3200), a section for 'Block dimensions (m)' with radio buttons for 'd1.asc, d2.asc, d3.asc' (unchecked) and 'custom' (checked), followed by three input fields for dimensions (1.8, 1.5, 1.5), and a dropdown for 'Block shape' (set to rectangular).
- Protective measures:** Includes a dropdown for 'Simulation using forest' (set to No Trees) and a dropdown for 'Simulation using nets' (set to No nets).

At the bottom, there are two buttons: 'Reset Settings' and 'Run Simulation'.

**Figura 4.9** Porción de la interfaz gráfica de usuario de *Rockyfor3D* con las opciones de configuración de la simulación, definición del bloque y medidas de protección. Fuente: captura de pantalla de Dorren, 2016.

Al finalizar la simulación, se muestra en la GUI el mapa de sombreado del MDE sobrepuesto con un mapa del número de trayectorias por caída de rocas (Fig. 4.10). Los datos de salida se guardan en una nueva carpeta del directorio de trabajo. El subdirectorio de los resultados se llamará *Nsims-x\_m3*, donde *N* es el número de simulaciones por celda de inicio, y *x* es el volumen del bloque simulado, si esto se definió en la GUI. En el caso de que los ráster de entrada sean los que hayan definido los parámetros de la roca, el valor seguirá siendo *x*. Si la simulación incluyó bosque y / o redes, las palabras *Forest* y / o *Nets*, respectivamente, estarán en el nombre del subdirectorio. Los resultados de *Rockyfor3D* (Dorren, 2016) también son ráster en formato ASCII y tienen la misma extensión y tamaño de celda que los datos de entrada. Estos se pueden abrir en la mayoría de los paquetes SIG, como *SAGA*, *QGIS*, o *ArcGIS* de *ESRI*.

Después de ejecutar la simulación, también es posible realizar un análisis preliminar de los resultados utilizando la GUI (Fig. 4.10). Se puede visualizar una envolvente de la energía cinética simulada, altura de salto y zonas de depósito de los bloques a lo largo de un perfil 2D que se define por un punto inicial y final. Luego de haber definido los dos puntos del perfil, se presiona el botón *Trazar* y el perfil de análisis 2D se mostrará en una segunda ventana. Los datos mostrados en el perfil de análisis se guardarán en el directorio de trabajo como un documento de texto .txt, llamado *Rockyfor3D\_vx\_x\_ProfileData\_dd-mmm-yyyy.txt*.



**Figura 4.10** Interfaz gráfica de usuario de *Rockyfor3D* después de ejecutar la simulación. Fuente: captura de pantalla de Dorren, 2016.

#### 4.4 VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

Se debe realizar una validación de los resultados del modelo numérico de simulación con respecto a los registros de eventos históricos, información proveniente de otros estudios existentes o expertos locales que trabajen en la zona, así como indicadores físicos de la actividad de caída de rocas observados en el campo. Si los resultados producidos corresponden, por ejemplo, a la posición de las rocas depositadas sobre la ladera y altura de las heridas en el tallo de los árboles registradas en el área de estudio, se puede concluir que se han simulado trayectorias de caída de rocas plausibles. Donde no hay marcas en el tallo de los árboles, los cráteres de impacto y ángulos de rebote de los bloques también pueden medirse en el campo y usarse para validar las trayectorias y energías correspondientes. En resumen, si los resultados de la simulación convergen con los eventos históricos, se puede llevar a cabo la siguiente fase del flujo de trabajo (**Cuadro 4.1**), lo que significa que los datos se pueden delimitar y transformar en mapas de peligrosidad por caída de rocas.

Sin embargo, si los resultados del modelo de simulación no corresponden con las características o eventos observados en la realidad, no necesariamente significa que el modelo haya producido errores. En este caso, se revisa si existen elementos en el terreno que no fueron

---

representados en el MDE y modelo numérico – como zanjas, terraplenes, rocas con formas complejas o condiciones extremas en la superficie de la ladera. Si es así, las simulaciones se repiten con el MDE modificado y / o con una forma de roca diferente. Además, es recomendable comparar los resultados simulados con los resultados de otros métodos simples, por ejemplo, el enfoque de la línea de energía.

Si después de estos pasos, los resultados simulados aún no se pueden explicar, las fases de simulación de caída de rocas, y de verificación y validación se deben repetir de forma iterativa con ligeras modificaciones en los parámetros más sensibles del modelo. Particularmente, se verifican aquellos datos de entrada que generen incertidumbre o representan las características del terreno, y que son difíciles de determinar en el campo, como la rugosidad y el amortiguamiento de la superficie de la ladera. Además, se aconseja cambiar sólo un parámetro a la vez.

Para nuestro caso de estudio, la fase de verificación y validación concluyó cuando los resultados producidos por el modelo de simulación finalmente coincidieron con las posiciones de depósito de los bloques de roca inventariados en el campo, y las trayectorias de caída de rocas simuladas correspondieron con la del evento histórico registrado en Pajacuarán en noviembre de 2013. Las siguientes referencias contienen más información respecto a la validación de los resultados de *Rockyfor3D* y otros modelos numéricos en 3D: Volkwein *et al.*, 2011; Clouet *et al.*, 2012; Schober *et al.*, 2012; Corona *et al.*, 2013; Frattini *et al.*, 2012; 2013; Sellmeier, 2015; Mateos *et al.*, 2016; Van Veen *et al.*, 2018.

## **4.5 DELIMITACIÓN DE LOS RESULTADOS**

Delimitar los resultados del modelo significa que los valores atípicos simulados, si existen, deben ser omitidos del conjunto de datos producidos. Tales valores pueden ser rocas que cayeron demasiado lejos o con desviaciones laterales exageradas. Por lo tanto, la delimitación de los resultados consiste en definir el rango de validez para zonificar la peligrosidad por caída de rocas. Dentro de esta clasificación, también se establecen los valores válidos de energía cinética, altura de salto y velocidad de la caída de rocas, entre otros.

## 4.6 ELABORACIÓN DE LOS MAPAS

La fase final del flujo de trabajo es convertir los resultados del modelo numérico a mapas temáticos y proponer el mapa de peligrosidad por caída de rocas. Para ello, los resultados simulados se editaron en el software *ArcMap* (ESRI, 2018). Con base al conjunto de datos clasificados y distribuidos espacialmente, se crearon diversos mapas del proceso de caída de rocas, por ejemplo, de la distribución de valores máximos de energía cinética, altura de salto y velocidad dentro de la zona de alcance de caída de rocas.

Si se considera apropiado, se puede definir la probabilidad de frecuencia temporal para la elaboración de mapas de peligrosidad por caída de rocas, pero esto depende de la precisión con la que se define la probabilidad temporal del escenario de desprendimiento. Esto no sólo es complicado, sino inexacto. Por lo que, en ocasiones resulta más representativo definir escenarios de susceptibilidad y peligrosidad, cuya frecuencia aumenta ante la presencia de factores condicionantes y detonantes.

# Área de estudio

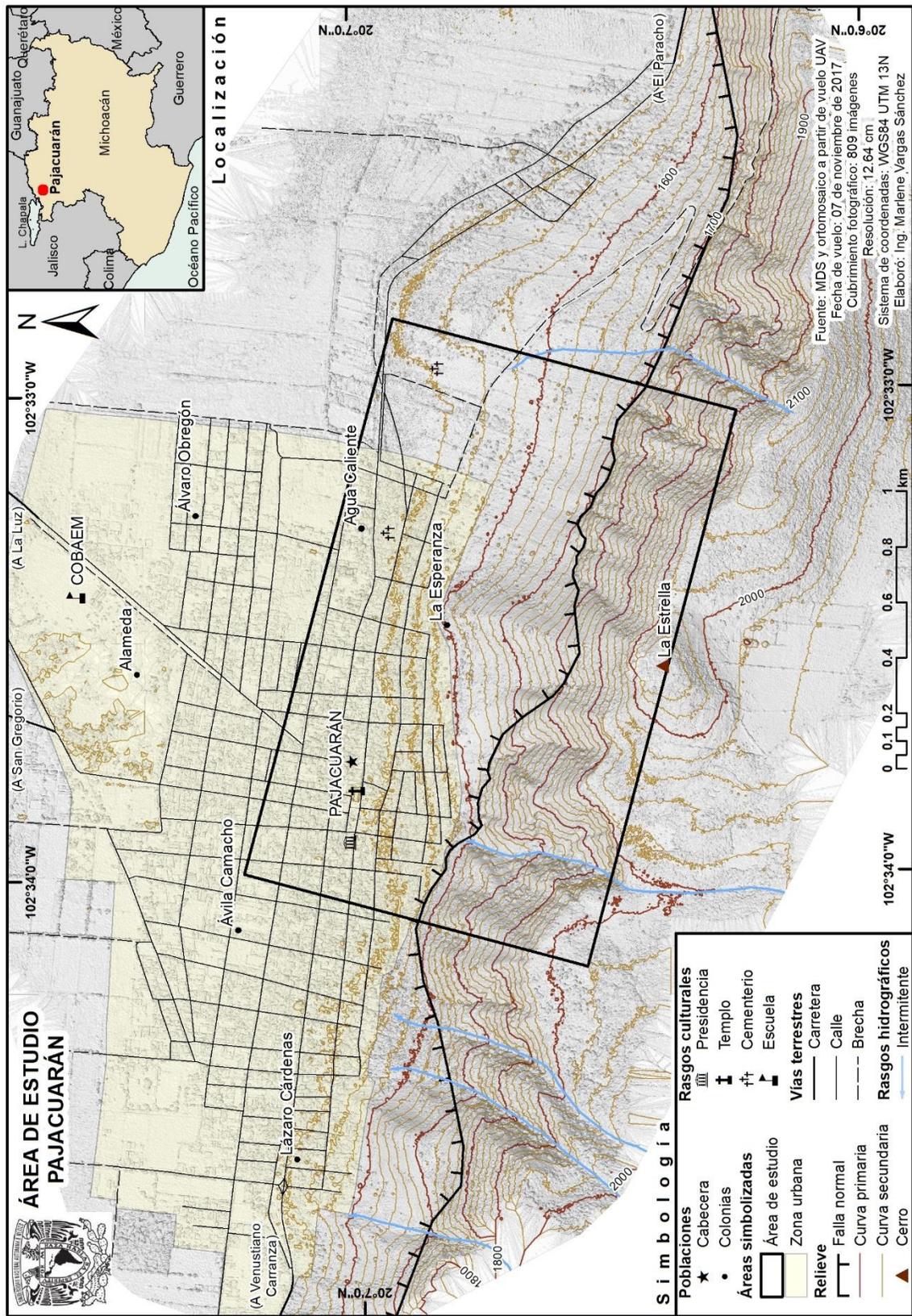
---

Como primera etapa del flujo de trabajo para evaluar la peligrosidad por caída de rocas, tenemos la caracterización del área de estudio, para lo cual se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de artículos científicos y trabajos de tesis. Con este fin, también se consultó la cartografía oficial mexicana y datos espaciales proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM).

A través de los levantamientos con el vehículo aéreo no tripulado (UAV) se crearon productos cartográficos georreferenciados como el ortomosaico y modelo digital de superficie (MDS), los cuales se componen de 809 imágenes aéreas y tienen resolución espacial de 12.64 cm. Particularmente, se hizo uso de esta cartografía de detalle para elaborar el mapa base y mapas temáticos, así como describir e ilustrar el contexto geográfico, marco geológico, hidrografía, edafología, uso de suelo y vegetación de Pajacuarán.

### **5.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA**

La falla geológica de Pajacuarán se localiza principalmente en el municipio homónimo hacia el noroeste del estado de Michoacán. El territorio municipal abarca una superficie total de 174.06 km<sup>2</sup> con altitudes de 1,600 hasta 2,300 m s.n.m., entre los paralelos 20° 04' y 20° 14' latitud N y los meridianos 102° 26' y 102° 37' longitud W. En su frontera norte colinda con los municipios de Venustiano Carranza, Briseñas y Vista Hermosa; al este con Vista Hermosa, Ixtlán y Chavinda; al sur con Chavinda, Villamar y Venustiano Carranza; y al oeste con Venustiano Carranza (INEGI, 2009).



**Figura 5.1** Mapa base de una porción de la falla y mancha urbana de Pajacuarán. El recuadro negro muestra la delimitación del área de estudio. Fuente: información topográfica modificada de INEGI, 2002. Carta Topográfica Pajacuarán F13D88, escala 1 : 50,000.

---

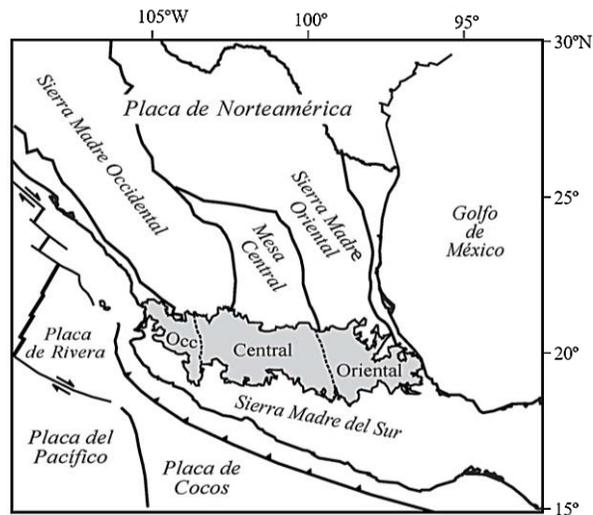
Geográficamente, Pajacuarán se encuentra al sureste del lago de Chapala, el embalse natural más grande de México. La cabecera municipal está ubicada sobre una planicie lacustre, justo al pie de la falla Pajacuarán. La escala general del área de estudio es de 1: 10'000, y corresponde a la porción de la falla geológica situada al sureste de la mancha urbana de la localidad de Pajacuarán. La zona de interés tiene una extensión superficial de 2.66 km<sup>2</sup>, aproximadamente 2.08 km de longitud por 1.28 km de ancho, abarcando alrededor de 2.26 km de la falla geológica activa Pajacuarán (Fig. 5.1).

## 5.2 MARCO GEOLÓGICO

México se caracteriza por su gran diversidad en formaciones geológicas. En el norte y centro del país se extiende una amplia meseta conocida como la Mesa Central, delimitada en sus flancos por las provincias de la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental. En el centro atraviesa la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y al sur limita la zona montañosa conformada por la Sierra Madre del Sur (Aguayo *et al.*, 1996).

La FVTM es un arco volcánico continental que se extiende desde el océano Pacífico hasta el Golfo de México (Fig. 5.2), formando una ancha faja de 130 km. Se distribuye con una dirección preferencial E-W en su porción oriental y central, y WNW-ESE en la zona occidental, formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la trinchera Mesoamericana. Esta característica dio origen al nombre de la provincia, pues claramente muestra una distribución transversal con respecto a las grandes provincias geológicas mexicanas que corren con una orientación preferencial NNW-SSE (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

La provincia FVTM está conformada, a la vez, por las subprovincias: Bajío Guanajuatense, Sierras y Bajíos Michoacanos, Altos de Jalisco, Chapala, Guadalajara, Sierras de Jalisco, Sierras Neovolcánicas Nayaritas, Volcanes de Jalisco y Escarpada Limítrofe del Sur (Cervantes-Zamora *et al.*, 1990). Nuestra zona de estudio se encuentra ubicada en la subprovincia de Chapala.



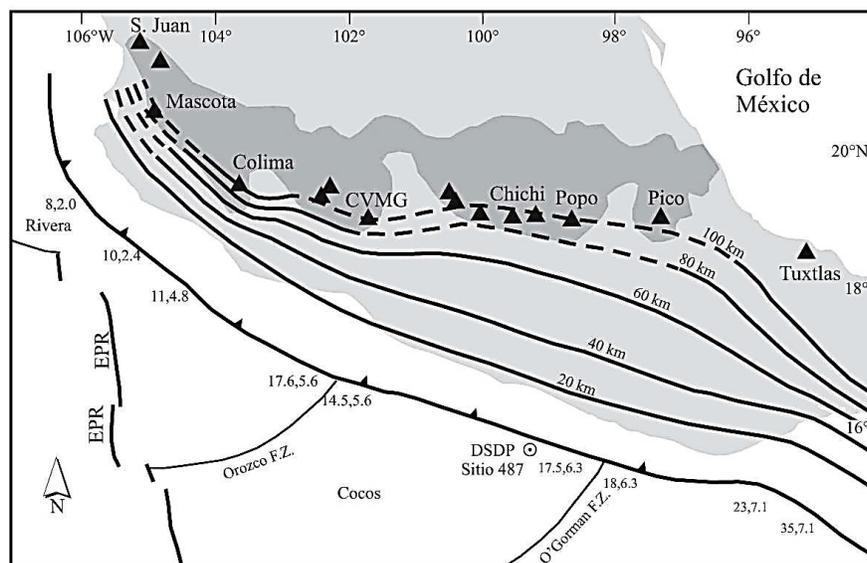
**Figura 5.2** Ubicación de la FVTM (en gris), sus tres sectores, las principales provincias geológicas de México y las placas tectónicas actuales. Fuente: Gómez-Tuena *et al.*, 2005.

### 5.2.1 Tectónica

La FVTM es uno de los sistemas convergentes más complejos del planeta, pues a lo largo de su historia evolutiva ha presentado cambios notables en su posición, estructura y composición. Por esta razón, es una de las zonas más estudiadas y que ha generado gran polémica entre la comunidad geológica.

El origen de la FVTM se debe a la subducción de las placas Rivera y de Cocos por debajo de la placa de Norteamérica (Fig. 5.3). La placa de Cocos surgió, junto con la placa de Nazca, hace 24 Ma como consecuencia del fracturamiento de la placa de Farallón (Aguayo *et al.*, 1996), mientras que la separación de la placa Rivera ocurrió hace aproximadamente 10 Ma. La placa Rivera posee un ángulo de subducción cercano a los 50° (Pardo *et al.*, 1993); la placa de Cocos disminuyó su ángulo de inclinación hasta una posición subhorizontal para después retomar su ángulo inicial de 45° a 50° (Pardo *et al.*, 1995).

En cuanto a la velocidad de convergencia, se sabe que la placa de Rivera varía entre 1.7 a 2.2 cm/año y la placa de Cocos converge hacia el oriente de 4.7 a 6.7 cm/año (DeMets *et al.*, 1994). La migración del frente volcánico hacia la trinchera hace alrededor de 8.5 Ma indica que la placa Rivera inició un retroceso a finales del Mioceno (Ferrari, 2000), hipótesis que se apoya en el cambio de velocidad relativa entre esta y la placa de Norteamérica a partir de los 9 Ma (DeMets *et al.*, 2000).

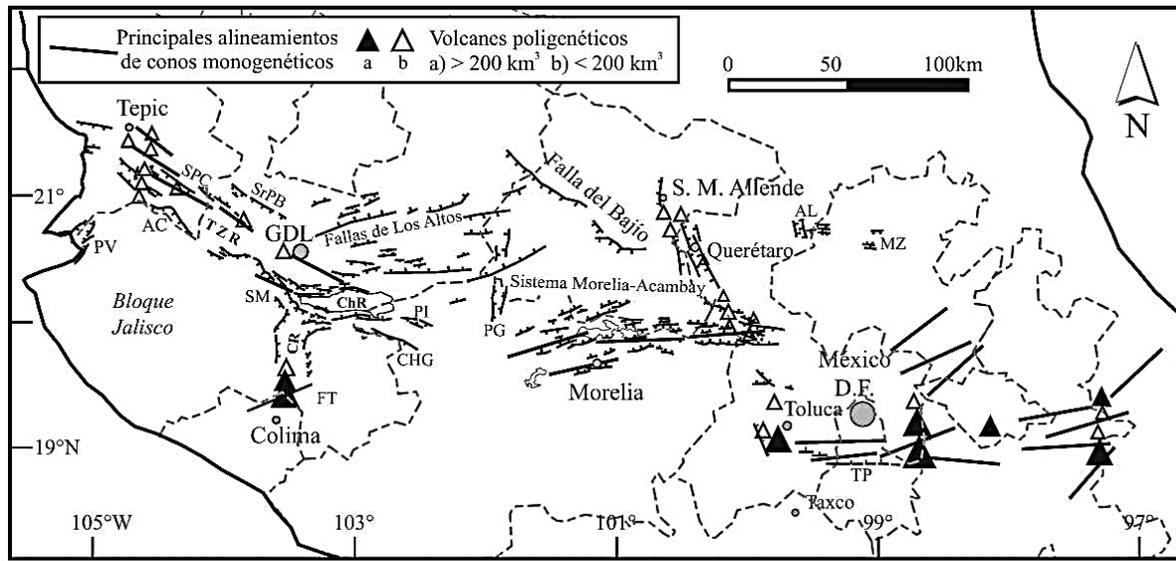


**Figura 5.3** Mapa tectónico generalizado del sistema de subducción mexicano (modificado de Pardo *et al.*, 1995). Los números separados por comas indican la edad de la corteza oceánica (Ma) y la velocidad de convergencia (cm/año), respectivamente. Las curvas de nivel representan la profundidad de la placa oceánica y la curva segmentada es una inferencia. El sombreado (en gris oscuro) corresponde a la provincia FVTM. Se incluyen como referencia algunos campos volcánicos importantes: campo volcánico Los Tuxtlas (Tuxtlas); volcán Pico de Orizaba (Pico); volcán Popocatepetl (Popo); campo volcánico Chichinautzin (Chichi); campo volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG); volcán de Colima (Colima); campo volcánico Mascota (Mascota); y volcán San Juan (S. Juan). Fuente: Gómez-Tuena *et al.*, 2005.

### 5.2.2 Geología estructural

La FVTM suele dividirse en tres sectores (Fig. 5.2) con base en su geología y tectónica (Demant, 1978; Pasquarè *et al.*, 1991): un sector occidental, el cual se encuentra entre la costa del Golfo de California y la junta triple de los rifts de Colima, Tepic-Zacoalco y Chapala (Allan, 1986), y donde se localiza nuestra zona de estudio; un sector central comprendido entre la junta triple y el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende; y un sector oriental entre dicho sistema y la costa del Golfo de México (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

La estructura y morfología de la región occidental de la FVTM están dominadas por un sistema de tres graben o *rift* – áreas hundidas entre sistemas de fallas – que intersectan en una junta triple continental localizada a unos 50 km al SSW de la ciudad de Guadalajara. Este sistema (Fig. 5.4) está compuesto por el rift de Colima con dirección N-S, el rift de Tepic-Zacoalco o Tepic-Chapala con dirección NW-SE y, finalmente, el rift de Chapala con dirección E-W (Alatorre-Zamora *et al.*, 2015).



**Figura 5.4** Relación entre los principales sistemas de fallas del Mioceno-Cuaternario y el volcanismo del la FVTM: rift de Colima (CR); rift Tepic-Zacoalco (TZR); rift de Chapala (ChR); fallas Pajacuarán-Ixtlán de los Hervores (PI); graben de Puerto Vallarta (PV); graben San Pedro-Ceboruco (SPC); semigraben de Amatlán de Cañas (AC); graben Santa Rosa-Plan de Barrancas (SrPB); falla de San Marcos (SM); sistema de fallas Tamazula (FT); semigraben de Cotija (CHG); graben de Penjamillo (PG); semigraben de Aljibes (AL); graben de Mezquital (MZ); y sistema de fallas La Pera (TP). Fuente: Gómez-Tuena *et al.*, 2005.

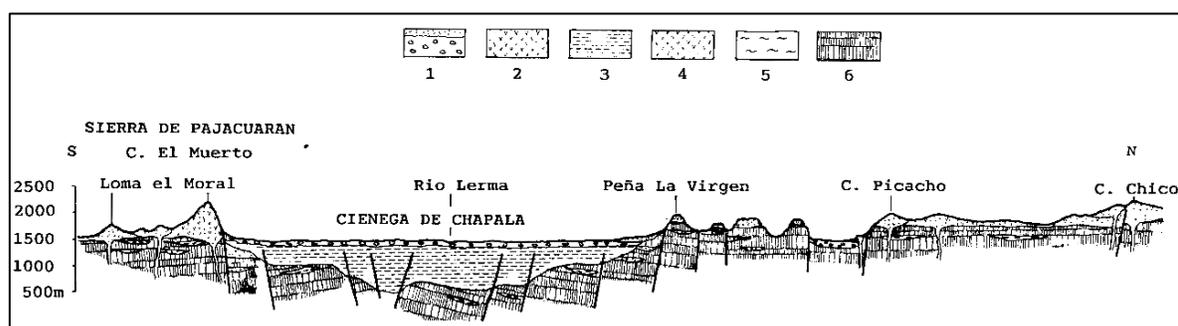
El rift de Chapala es una fosa tectónica situada en la frontera entre los estados de Jalisco y Michoacán. Cubre una superficie de más de 120 km de longitud por 60 km en sus segmentos de mayor anchura. Garduño-Monroy *et al.* (1993) definen el rift de Chapala como una región en forma de cinturón afectada por una deformación distensiva de tendencia N 90° E que se extiende desde las coordenadas 102° 20' W hasta 103° 30' W, y limitado por 20° N y 20° 40' N. La fosa tectónica de Chapala afecta rocas del Mioceno y Plioceno, incluyendo algunas de las estructuras volcánicas asignadas a esta última época geológica (Martínez-Reyes *et al.*, 1990). Además, se sabe que este sistema controla la actividad volcánica de la FVTM (Garduño-Monroy *et al.*, 1993), la cual comenzó en el Mioceno medio, dando lugar a rocas volcánicas, principalmente andesitas y basaltos, asociadas con tobas y cenizas volcánicas (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

Esta región es conocida sobre todo por estar allí localizado el lago de Chapala. La falla Pajacuarán, al sur, y las fallas de Ixtlán de los Hervores, al norte, limitan la continuación de la depresión de Chapala hacia el oriente. Son las fallas las que constituyen las paredes de la fosa tectónica y los límites del lago (Alatorre-Zamora *et al.*, 2015).

Las fallas que conforman el rift de Chapala son de grandes dimensiones, de tipo normal y de orientación E-W con ángulos de inclinación pronunciados. Morfológicamente, se traducen en escarpes con desniveles topográficos importantes. El límite sur del rift lo constituyen fallas paralelas, a veces bifurcadas, con planos que se inclinan hacia el norte, formando bloques tabulares, escalonados y apretados. La falla Pajacuarán, una de las más sobresalientes, resume bien las características estructurales de esta región. Es una falla normal de más de 18 km de longitud, con orientación regional E-W que tiende ligeramente al WNW, cuyo plano se inclina  $65^\circ$  al NE, constituyendo escarpes que pueden rebasar los 500 m de desnivel (Martínez-Reyes *et al.*, 1990).

La edad de la falla Pajacuarán es del Plioceno temprano, pues corta a los volcanes andesíticos de la sierra Pajacuarán (Urrutia-Fucugauchi y Rosas-Elguera, 1994), afectando las rocas de los cerros El Muerto y El Grande (Fig. 5.5), así como los derrames basálticos del Mioceno tardío (Alor-Ortiz y Uribe-Luna, 1986).

Cabe señalar, las principales fallas de  $N 90^\circ E$  no muestran evidencia de actividad reciente, con la excepción de la falla Pajacuarán. Estudios de campo detallados de los escarpes de la falla en la sierra Pajacuarán revelan que esta afecta los depósitos de ladera más recientes (Garduño-Monroy *et al.*, 1993). Asimismo, varios estudios informan que los sistemas tectónicos que formaron el rift de Chapala son actualmente activos (Allan *et al.*, 1991; Delgado, 1992; Moore *et al.*, 1994; Urrutia-Fucugauchi y Rosas-Elguera, 1994; Campos-Enríquez *et al.*, 1998) y que, inclusive, recientemente han ocurrido algunos eventos sísmicos (Pacheco *et al.*, 1999).



**Figura 5.5** Perfil geológico del rift de Chapala y su estratigrafía: (1) sedimentos lacustres y depósitos superficiales (Cuaternario); (2) lavas andesitas-basálticas, escorias y brechas volcánicas (Plioceno tardío a medio); (3) sedimentos lacustres incluyendo limo, diatomita, arcilla y conglomerados de grano fino (Mioceno tardío-Plioceno); (4) lavas basálticas y andesíticas con intercalaciones sedimentarias (Mioceno tardío); (5) ignimbritas de Zapotlanejo; y (6) rocas volcánicas del Plioceno y del Mioceno. Fuente: Garduño-Monroy *et al.*, 1993.

### 5.2.3 Geomorfología regional

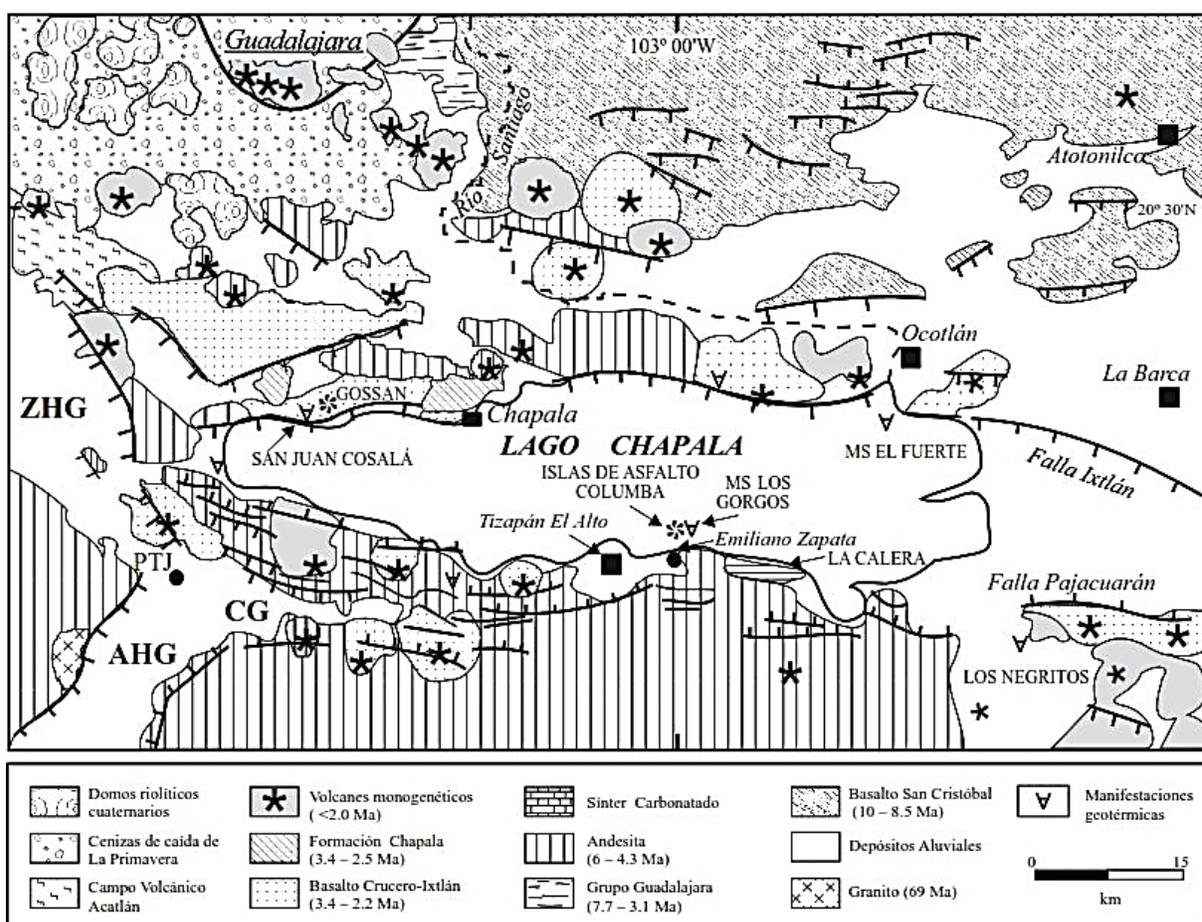
El rift de Chapala se caracteriza por tener una gran planicie lacustre denominada Ciénega de Chapala, donde además se localiza el famoso lago homónimo (Fig. 5.6). El lago de Chapala, con una altitud media de 1,524.60 m s.n.m., es el embalse natural más grande de México localizado principalmente en el estado de Jalisco, colindando al sureste con el estado Michoacán. El lago tiene una extensión superficial de 1,146.59 km<sup>2</sup>, de la cual Jalisco ocupa el 86% y Michoacán el 14% (Gutiérrez-Nájera *et al.*, 2008; CEA, 2011).

Hidrológicamente, el lago de Chapala se ubica en la depresión Lerma-Santiago. En la ribera oriental del lago, los ríos Huaracha y Duero desembocan en el río de la Pasión, que nace en Michoacán atravesando Tizapán y arroyos estacionales que confluyen en el lago. El río Lerma, el más largo de los ríos interiores de México, es el principal abastecedor de agua del lago, al que recibe también en el extremo oriental (CONAGUA, 2015). Al noreste, el río Santiago es la principal salida del cuerpo de agua (CEA, 2011). Asimismo, el río Zula alimenta el río Santiago, muy cerca del nacimiento de este en el lago de Chapala. Debido a la represa que hay río abajo del Santiago, el río Zula aporta agua al lago cuando la represa se encuentra cerrada (Gutiérrez-Nájera *et al.*, 2008).

El rift de Chapala tiene rasgos geomorfológicos diversos, la mayor parte de ellos de origen volcánico y, en menor consideración, de procedencia fluvial y aluvial. A escala regional, se presentan diversos sistemas de topoformas, en su mayoría, sierras con laderas de escarpe de falla, llanuras aluviales, vasos lacustres inundables y salinos (INEGI, 2002; 2009).

Las principales estructuras que se identifican son estratovolcanes, domos, conos cineríticos y mesetas derivadas de la actividad volcánica de la FVTM (INEGI, 2002; 2009). El lago de Chapala se encuentra rodeado por lomeríos y sierras, entre las cuales se pueden mencionar la sierra El Madroño y El Travesaño al noroeste, y la sierra de Pajacuarán al sureste. En los cerros La Estrella, El Muerto y El Grande de la sierra Pajacuarán, se pueden observar antiguos escarpes de la falla geológica de Pajacuarán. Las fallas Pajacuarán y de Ixtlán limitan el lago, y la continuación de la Ciénega de Chapala hacia el oriente (Alatorre-Zamora *et al.*, 2015).

Respecto a la amplitud y pendiente del terreno, se aprecian planicies con altitudes de 1,500 a 1,600 m s.n.m., lomeríos bajos con 1,600 a 1,800 m s.n.m. de elevación y zonas abruptas montañosas, cuyas cotas topográficas varían de 1,800 a 2,100 m s.n.m. (CONAGUA, 2015).



**Figura 5.6** Geomorfología y geología del rift de Chapala (modificado de Rosas-Elguera y Urrutia-Fucugauchi, 1998): Semigraben de Amacueca (AHG); graben de Citlala (CG); semigraben de Zacoalco (ZHG); punto triple de Jalisco (PTJ); manantial sublacustre (MS). Fuente: Zárate del Valle y Simoneit, 2005.

#### 5.2.4 Estratigrafía regional

La estratigrafía regional se define a partir de estudios de campo realizados por Demant (1978), Pasquarè *et al.* (1991), Garduño-Monroy *et al.* (1993), y el Rosas-Elguera *et al.* (2000). Las unidades más antiguas del rift de Chapala son una sucesión gruesa de brechas heterogéneas cubiertas por una secuencia de flujos andesíticos con fechamiento entre 1.2 y 8.8 Ma. Esta secuencia forma una meseta amplia cortada por fallas asociadas a la formación de la fosa tectónica. Localmente está cubierta por sedimentos lacustres del Mioceno tardío al Plioceno temprano. Para el Plioceno medio se inicia el volcanismo efusivo de la FVTM, que continúa con menor intensidad en el Cuaternario (Fig. 5.5; Fig. 5.7).

#### **5.2.4.1 Paleógeno**

**Brecha de Chapala.** Según Garduño-Monroy *et al.* (1993), la unidad más antigua está bien expuesta a lo largo de la carretera que va desde Chapala hasta Jocotepec, al lado oeste del lago de Chapala. Es una brecha heterogénea compuesta de bloques de lava de decímetros a varios metros de diámetro que van de composiciones dacíticas a andesíticas. En algunos afloramientos los bloques individuales están incrustados en una matriz fangosa a arenosa; en otros sitios los bloques están en estrecho contacto y la roca está fuertemente consolidada. Estas brechas suelen encontrarse severamente fracturadas y alteradas por procesos hidrotermales de manera que se dificulta definir las facies originales de las rocas volcánicas. Ningún intento de la datación de esta unidad se informa en la literatura. No obstante, se infiere que es de edad Paleógeno.

#### **5.2.4.2 Mioceno tardío**

**Secuencia Volcánica Intermedia.** Una discordancia erosiva separa las brechas de Chapala de una sucesión tabular de flujo de lavas de composición andesítica a basáltica de hasta 10 m de espesor (Garduño-Monroy *et al.*, 1993). Forman una meseta ancha de espesor mayor a 300 m, que fue el rasgo morfológico dominante del rift antes de su rotación en bloques girados por la acción de las fallas N 90° E. Los fechamientos de las lavas de la meseta de la región de Arandas-Atotonilco arrojan edades entre 10 a 12 Ma y de 8.8 Ma en los alrededores de Villa Chavinda.

En la región de Tototlán-Zapotlanejo, sobre la secuencia del Mioceno tardío, se puede apreciar la ignimbrita mencionada por Demant (1981). La característica más evidente de esta unidad es la presencia de vidrio oscuro de hasta 10 cm. Esta unidad representa la única variación significativa de la actividad volcánica, predominantemente básica y efusiva observada en el rift.

#### **5.2.4.3 Mioceno-Plioceno**

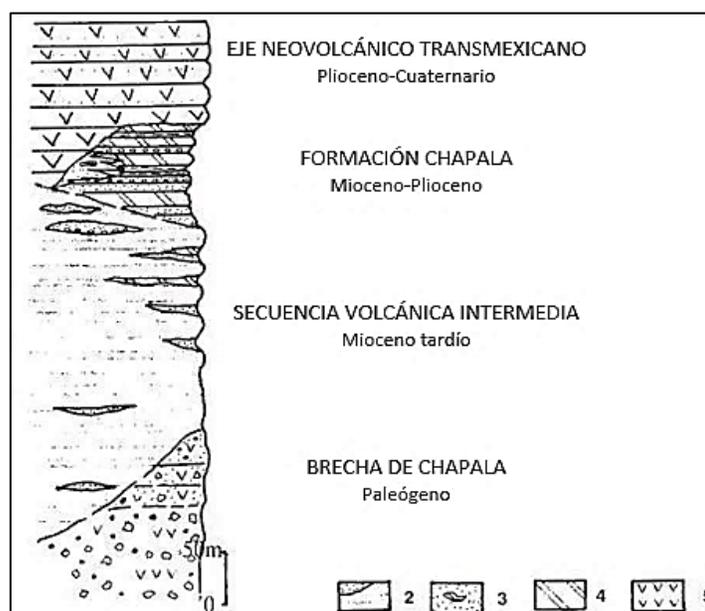
**Formación Chapala.** Descrita por Garduño-Monroy *et al.* (1993), localmente la lava de la secuencia volcánica intermedia está cubierta discordantemente por depósitos sedimentarios lacustres y deltaicos con intercalaciones de ceniza y pómez de composición riolítica, incluyendo facies diatomitas y terrígenas, que tienen una granulometría que va desde arcilla hasta conglomerado de grano fino. Las muestras diatómicas de la zona de Villa Chavinda tienen fechamiento del Plioceno medio. Las notas de la carta geológica del estado de Michoacán (SMG, 2008) atribuyen edades de las muestras recogidas cerca de Jocotepec al Mioceno tardío. Los

afloramientos de esta unidad están confinados dentro del rift de Chapala y las depresiones tectónicas adyacentes. Al norte de la población de Chapala, los sedimentos alcanzan su espesor máximo de aproximadamente 100 m.

#### 5.2.4.4 Plioceno-Cuaternario

**Faja Volcánica Transmexicana.** Al norte de Chapala, cerca de Santa Cruz, el contacto entre los sedimentos y las lavas de la actividad de la FVTM está bien expuesto. Según Pasquarè *et al.* (1986), se considera a la FVTM como Plioceno-Cuaternario. Los productos son esencialmente flujos de lava y escoria de composición andesítica a basáltica. Su morfología y composición sugieren una actividad monótona, esencialmente efusiva y de tipo hawaiano-estromboliano.

La secuencia de la FVTM en la región del rift de Chapala es una capa de grosor irregular que cubre las mesetas del Mioceno tardío. Los volcanes del Plioceno son afectados por las fallas de Chapala con rumbo N 90° E, que también tienden a controlar su orientación de modo que a menudo forman sierras elongadas; por ejemplo, las sierras de Poncitlán y de Pajacuarán. Por lo contrario, los volcanes identificados como Cuaternarios se encuentran prácticamente sin deformaciones (Garduño-Monroy *et al.*, 1993).



**Figura 5.7** Esquema de la columna estratigráfica del rift de Chapala: (1) brechas heterogéneas de Chapala (Paleógeno); (2) vulcanismo de la Secuencia Intermedia (Mioceno tardío); (3) sedimentos lacustres de la Formación Chapala (Mioceno-Plioceno tardío); (4) vulcanismo del Plioceno; y (5) vulcanismo del Cuaternario. Fuente: Garduño-Monroy *et al.*, 1993.

### 5.2.5 Estratigrafía local

Dentro del marco geológico local, el municipio de Pajacuarán se ubica en su mayor parte sobre suelos aluviales del Cuaternario (correspondiente al 67.65% de su extensión superficial), lavas de composición basáltica del Plioceno-Cuaternario (27.75%), y rocas sedimentarias de tipo limolita-arenisca del Neógeno (1.32%), según Rosas-Elguera *et al.* (2000), SGM (2008) e INEGI (2009).

La zona de estudio, donde corta la falla geológica de Pajacuarán, es principalmente volcánica y está constituida por una alternancia de bloques de andesita-basáltica y brecha volcánica, que forman capas extendidas de flujos relacionados con la actividad volcánica de la región (Garduño-Monroy *et al.*, 1993). La corona y el lomo de la ladera están formadas por lavas de composición andesita-basáltica del Plioceno-Cuaternario (TplA-B), mientras que al pie de la ladera se encuentran depósitos coluviales del Cuaternario (Qhoal). La estratigrafía local (Fig. 5.8) se define principalmente con base a observaciones de campo, cartografía oficial mexicana (Rosas-Elguera *et al.*, 2000; SGM, 2008; INEGI, 2009), y datos estratigráficos obtenidos por Camacho-Pérez (2015).

#### 5.2.5.1 Sierra de Pajacuarán

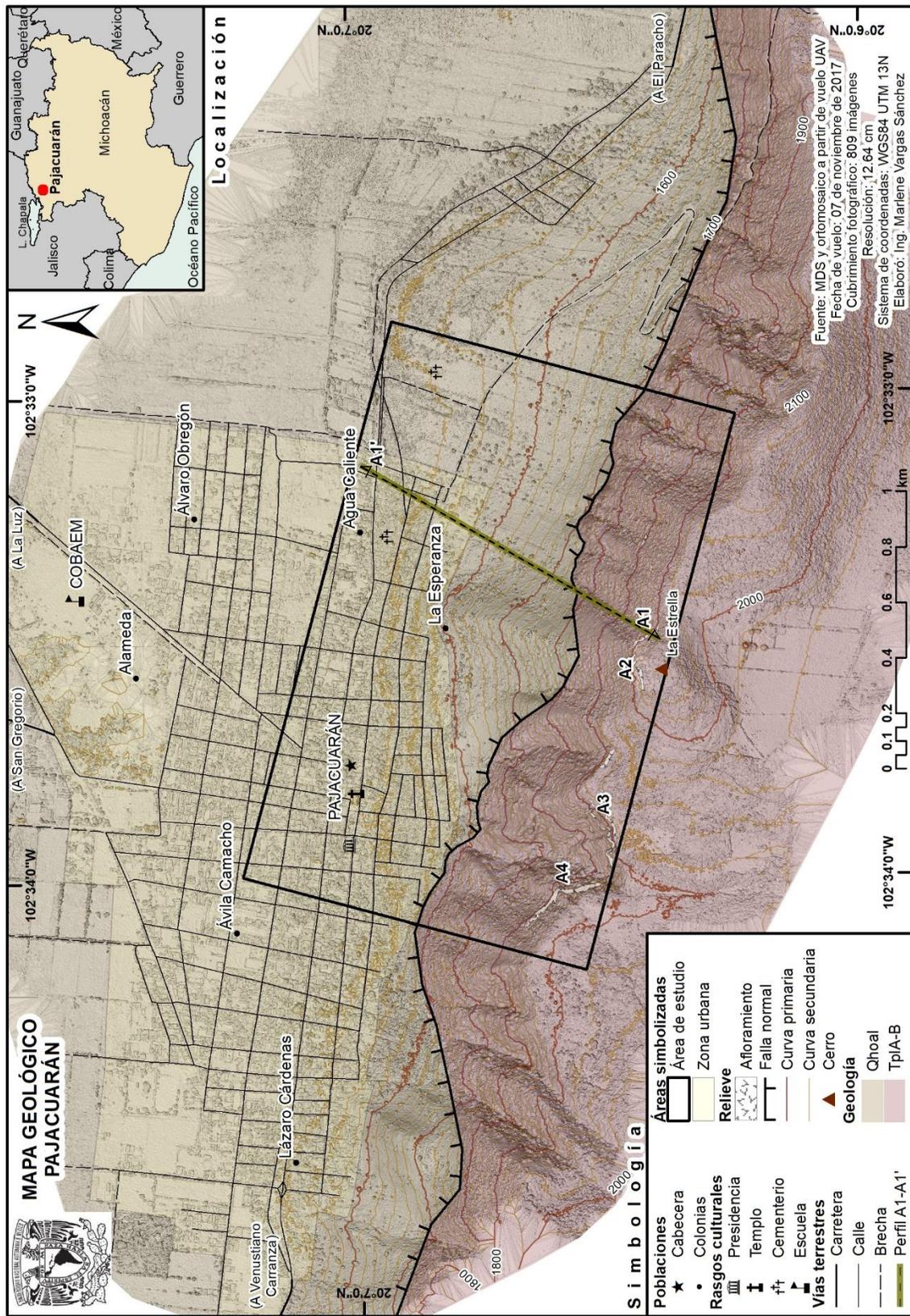
La unidad volcánica Sierra de Pajacuarán, donde se encuentran antiguos escarpes de la falla geológica homónima, presenta orientación regional E-W y consiste de cuatro subunidades volcánicas, definidas por Camacho-Pérez (2015): Venustiano Carranza, Pajacuarán, El Cometa y Cerro El Grande. La zona de estudio pertenece a las subunidades volcánicas Pajacuarán y El Cometa, descritas a continuación.

**Venustiano Carranza.** La subunidad consiste de nueve aparatos volcánicos de carácter monogenético y con diferentes etapas de crecimiento; están orientados E-W y N-S, y sus alturas varían entre 150 a 165 m. En la porción sur de la subunidad, los aparatos lávicos presentan derrames de lavas bien desarrolladas. La parte norte la conforman aparatos volcánicos de relieve erosionado, afectados por la falla Pajacuarán. Además, al oeste de la localidad de Pajacuarán se encuentra un pequeño cono cinerítico aislado. Según muestras tomadas de la zona por Camacho-Pérez (2015), los aparatos consisten de alternancias de flujos de lavas con escorias de composición basáltica y andesitas-basálticas.

**Pajacuarán.** La subunidad se caracteriza por tener tres aparatos volcánicos: uno de carácter poligenético, un cono parásito y un derrame fisural. El cerro El Muerto constituye el edificio volcánico principal. Es un volcán en escudo, el cual está orientado E-W y presenta altura de 740 m. Está formado por capas sucesivas de erupciones basálticas fluidas, presentando fracturamiento y estructuras en rompecabezas en las lavas al pie del volcán en la vertiente noroeste. Dos conos parásitos yacen en el cerro El Muerto, en la cima y en la ladera sureste. El volcán de la cima es cortado por la falla Pajacuarán con dirección E-W. De este aparato Camacho-Pérez (2015) tomó muestras de rocas andesíticas. La zona sur del cerro se encuentra afectada por otra falla normal con la misma orientación que la de Pajacuarán. Esta última atravesó el edificio antes del derrame fisural en el sector sureste. El cerro El Muerto y los derrames fisurales consisten de intercalaciones de lavas de composición andesita-basáltica.

**El Cometa.** La subunidad consta de cuatro aparatos volcánicos de carácter monogenético, un domo, y un relieve de montículos o *hummock*. Los volcanes monogenéticos tienen alturas en el rango de 400 a 550 m, y los *hummock* de 50 m, con orientación preferencial E-W. En el sector del norte, los aparatos se observan con relieve erosionado al haber sido afectados por la falla Pajacuarán. Hacia el sur, se encuentra un aparato volcánico fisural aislado. Los *hummock* presentan la misma dirección E-W que la falla de Pajacuarán. Según Camacho-Pérez (2015), estas estructuras posiblemente se formaron por el colapso o deslizamiento de las laderas de los edificios volcánicos de la zona norte, ocasionado por el desplazamiento de la falla geológica. Esta subunidad consiste de alternancias de derrames de lavas con escorias de composición andesítica y andesita-basáltica.

**Cerro El Grande.** La subunidad se conforma de un volcán en escudo, llamado cerro El Grande de Tecomatán. Es de carácter poligenético y yacen a su alrededor siete aparatos volcánicos menores. Tienen alturas entre 90 a 690 m, orientación E-W, y son cortados por la falla Pajacuarán, así como fallas menores con orientación NW-SE. Camacho-Pérez (2015) señala que el cerro El Grande presenta dos cicatrices de deslizamiento en herradura orientados al noroeste. Los volcanes de esta subunidad tienen alternancias de derrames de lava con escorias de composición andesita-basáltica y basáltica.



**Figura 5.8** Mapa geológico de una porción de la falla y mancha urbana de Pajacuarán. La línea punteada (en verde) indica el corte geológico A1-A1'. Fuente: información geológica modificada de Rosas-Eiguera et al., 2000. Carta Geológica-Minera Guadaluajara F13-12, escala 1 : 250,000.

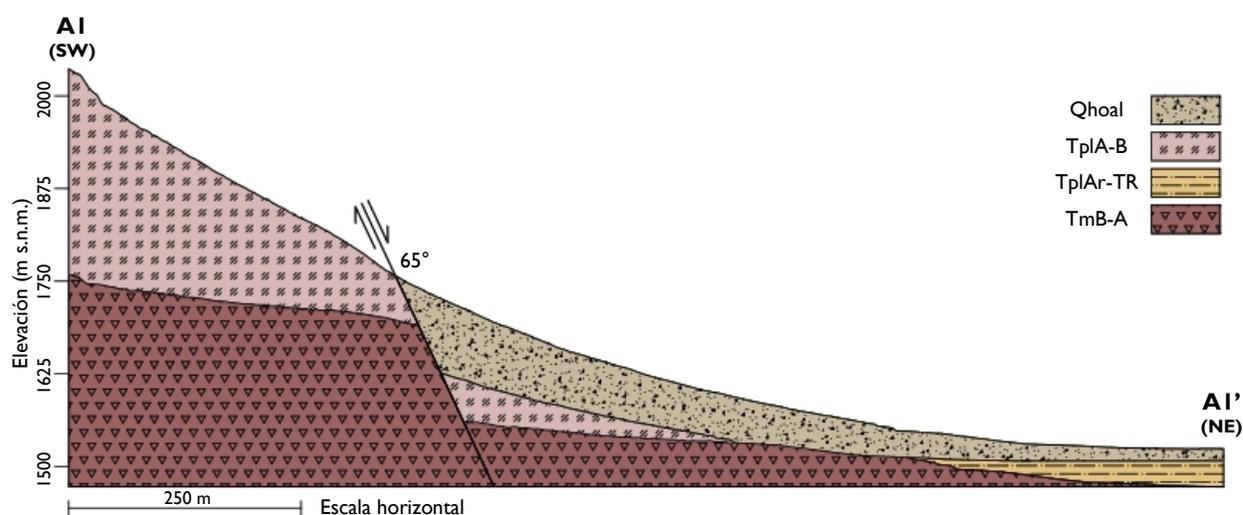
### 5.2.5.2 Relaciones estratigráficas

De acuerdo con Camacho-Pérez (2015), las rocas de la unidad volcánica Sierra de Pajacuarán pueden agruparse del Plioceno tardío al Plio-Pleistoceno por relaciones estratigráficas con Ixtlán de los Hervores y la zona volcánica del lago de Chapala. Particularmente, la unidad se asocia con rocas del Plioceno tardío como andesitas, andesitas-basálticas, depósitos lacustres (por ejemplo, areniscas, limolitas, diatomitas), y depósitos piroclásticos, así como con conos cineríticos, andesitas y basaltos del Plio-Pleistoceno reportados por Rosas-Elguera (1981), Urrutia-Fucugauchi y Rosas-Elguera (1994), y Gómez-Tuena *et al.* (2005).

### 5.2.6 Litología de Pajacuarán

El evento de caída de rocas de noviembre de 2013 ocurrió en un escarpe (afloramiento A1) de más de 30 m de altura, que se encuentra a aproximadamente 440 m sobre el nivel de la localidad de Pajacuarán y forma parte de la corona del cerro La Estrella. Esta abrupta morfología es el resultado de los efectos de la falla geológica de Pajacuarán (Fig. 5.9).

Observaciones realizadas en el área de estudio permitieron distinguir tres zonas activas y describir la ladera susceptible a la caída de rocas. La corona de la ladera se caracteriza por sus prominentes escarpes. Siguen el lomo y pie de la ladera, zonas de tránsito y acumulación de depósitos coluviales. Finalmente, sobre una gran planicie lacustre, se asienta la mancha urbana de Pajacuarán. A continuación, se describe cada zona y se pueden consultar detalles en el *Apéndice 1*.



**Figura 5.9** Perfil geológico A1-A1' de la falla Pajacuarán: (Qhoal) sedimentos lacustres y depósitos superficiales (Cuaternario); (TplA-B) lavas andesitas-basálticas, escorias y brechas volcánicas (Plioceno tardío a medio); (TplAr-TR) sedimentos lacustres arenisca-toba riolítica (Mioceno tardío-Plioceno); y (TmB-A) rocas volcánicas del Plioceno y del Mioceno. Fuente: información tomada de Garduño-Monroy *et al.*, 1993; Rosas-Elguera *et al.*, 2000; SGM, 2008.

### 5.2.6.1 Corona de la ladera

Está conformada principalmente por una alternancia de flujos de lava de composición andesita-basáltica y brecha volcánica, relacionados con la actividad volcánica del Plioceno-Cuaternario. Los bloques son grandes y subangulares con diámetros entre 1 a 5 m. Presentan un acomodo aleatorio y, además, varios de ellos se posicionan en cantiléver, siendo estos los más susceptibles a desprendimiento. En seguida, se describen, de abajo hacia arriba, las principales unidades que conforman el perfil litológico de la corona de la ladera con base a observaciones de campo.

**Paleosuelo.** Tiene más de 1 m de espesor y está conformado por arcilla-limosa consolidada de color rojo con estructura granular y presencia de bloques aislados de roca redondeada. Los fragmentos son líticos vesiculados y subangulares con diámetro de 0.20 a 0.40 m. En la base del paleosuelo se encuentran fragmentos de roca de composición andesita-basáltica con diámetro de 1 a 2 m (Fig. 5.10a). Cabe mencionar, el proceso de erosión diferencial entre el paleosuelo y los flujos de lava deja como resultado en el estrato superior, bloques en cantiléver susceptibles a desprendimiento (Fig. 5.10b).



**Figura 5.10** Litología de la zona de desprendimiento: (a) paleosuelo en la porción inferior de la corona de la ladera; y (b) erosión diferencial entre el paleosuelo y flujos de lava. Fotografías: capturadas en septiembre, 2017.

**Flujos de lava y brecha volcánica.** Arriba el paleosuelo, la porción superior del escarpe tiene más de 30 m de espesor y presenta fragmentos subangulares – de color gris claro al fresco y amarillento-anaranjado al intemperismo – de flujos de lava de composición andesita-basáltica y brecha volcánica con diámetros entre 1 a 5 m (Fig. 5.11a), así como ocasionales zonas enriquecidas con matriz de cenizas y bloques de escoria. La porción inferior de esta unidad forma parte de un flujo de lava moderadamente fracturado.

Debido a su orientación, la corona de la ladera por lo regular no recibe rayos solares, lo que provoca que la humedad prevalezca en esa zona, y favorezca la meteorización y presencia de vegetación (Fig. 5.11b). Estos factores detonantes pueden influir directamente en el desprendimiento de un bloque de roca en el escarpe de la falla Pajacuarán.



**Figura 5.11** Litología de la zona de desprendimiento: (a) porción superior de la ladera compuesta por flujos de lava y brecha volcánica; y (b) vegetación y superficie de falla en forma de cuña en la cima del macizo rocoso. Fotografías: capturadas en septiembre, 2017.

### 5.2.6.2 Lomo y pie de la ladera

A lo largo de la ladera se observan variaciones en la litología debido al tránsito y acumulación de depósitos coluviales. En general, se distinguen fragmentos subangulares de flujos de lava de composición andesita-basáltica de diámetros entre 0.10 y 1 m, inmersos en una matriz limo-arcillosa oscura, suave y rica en materia orgánica (Fig. 5.12a). Esporádicamente, se encuentran bloques de andesita-basáltica mayores a 2 m (Fig. 5.12b), incluyendo fragmentos de brecha volcánica y escoria, que corresponden a la litología de la corona de la ladera.



**Figura 5.12** Litología de las zonas de tránsito y acumulación: (a) fragmentos de flujos de lava y brecha volcánica al pie de la ladera; y (b) bloque mayor a 2 m de diámetro ubicado en el lomo de la ladera. Fotografías: capturadas en julio, 2018.

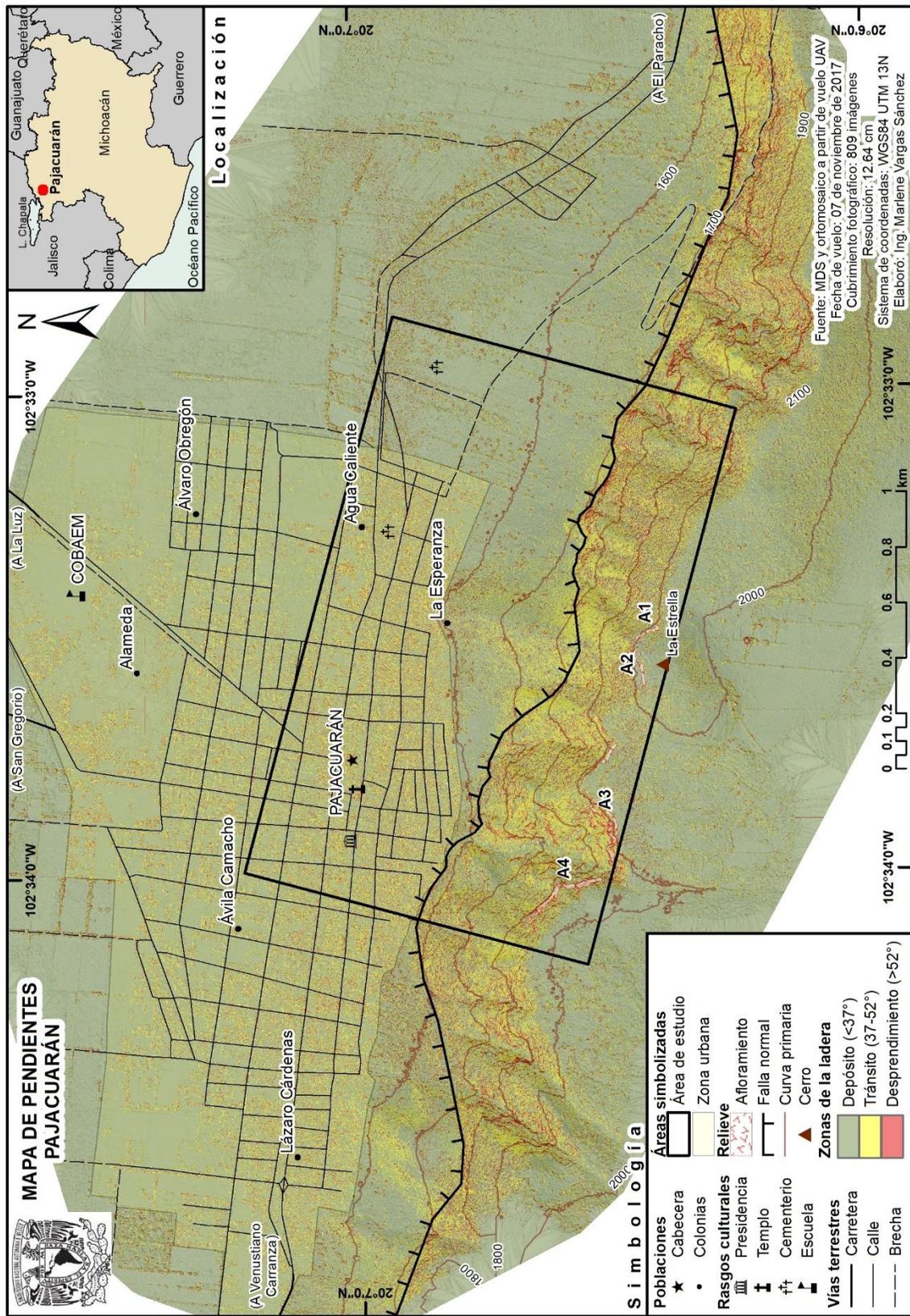
### 5.2.6.3 Planicie lacustre

La mancha urbana de la localidad de Pajacuarán continúa en crecimiento sobre la ladera, a pesar de la eminente peligrosidad por caída de rocas (Fig. 5.13a). Se desarrolla sobre una planicie lacustre ubicada al pie de la falla geológica. En esta zona de depósito se pueden encontrar grandes bloques que provienen de las zonas anteriormente descritas (Fig. 5.13b): fragmentos subangulares de flujos de lava de composición andesita-basáltica, brecha volcánica y escoria.



**Figura 5.13** Litología de la zona de depósito: (a) la mancha urbana de Pajacuarán se desarrolla sobre la ladera y zona de depósito de bloques; y (b) bloque mayor a 2 m de diámetro ubicado al pie de la ladera. Fotografías: capturadas en julio, 2018.

Las zonas activas de la ladera susceptible a la caída de rocas – zona de desprendimiento (mayor a  $52^\circ$ ), de tránsito (de  $37$  a  $52^\circ$ ) y de depósito (menor a  $37^\circ$ ) de bloques (Dorren y Seijmonsbergen, 2003; Frattini *et al.*, 2008; Troisi *et al.*, 2008; Dorren *et al.*, 2011; Wyllie, 2015) – se ilustran en el siguiente mapa temático (Fig. 5.14). El mapa de pendientes representa los diferentes grados de inclinación del territorio y mejora la percepción de la morfología del territorio, revelando las irregularidades del terreno, accidentes geográficos e infraestructura.



**Figura 5.14** Mapa de pendientes y zonas activas de la ladera susceptible a la caída de rocas de una porción de la falla y mancha urbana de Pajacuarán. Fuente: información topográfica modificada de INEGI, 2002. Carta Topográfica Pajacuarán F13D88, escala 1 : 50,000.

### 5.3 CLIMATOLOGÍA

Según la clasificación de Köppen modificada por García (1988), el clima del municipio de Pajacuarán (INEGI, 2009) se describe como semicálido subhúmedo (A)C(w<sub>1</sub>) en la planicie lacustre (correspondiente al 86.87% de su extensión superficial) y templado subhúmedo C(w<sub>1</sub>) en la sierra (13.13%).

En general, es caliente durante todo el año, la temporada de lluvia es nublada y la seca es parcialmente nublada. La temperatura oscila de 7 a 32°C, siendo la temperatura media anual de 19°C. Rara vez baja a menos de 3 °C o sube a más de 35 °C (Diebel *et al.*, 2016).

La temporada calurosa dura 2 meses – de abril a junio – siendo mayo el más caluroso del año. La temperatura mínima y máxima promedio varía de 15 a 32°C, respectivamente, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 30 °C. La temporada fresca dura 2.4 meses – de finales de noviembre a febrero – siendo enero el más frío del año. La temperatura mínima y máxima promedio varía de 7 a 24°C, respectivamente, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 26 °C (Diebel *et al.*, 2016).

El promedio del porcentaje del cielo cubierto con nubes varía extremadamente durante el transcurso del año. La época más despejada comienza a finales de octubre y termina en junio, con duración de 7.5 meses y cielo despejado el 64 % del tiempo. La temporada más nublada comienza a principios de junio y termina en octubre, con duración de 4.5 meses y cielo nublado el 12 % del tiempo.

La temporada de lluvia dura casi 9 meses – de mayo a febrero (Diebel *et al.*, 2016). La mayoría de la lluvia cae durante el mes de julio, con una acumulación total promedio de 152 mm. El periodo del año sin lluvia dura 3 meses – de febrero a mayo – siendo abril el de menor cantidad de lluvia, con una acumulación total promedio de 2 mm.

El nivel de humedad percibido en Pajacuarán, medido por el porcentaje de tiempo en el cual el nivel de comodidad de humedad es bochornoso, opresivo o insoportable, no varía considerablemente durante el año, y permanece prácticamente constante en 0%.

La puntuación de turismo favorece los días despejados y sin lluvia con temperaturas percibidas entre 18 y 27°C (Diebel *et al.*, 2016). La mejor época del año para visitar Pajacuarán para actividades turísticas a la intemperie es de abril a junio, con una puntuación máxima en la segunda semana de mayo.

## 5.4 HIDROGRAFÍA

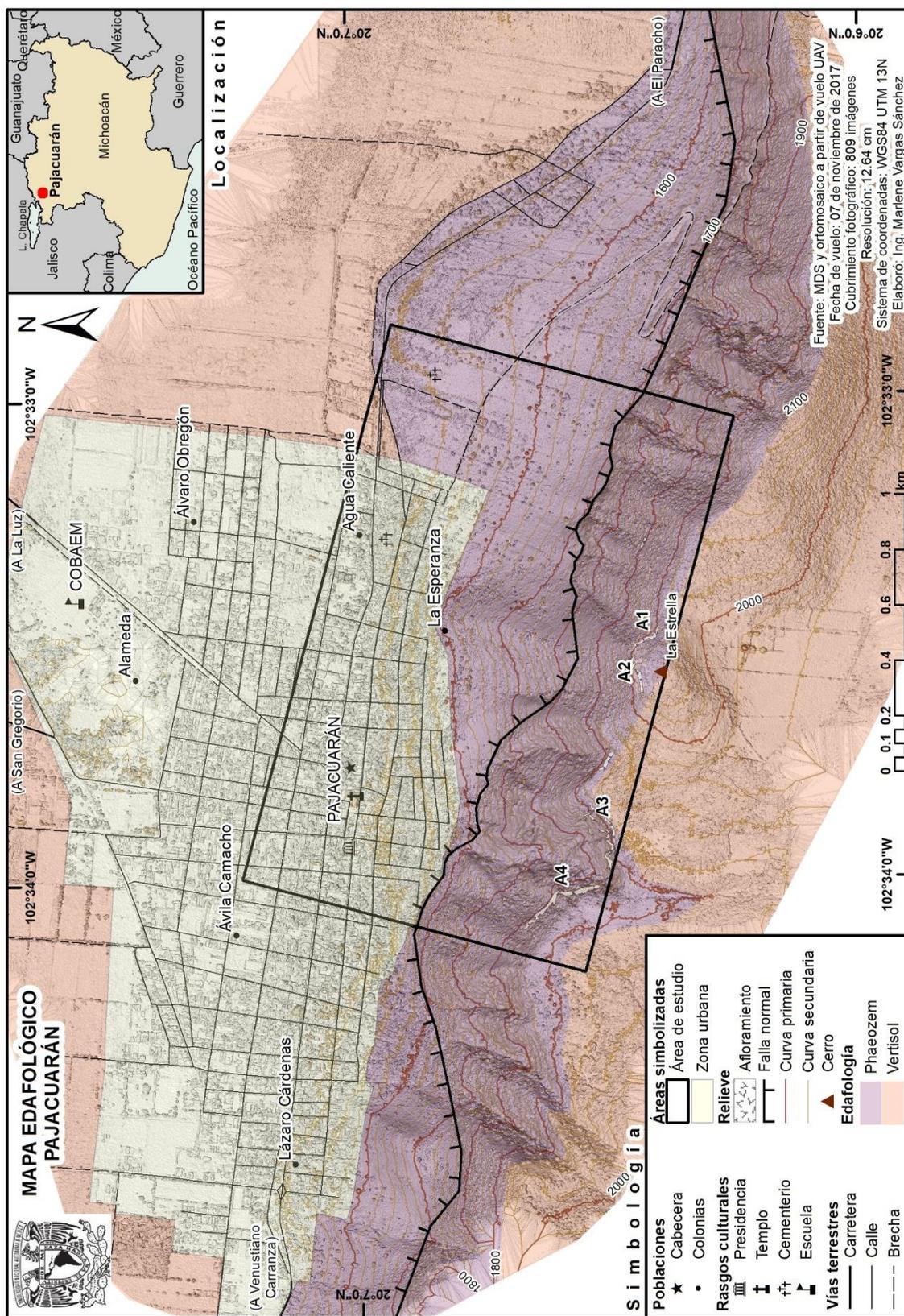
El municipio de Pajacuarán se localiza dentro de la región hidrológica Lerma-Santiago, la más grande del país, y en las cuencas Río Lerma-Chapala (correspondiente al 90.71% de su extensión superficial) y Lago Chapala (9.29%). Las corrientes más importantes en la zona son principalmente barranca de Paracho, barranca de los Huesos y barranca de Pajacuarán. También cuenta con manantiales de aguas termales como Agua Caliente y Ojo de Agua, así como las presas del Cometa, Fray Domínguez y Paracho (INAFED, *s.f.*; INEGI, 2009).

## 5.5 EDAFOLOGÍA

En Pajacuarán abundan rocas volcánicas de composición básica al igual que sedimentos lacustres y depósitos coluviales, por lo que los suelos son desarrollados y contienen un alto porcentaje de arcillas. Los suelos expuestos son esencialmente de tipo Vertisol y Phaeozem (INEGI, 2013; 2017; Fig. 5.15).

El Vertisol ocupa el 77.79% de la extensión superficial del municipio de Pajacuarán. Se localiza tanto en la planicie lacustre, como en la zona de lomerío y sierras. Es un suelo de color oscuro regularmente negro, gris o rojo, que se distingue por presentar grietas de desecación en época de sequía debido a su alta proporción de arcillas expansibles. Está asociado a materiales volcánicos y es muy duro, masivo y poco susceptible a la erosión. El desarrollo del perfil es de tipo A-B-C (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

Los suelos de la ladera donde se sitúa la falla Pajacuarán son principalmente Phaeozem y ocupan un 18.11% de la superficie del municipio. Los Phaeozem son suelos intensamente lixiviados y, consecuentemente, tienen un horizonte superficial oscuro, suave y rico en materia orgánica. Son suelos porosos, fértiles y su susceptibilidad a la erosión es muy variable. El desarrollo del perfil es de tipo Ah-B-C (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).



**Figura 5.15** Mapa edafológico de una porción de la falla y mancha urbana de Pajacuarán. Fuente: información edafológica modificada de INEGI, 2013. Carta Edafológica Guadaluajara F13-12, escala 1: 250,000.

## 5.6 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

En el año 2009, la mancha urbana del municipio de Pajacuarán cubría tan sólo el 3.28% de la superficie del municipio (INEGI, 2009; 2015). Sin embargo, en los últimos años esta ha estado creciendo gradualmente a lo largo de la planicie lacustre, y sobre el pie y lomo de la ladera cortada por la falla Pajacuarán (Fig. 5.16). Recientemente, también ha incrementado el cambio de uso de suelo, por lo que, a su vez, la zona urbana se expande sobre terrenos previamente ocupados por agricultura y selvas.

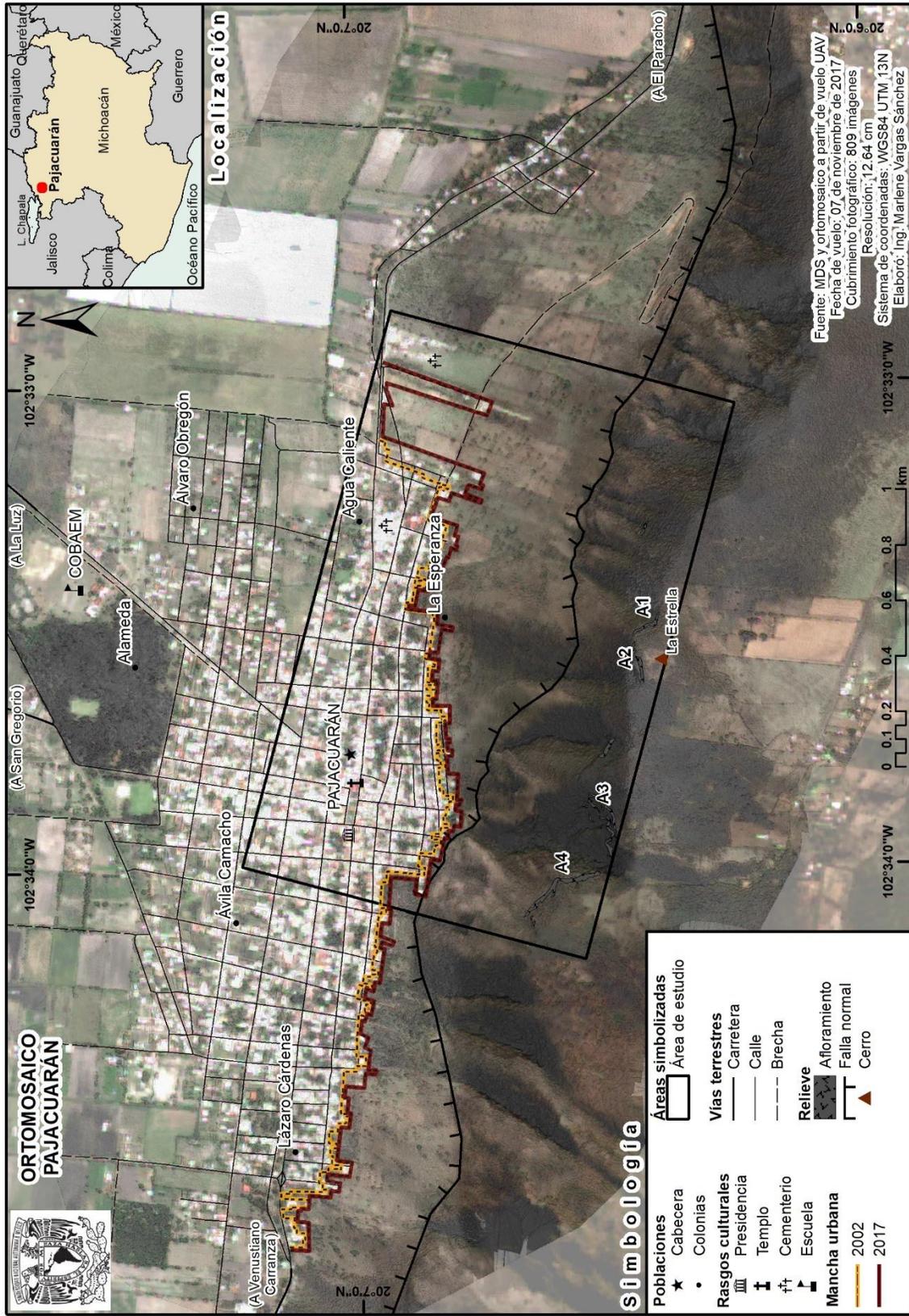
En el municipio de Pajacuarán, la principal actividad económica es la agricultura (corresponde al 73.41%), mayormente de temporal y de riego. Entre los cultivos producto de esta actividad destacan el maíz, sorgo y trigo. En menor medida se practica la ganadería, principalmente de bovinos. También se ha desarrollado industria porcina y avícola.

La vegetación en los ecosistemas del municipio se describe como selva baja caducifolia (18.49% de la superficie municipal), pastizal inducido (3.58%) y bosque de encino (0.42%). En los alrededores se encuentran praderas con nopales, mezquite, guamúchil y huisache. La fauna silvestre está conformada principalmente por tlacuaches, mapaches, patos, coyotes, cacomiztles, armadillos, víboras y zorrillos.

## 5.7 POBLACIÓN

El municipio de Pajacuarán cuenta con 22 localidades, siendo las de mayor población la cabecera homónima, La Luz y San Gregorio. De acuerdo a los resultados del Censo de Población y Vivienda 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), el municipio de Pajacuarán tiene una población total de 19,450 habitantes y densidad de población de 111.74 habitantes por km<sup>2</sup>. En la localidad de Pajacuarán se registraron un total de 10,014 habitantes – 4,838 hombres y 5,176 mujeres – y un total de 3,599 viviendas, 2,382 de ellas habitadas (INEGI, 2010).

Según el XII Censo General de Población y Vivienda 2000 (INEGI, 2000), el municipio contaba con una población total de 19,688 habitantes. En la cabecera municipal se registraron 9,364 habitantes – 4,313 hombres y 5,051 mujeres – y un total de 2,001 viviendas, 1,940 habitadas (INEGI, 2000). En resumen, ha habido un crecimiento demográfico en la localidad de Pajacuarán de 650 habitantes y 1,598 viviendas en un periodo de 10 años (Fig. 5.16).



**Figura 5.16** Ortomosaico de 12.64 cm de resolución. Las líneas indican el margen de la mancha urbana en el año 2002 (en amarillo) y 2017 (en guinda). Fuente: límite de mancha urbana obtenida de Google Earth, 2002; 2017.

## 5.8 ARQUEOLOGÍA

La arqueología de la zona se basa en un inventario patrimonial de la región Ciénega realizado por Ramírez-Sánchez *et al.* (2015). Fue recabado con ayuda de documentos históricos y la participación activa de la sociedad civil.

Se conoce poco de los sitios arqueológicas de la región michoacana que forma parte de la Ciénega de Chapala – Cojumatlán, Sahuayo, Jiquilpan, La Palma, Pajacuarán y Venustiano Carranza – ya que son escasos los trabajos realizados en la zona y los vestigios arqueológicos que se han reportado a lo largo de los años han pasado inadvertidos por las autoridades.

Actualmente, Pajacuarán es una población de la región Lerma-Chapala ubicada en el noroeste del estado de Michoacán. En la zona existió la laguna de Pajacuarán, la cual era alimentada por el río Duero. Los asentamientos Chichimecas se hicieron en una isla de la laguna, que fue habitada posteriormente por los Mexicas y más tarde por los Purépechas. Durante la época de la conquista, el lugar fue sometido por Nuño de Guzmán. Desde un cerro cercano, los exploradores españoles vieron por primera vez la laguna de Chapala.

En 1530, el primer evangelizador en presentarse a la zona fue el fray Juan de Badías, quien llamó al pueblo Paxacuarán, perteneciendo a la parroquia de Ixtlán. En 1789, Pajacuarán cambió a su ubicación actual. El antiguo asentamiento, que era una isla, es ahora un pequeño cerro que se conoce como Pueblo Viejo.

En la parte superior de un cerro de esta localidad se ubica un macizo rocoso que resalta a la vista. En esta zona se encuentran algunos petroglifos en forma de humanos. Los petroglifos son diseños simbólicos grabados en rocas, realizados desgastando la capa superficial. Muchos fueron hechos por los hombres del período Neolítico. Son el más cercano antecedente de los símbolos previos a la escritura. Su uso como forma de comunicación se data hacia el 10,000 a.C. y puede llegar hasta los tiempos modernos en algunas culturas y lugares.

# Modelado numérico

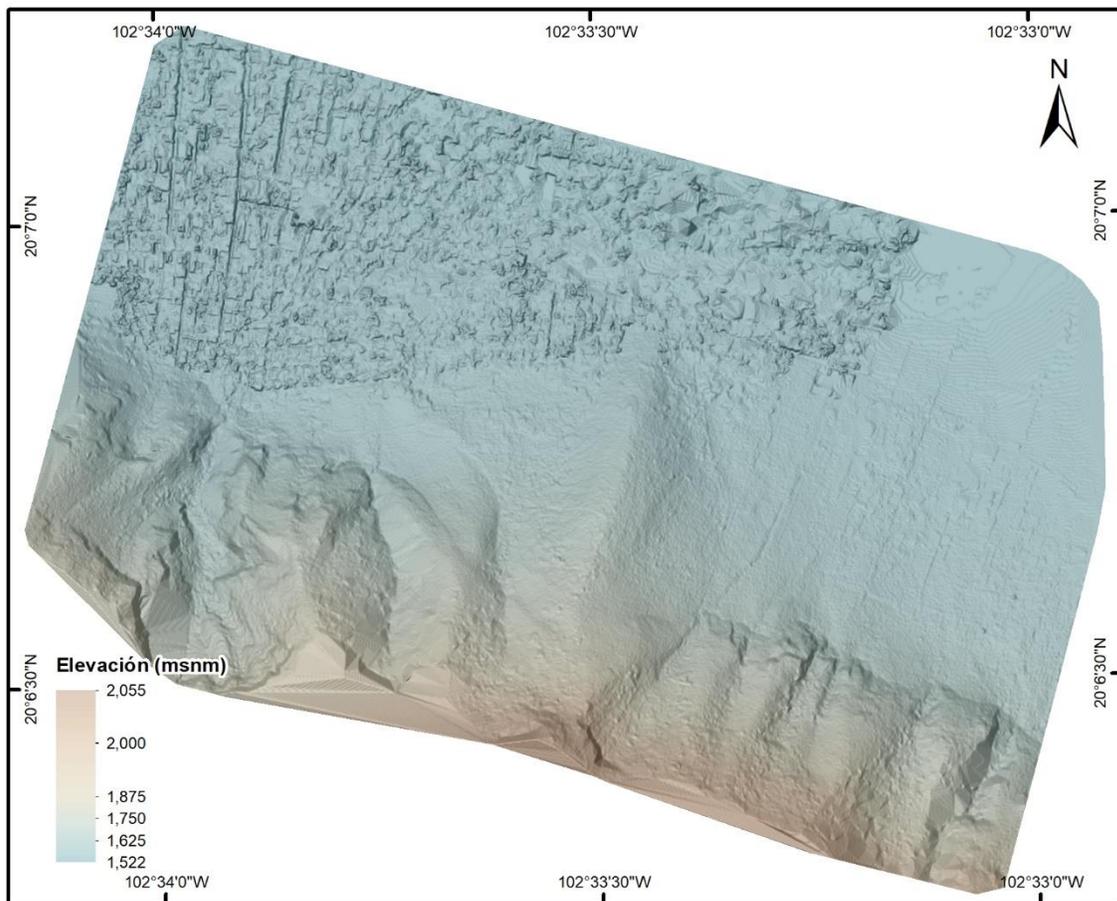
---

En este capítulo se proporciona una síntesis de los resultados obtenidos al aplicar el flujo de trabajo para el estudio de la trayectoria de caída de rocas, resaltando las principales aportaciones del modelo numérico de simulación, *Rockyfor3D* (Dorren, 2016). Entre los productos finales más relevantes tenemos el modelo digital de elevación, datos de campo, parámetros de entrada y salida, y mapa de peligrosidad por caída de rocas.

### 6.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El levantamiento con escáner láser terrestre (TLS) fue la etapa fundamental del trabajo de campo, ya que a través del análisis y procesamiento de las nubes de puntos se obtuvo el modelo digital de elevación (MDE) con el cual, se digitalizaron los datos de entrada requeridos para realizar simulaciones en el modelo *Rockyfor3D*. El MDE resultante tiene 2 m resolución espacial e incluye la porción del escarpe de la falla geológica situada al sureste de la mancha urbana de la localidad de Pajacuarán.

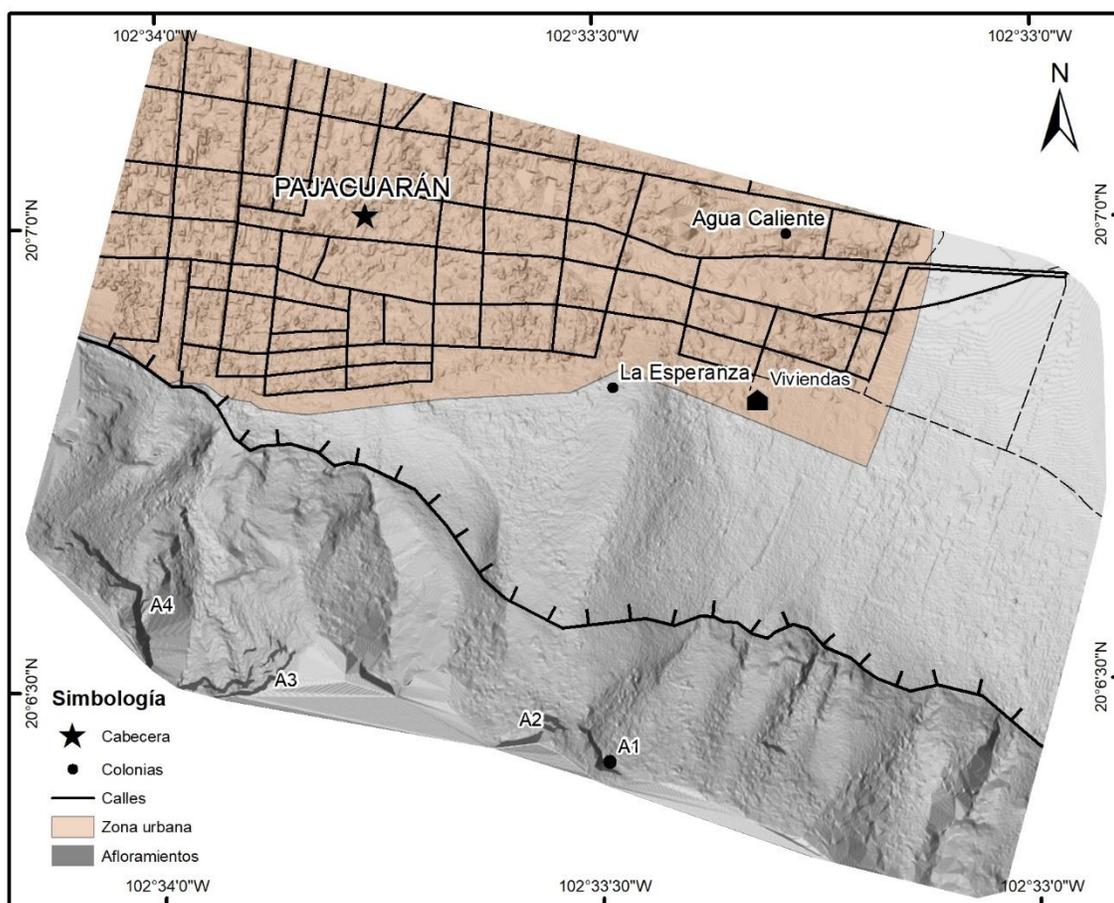
El MDE (Fig. 6.1) es el resultado de la combinación del modelo digital de superficie (MDS) – el cual contempla la elevación de las edificaciones en la zona urbana – y el modelo digital de terreno (MDT) – representativo del relieve abrupto y laderas escarpadas que caracterizan la falla Pajacuarán. La elevación máxima del MDE es de 2,055 m s.n.m. y se presenta en los afloramientos de la corona de la ladera, mientras que la elevación mínima es de 1,522 m s.n.m., al pie de la ladera y en la mancha urbana de Pajacuarán. Dichas elevaciones corresponden a más de 500 m de desnivel.



**Figura 6.1** Modelo digital de elevación de 2 m de resolución. Fecha de escaneo TLS: noviembre, 2017.

## 6.2 DATOS DE CAMPO

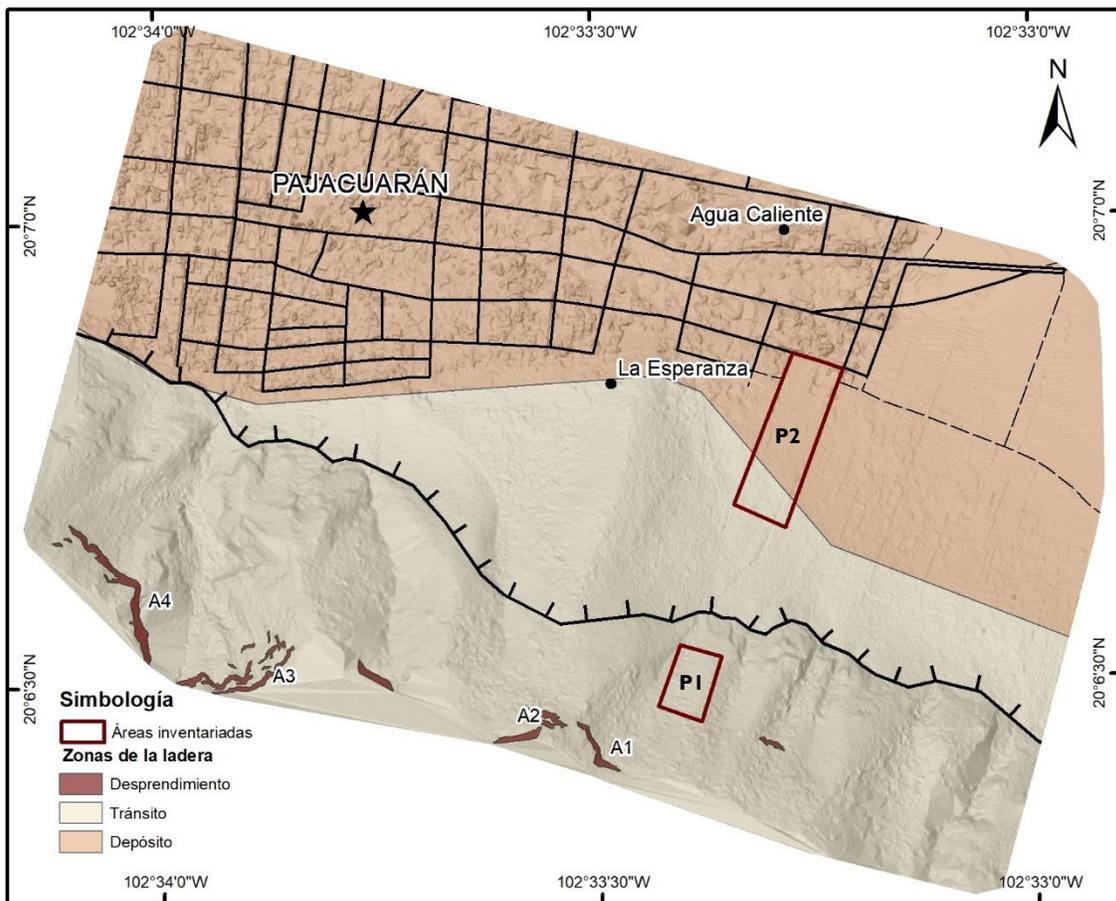
Con el fin de tener una referencia general sobre la magnitud y frecuencia de la caída de rocas en el área de estudio, se investigó la fecha del evento histórico, su ubicación exacta – el punto de inicio y depósito – y el tamaño del bloque desprendido. A través de entrevistas a los habitantes y expertos locales que trabajan en la localidad, así como la revisión de reportes técnicos (CENAPRED, 2014) y noticias de agencias de información (Changoonga, 2013; Noticias en Michoacán, 2013; Quadratín, 2013), se confirmó el evento de caída de rocas que ocurrió el viernes, 8 de noviembre de 2013. Un fragmento de roca, de aproximadamente 2 m de diámetro y peso de 15 a 20 t, se desprendió del cerro La Estrella de la de la sierra de Pajacuarán y destruyó cuatro viviendas de la zona urbana, ubicadas al pie de la ladera (Fig. 6.2).



**Figura 6.2** Ubicación del evento de caída de rocas de noviembre de 2013; los puntos de desprendimiento (A1) y depósito del bloque (viviendas); y principales afloramientos rocosos (A1-A4). Fuente: MDE a partir de TLS. Noviembre, 2017.

Para la recolección de los datos de campo, se delimitó la ladera en tres zonas (Fig. 6.3), según su ángulo de inclinación y comportamiento dinámico de caída (Dorren *et al.*, 2011; Wyllie, 2015): zona de desprendimiento, en los afloramientos de la corona de la ladera, de donde se desprenden los bloques e inician su descenso; zona de tránsito, en el lomo y pie de la ladera; y zona de depósito, en la planicie lacustre y mancha urbana de Pajacuarán. Las zonas de tránsito y depósito se pueden sobreponer, por lo que no existe una delimitación estricta entre estas.

A su vez, las zonas de desprendimiento, tránsito y depósito se subdividieron en polígonos homogéneos, los cuales representan regiones donde los datos de entrada para *Rockyfor3D* (Dorren, 2016) son constantes. Para determinar los parámetros de las rocas en dichos polígonos, se realizó el inventario de dos áreas representativas de la ladera, P1 y P2 (Fig. 6.3).



**Figura 6.3** Áreas inventariadas (polígonos rojos P1-P2) y zonas de la ladera donde ocurre caída de rocas: afloramientos en la parte superior (en guinda); zona de tránsito a lo largo de la ladera (en beige); y zona de depósito en la planicie y mancha urbana (en naranja). Fuente: MDE a partir de TLS. Noviembre, 2017.

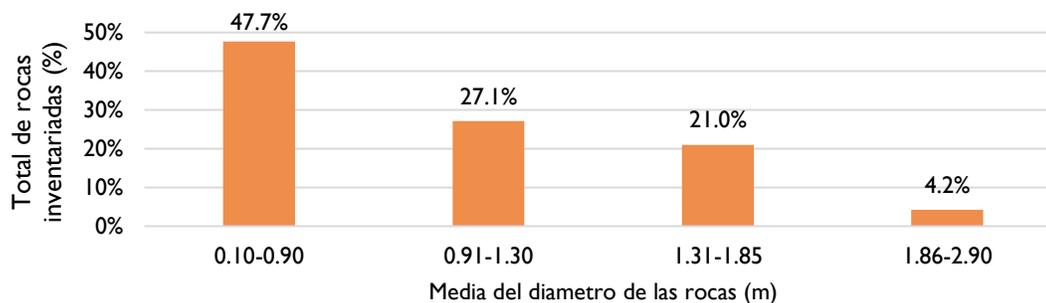
El área P1 mide aproximadamente 120 m de largo por 90 m de ancho, dando una extensión superficial de casi 11,000 m<sup>2</sup>. Mientras que, P2 mide 320 m de largo por 110 m de ancho y tiene una superficie de más de 35,200 m<sup>2</sup>.

El Cuadro 6.1 resume las propiedades de los bloques inventariados en las zonas de tránsito y depósito, que definen el escenario de desprendimiento. Los parámetros  $d1$ ,  $d2$  y  $d3$  representan las dimensiones o los ejes del bloque de menor a mayor, respectivamente. La forma del bloque se define por cuatro categorías: 1, rectangular, 2, elipsoidal, 3, esférico, y 4, disco (Dorren, 2016). La densidad de la roca depende de su litología y estos valores se basan en referencias de la literatura. Según Winkler (1975), Komar (1987), y Singh *et al.* (1987), las rocas de composición andesita-basáltica tienen una densidad de hasta 2,900 kg/m<sup>3</sup>.

**Cuadro 6.1** Resumen de los parámetros de las rocas inventariadas

	d1 (m)	d2 (m)	d3 (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Forma
Mínima	0.70	0.80	0.90	0.50	2900	2 elipsoidal
Media	1.30	1.30	1.30	2.20	2900	2 elipsoidal
Máxima	1.80	1.85	1.85	6.16	2900	2 elipsoidal
Bloques	2.70	2.80	2.90	21.92	2900	2 elipsoidal

Las rocas inventariadas se clasificaron en cuatro tipos según su magnitud y volumen (Fig. 6.4). La clase *Mínima* (0.70 x 0.80 x 0.90 m) representa los fragmentos de roca de baja magnitud (0.50 m<sup>3</sup>), los cuales además tienen la mayor distribución de frecuencias (47.7%) del total de rocas inventariadas. La clase *Media* (1.30 x 1.30 x 1.30 m) corresponde a las rocas de volumen medio (2.20 m<sup>3</sup>) y, en términos de frecuencia, también corresponde a la media (27.1%). La clase *Máxima* (1.80 x 1.85 x 1.85 m) tiene un bajo porcentaje de frecuencia (21.0%), pero aumenta considerablemente el volumen de los fragmentos (6.16 m<sup>3</sup>). Por último, las rocas mayores a 2 m de diámetro corresponden a la clase *Bloques* (2.70 x 2.80 x 2.90 m), tienen el mayor volumen (21.92 m<sup>3</sup>), pero menor distribución de frecuencias (4.2%).

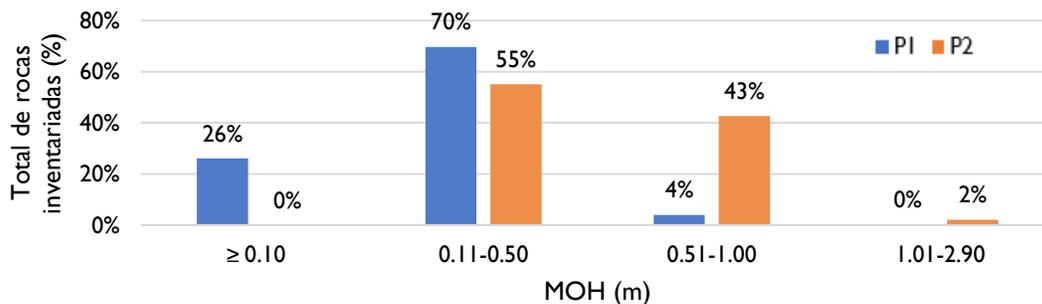
**Figura 6.4** Diagrama de barras que muestra la distribución de frecuencias de la media del diámetro de las rocas inventariadas en las áreas P1 y P2, combinadas.

En las áreas P1 y P2 también se midió la altura media del obstáculo (MOH) para determinar la rugosidad superficial en las zonas de tránsito y depósito de la ladera. El Cuadro 6.2 resume la distribución de frecuencias ( $f_i$ ) y la cantidad de rocas ( $n_i$ ) para la MOH del total de rocas inventariadas. En la medición del MOH únicamente se consideraron los bloques con diámetro  $\geq 0.10$  m, debido a que los bloques de roca con diámetro  $< 0.10$  m se incrustarían en el suelo por el impacto de las rocas de mayor dimensión. Además, la MOH de estas rocas tiene menor efecto en cuanto a la rugosidad de la ladera (Pfeffer y Bowen, 1989; Wyllie, 2015).

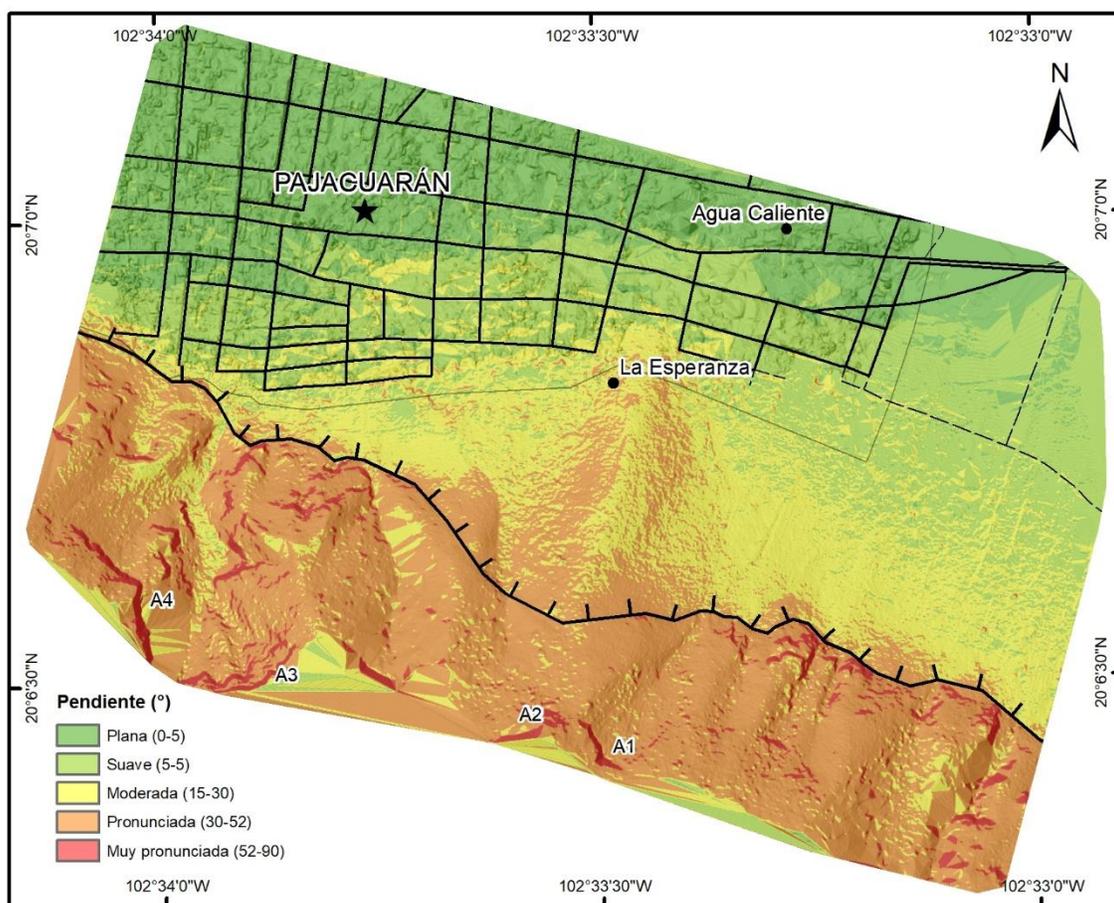
**Cuadro 6.2** Distribución de frecuencias ( $f_i$ ) y cantidad de rocas ( $n_i$ ) para la MOH de las rocas inventariadas

MOH (m)	P1		P2	
	$n_i$	$f_i$ (%)	$n_i$	$f_i$ (%)
$\geq 0.10$	92	26	0	0
0.11 – 0.50	246	70	155	55
0.51 – 1.00	14	4	120	43
1.01 – 2.50	1	0	6	2
Total	353	100	281	100

La Fig. 6.5 representa la distribución de frecuencias de la MOH de las rocas inventariadas en las áreas P1 y P2. Para una MOH  $\geq 0.10$  m, únicamente se registraron datos en el área P1 con una frecuencia de distribución elevada (26.0%). Tanto P1 como P2 tuvieron la mayor cantidad de rocas en el rango de MOH entre 0.11 y 0.50 m, (70.0 y 55.0%, respectivamente). Entre un MOH de 0.51 y 1.00 m, P1 obtuvo la mínima frecuencia (4.0%) y en P2 esta permaneció elevada (43.0%). Por último, para un rango de MOH entre 1.01 y 2.90 m, sólo en P2 se midieron rocas con la mínima frecuencia (2.0%).

**Figura 6.5** Diagrama de barras que muestra la altura media de los obstáculos (MOH) registrada en las áreas P1 y P2, respectivamente.

Por último, se confirmó la delimitación de la zona de desprendimiento, aplicando un umbral al mapa de pendientes derivado del MDE (Dorren y Seijmonsbergen, 2003; Frattini *et al.*, 2008; Troisi *et al.*, 2008). El valor del umbral de pendiente depende de la geología de la zona, así como de la resolución del MDE. En nuestra área de estudio, se consideró un valor de umbral  $> 52.2^\circ$  en el mapa de pendientes derivado del MDE de 2 m de resolución para definir el área susceptible a caída de rocas (Fig. 6.6). Durante el trabajo de campo, se validó dicho umbral del ángulo de pendiente con respecto a la ubicación de los afloramientos principales en la corona de la ladera.

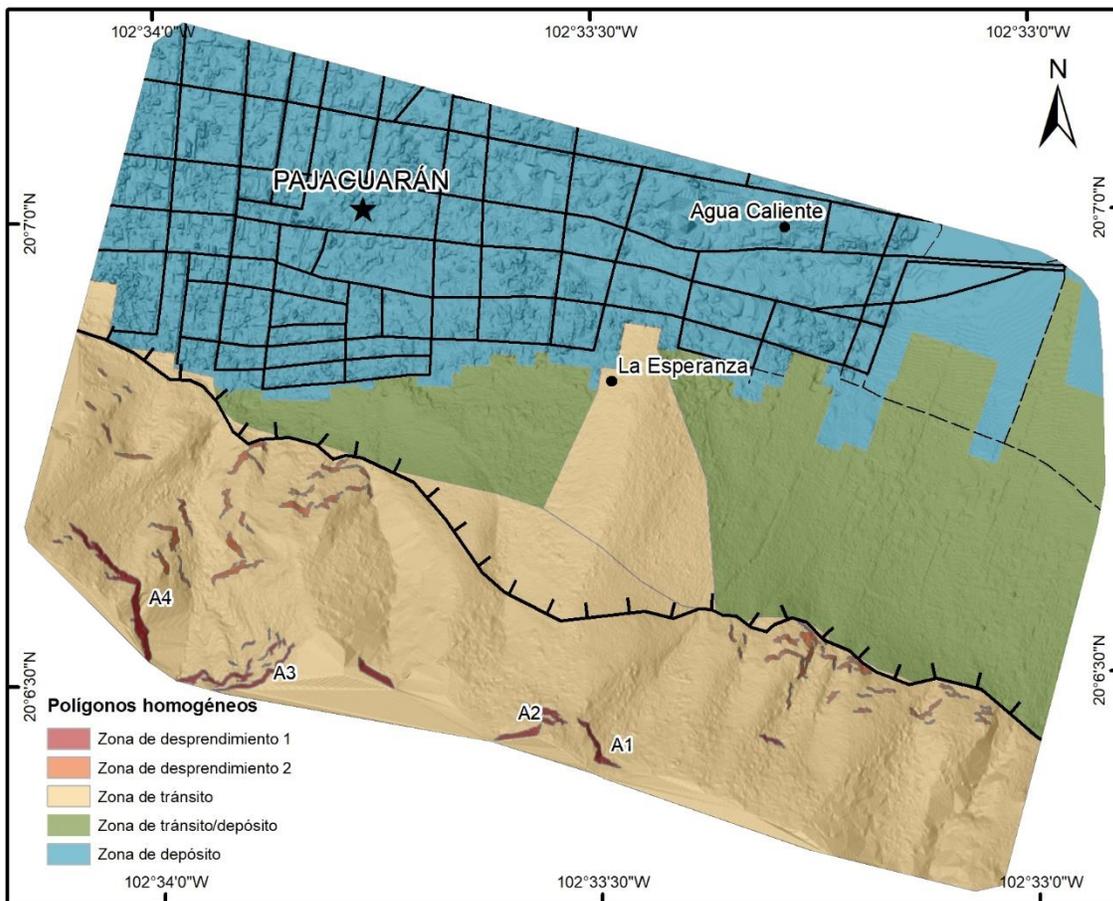


**Figura 6.6** Mapa de pendientes derivado del MDE. Los valores  $> 52.2^\circ$  (en rojo) definen la zona de desprendimiento. Fuente: MDE a partir de TLS. Noviembre, 2017.

### 6.3 DATOS DE ENTRADA

Se empleó el modelo numérico de simulación *Rockyfor3D* (Dorren, 2016) para determinar la trayectoria de caída de rocas en una porción de la falla geológica y mancha urbana de Pajajarán. Los datos de entrada para el software consisten en un conjunto de mapas ráster en formato ASCII – creados a través del programa *ArcMap* (ESRI, 2018) – los cuales definen la topografía, bloques susceptibles a desprendimiento, características de la superficie y cobertura forestal de la ladera.

Como se mencionó anteriormente, las zonas de desprendimiento, tránsito y depósito de la ladera se subdividieron en polígonos homogéneos, se transfirieron los datos registrados en el trabajo de campo a dichos polígonos y, por último, se crearon los mapas ráster. Los polígonos homogéneos de la Fig. 6.7 representan las regiones donde los datos de entrada para *Rockyfor3D* son constantes para cada raster.



**Figura 6.7** Polígonos homogéneos de las zonas de la ladera. Fuente: MDE a partir de TLS. Noviembre, 2017.

Las zonas de desprendimiento definen la ubicación de los afloramientos y, por lo tanto, el área susceptible a caída de rocas. El Cuadro 6.3 desglosa los valores asignados para el escenario de desprendimiento: densidad (*rockdensity*), dimensiones (*d1*, *d2*, *d3*) y forma (*blshape*) de los bloques.

**Cuadro 6.3** Resumen de los datos de entrada para *Rockyfor3D*

Parámetro	Descripción	Datos de entrada
<i>dem</i>	Modelo digital de elevación (resolución entre 1 - 10 m)	MDE de 2 m de resolución a partir de escaneo TLS en noviembre de 2017
<i>rockdensity</i>	Densidad del bloque (kg/m <sup>3</sup> )	2900 kg/m <sup>3</sup> , se asume que es constante para toda la zona de desprendimiento
<i>d1</i> , <i>d2</i> , <i>d3</i>	Dimensiones del bloque (m)	2.70 m, 2.80 m, 2.90 m, respectivamente, a partir de bloques inventariados > 2 m
<i>blshape</i>	Forma del bloque (1 rectangular, 2 elipsoidal, 3 esférico, 4 disco)	2 elipsoidal, tomada a partir de las rocas inventariadas
<i>rg70</i> , <i>rg20</i> , <i>rg10</i>	Rugosidad de la ladera (MOH en m)	Desglosados en el Cuadro 6.4, a partir de áreas inventariadas y Dorren (2016)
<i>soiltype</i>	Tipo de suelo de la ladera (0 - 7)	
<i>nrtrees</i>	Número de tallos por hectárea	Desglosados en el Cuadro 6.5, a partir de áreas inventariadas y Dorren (2016)
<i>dbhmean</i> , <i>dbhstd</i>	Media y desviación estándar de DBH (cm)	
<i>conif_percent</i>	Media de árboles coníferas (%)	

Asimismo, en las zonas de tránsito y depósito se definen las características de la superficie y cobertura forestal de la ladera, obtenidas a partir de las áreas inventariadas del trabajo de campo. El Cuadro 6.4 resume los parámetros de la superficie de la ladera: rugosidad superficial ( $rg70$ ,  $rg20$ ,  $rg10$ ) en relación a la altura media del obstáculo (MOH), y tipo de suelo (*soiltype*) definido de acuerdo a las ocho categorías del Cuadro 3.3 que proporciona el modelo numérico *Rockyfor3D* (Dorren, 2016).

**Cuadro 6.4** Parámetros de la superficie de la ladera en los polígonos homogéneos

Fotografía	Rugosidad (MOH)	Tipo de suelo	Descripción
	$rg70 = 0.05$ $rg20 = 0.1$ $rg10 = 0.3$	6 (macizo rocoso)	Zona de desprendimiento 1; flujos de lava de tipo andesita-basáltica y brecha volcánica, ubicados en la corona de la ladera
	$rg70 = 0.03$ $rg20 = 0.05$ $rg10 = 0.1$	6 (macizo rocoso)	Zona de desprendimiento 2; flujos de lava de tipo andesita-basáltica y brecha volcánica, ubicados en la corona de la ladera

(continuada)

**Cuadro 6.4 (continuada)** Parámetros de la superficie de la ladera en los polígonos homogéneos

Fotografía	Rugosidad (MOH)	Tipo de suelo	Descripción
	rg70 = 0.05 rg20 = 0.05 rg10 = 0.1	5 (macizo rocoso con material grueso erosionado y cubierta de suelo)	Zona de tránsito; ubicada en el lomo de la ladera sobre el bloque de piso de la falla normal y área inventariada P1
	rg70 = 0.05 rg20 = 0.15 rg10 = 0.4	4 (suelo compacto con grandes fragmentos de roca)	Zona de tránsito / depósito; ubicada al pie de la ladera sobre el bloque de techo de la falla normal y área inventariada P2
	rg70 = 0 rg20 = 0 rg10 = 0	7 (carpeta asfáltica y concreto)	Zona de depósito; ubicada al pie de la ladera sobre la planicie lacustre y mancha urbana

Fotografías: capturadas en septiembre y noviembre, 2017.

Por otro lado, el **Cuadro 6.5** describe los datos que definen la cobertura forestal de la ladera: número de árboles por hectárea (*nrtrees*), media y desviación estándar ( $\sigma$ ) del diámetro del tallo a la altura del pecho (DBH; *dbhmean*, *dbhstd*, respectivamente), y porcentaje de árboles coníferas (*conif\_percent*). No se incluyó una columna para el porcentaje de coníferas, ya que en la zona predomina el mezquite, guamúchil y huisache, y, por lo tanto, el valor de este dato fue de cero en el mapa ráster. Las fotografías de ambos cuadros sirven para ejemplificar las propiedades de la superficie y vegetación de la ladera en los polígonos homogéneos (**Fig. 6.7**).

**Cuadro 6.5** Parámetros de la cobertura forestal de la ladera en los polígonos homogéneos

Fotografía	Tallos por ha	DBH (media / $\sigma$ )	Descripción
	50	46 / 16	Zona de tránsito; mayor densidad de la vegetación
	14	46 / 16	Zona de tránsito / depósito; mismas características, pero menor densidad de la vegetación

Fotografías: capturadas en julio, 2018.

Los datos de campo y parámetros de entrada fueron verificados y validados a través de varios métodos. Por ejemplo, las zonas de desprendimiento se definieron al aplicar un valor de umbral  $> 52.2^\circ$  en el mapa de pendientes derivado del MDE (Fig. 6.6; Fig. 6.8; Dorren y Seijmonsbergen, 2003; Frattini *et al.*, 2008; Troisi *et al.*, 2008). Se confirmaron estas áreas susceptibles a caída de rocas durante el trabajo de campo, al ubicar los afloramientos principales en la corona de la ladera.

Las propiedades de las rocas susceptibles a desprendimiento (Cuadro 6.3) se determinaron a través de inventarios, tanto en los afloramientos rocosos, como en las zonas de tránsito y depósito. Las dimensiones de las rocas se establecieron a partir de los bloques inventariados mayores a 2 m de diámetro, que corresponden a la clase *Bloques* (Cuadro 6.1). Se emplearon los fragmentos de roca más grandes, ya que estos tienden a desplazarse a mayores longitudes que los bloques más pequeños y, también, es menos probable que su trayectoria se vea afectada al impactar contra las irregularidades del terreno (Abellán y Vilaplana, 2003). Asimismo, cabe mencionar que el evento de 2013 registrado en Pajacuarán fue de una roca de aproximadamente 2 m de diámetro (Changoonga, 2013; Noticias en Michoacán, 2013; Quadratín, 2013; CENAPRED, 2014). A través de la exploración geológica e inventario de bloques, se determinó la forma de las rocas como subangular o elipsoidal. Y, por último, la densidad de las mismas depende de su litología, por lo que esta se definió de  $2,900 \text{ kg/m}^3$  para andesitas-basálticas, según referencias bibliográficas (Winkler, 1975; Komar, 1987; Singh *et al.*, 1987).

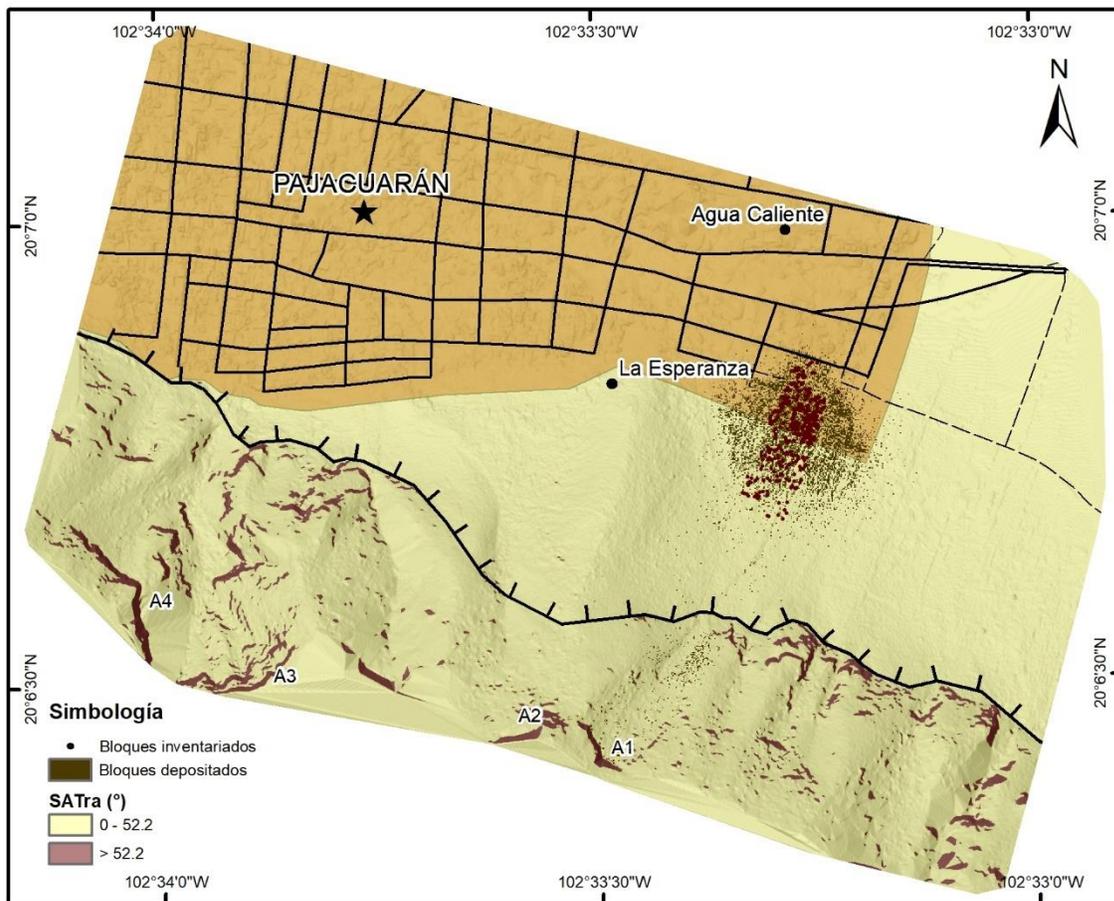
En las zonas de tránsito y depósito se realizaron inventarios para determinar las características de la superficie de la ladera (Cuadro 6.4). A través de los datos de campo, se analizó la distribución de frecuencias de la altura media del obstáculo (MOH) para definir la rugosidad superficial (Cuadro 6.2). A la mancha urbana se le asignaron valores de cero, puesto que ya se había considerado la elevación de las edificaciones en el MDE (Fig. 6.1). Adicionalmente, se compararon y validaron los parámetros obtenidos con respecto a los valores de rugosidad para superficies de ladera similares a nuestro caso de estudio (Sellmeier, 2015; Thanh Vo, 2015; Dorren, 2016; Van Veen *et al.*, 2018). El tipo de subsuelo de la ladera se determinó durante el trabajo de campo de acuerdo a las categorías descritas por Dorren (2016).

---

Comparando los resultados del inventario de rocas para la MOH con la ubicación de las áreas P1 y P2 (Fig. 6.3), se confirma lo siguiente. P1 se sitúa en la zona de tránsito y lomo de la ladera, cerca de la zona de desprendimiento – abajo del afloramiento A1. P2 se encuentra en una zona de transición entre tránsito y depósito de rocas, ubicado al pie de la ladera y aproximándose a la mancha urbana de Pajacuarán. En general, el tipo de suelo que se observó en el área P1 es principalmente macizo rocoso con material grueso erosionado y una cubierta de suelo. En P2 el suelo es compacto con grandes fragmentos de roca. Según los datos de campo, la rugosidad (MOH) de la superficie de la ladera es mayor en el área P2 que en P1 (Cuadro 6.4). Estos resultados sugieren que hay una ligera tendencia espacial en cuanto a la clasificación natural de los bloques a lo largo de la ladera, donde las rocas de menor volumen se acumulan cerca de la porción superior y las de mayor volumen llegan hasta la base, de manera que los fragmentos de roca se agrandan ladera abajo (Statham, 1976; Dorren *et al.*, 2011; Wyllie, 2015).

Con respecto a las propiedades de la cobertura forestal (Cuadro 6.5), la información también fue inventariada y validada durante el trabajo de campo. Se extrapolaron los datos de las áreas inventariadas, P1 y P2, a los polígonos homogéneos (Fig. 6.7), y se aseguró que coincidiera la distribución espacial del bosque a través de su comparación con el ortomosaico y MDS de 12.64 cm de resolución espacial, obtenidos mediante UAV.

La verificación y validación de los datos de entrada concluyó cuando los resultados producidos por el modelo numérico de simulación *Rockyfor3D*, finalmente coincidieron con las posiciones de depósito de los bloques inventariados en el trabajo de campo (Fig. 6.8), y las trayectorias de caída de rocas simuladas correspondieron con la del evento histórico registrado en Pajacuarán en noviembre de 2013 (Volkwein *et al.*, 2011; Clouet *et al.*, 2012; Schober *et al.*, 2012; Corona *et al.*, 2013; Frattini *et al.*, 2012; 2013; Sellmeier, 2015; Mateos *et al.*, 2016; Van Veen *et al.*, 2018).



**Figura 6.8** Mapa ráster de los bloques depositados obtenido de Rockyfor3D (puntos verdes), que coinciden con las posiciones de los bloques inventariados en el campo (puntos guinda). Fuente: MDE a partir de TLS. Noviembre, 2017. Ráster *Nr\_deposited.asc* a partir de Rockyfor3D. Octubre, 2018.

## 6.4 DATOS DE SALIDA

Los resultados obtenidos del modelo numérico *Rockyfor3D* (Dorren, 2016) se guardan en formato ráster ASCII, con la misma extensión y resolución de los datos de entrada. Estos mapas ráster se pueden abrir directamente en la mayoría de los paquetes SIG. El Cuadro 6.6 proporciona una descripción de los datos de salida del modelo.

Para cada simulación, *Rockyfor3D* crea un archivo de registro (Fig. 6.9), llamado *Rockyfor3D\_vx\_x\_logfile\_dd-mm-yyyy\_HHhMM.txt*, que contiene la fecha, hora y configuración de la simulación, volumen general de los bloques de roca y valores generales de energía cinética, así como estadísticas respecto a los ángulos de la línea de energía a partir de las trayectorias simuladas.

```
Rockyfor3D v5.2.6 - Simulations completed on Tue Oct 23 17:01:53 2018

simulation started on Tue Oct 23 16:43:13 2018

simulation settings:
- rock volume variation = +/- 50
- nr. of simulations per source cell = 100
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 737600
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation with forest and without nets

Overall simulated block volumes:
- min = 7.200000 m3
- mean = 13.900000 m3
- max = 17.200000 m3

Overall simulated energy values:
- maximum of the mean energy values = 72078.100000 kj
- maximum energy value = 116019.900000 kj

Statistics on Energy Line Angles recalculated from simulated trajectories:
EL_angle[°] frequency[-] frequency[%]
```

**Figura 6.9** Recorte del archivo de registro de la simulación en *Rockyfor3D* realizado en octubre de 2018 con nombre *Rockyfor3D\_v5.2.6\_logfile\_23-10-2018\_17h01.txt*.

El archivo de registro indica que el modelo simuló la caída de rocas con bloques de 7.20 a 17.20 m<sup>3</sup>, de acuerdo a una variación de volumen del 50%. Se configuró el modelo para realizar 100 simulaciones de caída de rocas por cada celda de inicio, dando un número total de 737,600 simulaciones. La media de los valores máximos de energía cinética dio más de 72,000 kJ al ejecutar *Rockyfor3D* considerando el efecto de la cobertura forestal.

**Cuadro 6.6** Datos de salida del modelo numérico de simulación *Rockyfor3D*

Nombre	Descripción
<i>E_mean.asc</i>	Media de los valores máximos de energía cinética (kJ) de los bloques simulados considerando el movimiento de traslación y rotación en una celda dada
<i>E_50.asc</i> <i>E_90.asc</i> <i>E_95.asc</i> <i>E_98.asc</i> <i>E_99.asc</i>	Representan la mediana, el percentil 90, 95, 98 y 99, respectivamente, de la energía simulada por celda
<i>E_95CI.asc*</i>	Intervalo de confianza (CI) del 95% de todos los valores máximos de energía cinética (kJ) registrados en cada celda, calculado por la expresión: $E_{95CI} = (E_{mean} + 2) \cdot \sigma$ Donde, $\sigma$ representa la desviación estándar de los valores máximos en una celda, suponiendo una distribución normal
<i>Ph_mean.asc</i>	Media de la altura máxima de salto (m) del centro de gravedad de los bloques que pasaron a través de una celda dada, medida en dirección normal a la superficie de la ladera
<i>Ph_50.asc</i> <i>Ph_90.asc</i> <i>Ph_95.asc</i> <i>Ph_98.asc</i> <i>Ph_99.asc</i>	Representan la mediana, el percentil 90, 95, 98 y 99, respectivamente, de la altura de salto (del centro de gravedad del bloque, medido en dirección normal a la superficie de la ladera) simulada por celda
<i>Ph_95CI.asc*</i>	Intervalo de confianza (CI) del 95% de todos los valores máximos de altura de salto (m) registrados en cada celda y medidos en dirección normal a la superficie de la ladera, calculado por la expresión: $Ph_{95CI} = (Ph_{mean} + 2) \cdot \sigma$ Donde, $\sigma$ representa la desviación estándar de los valores máximos en una celda, suponiendo una distribución normal
<i>Nr_passages.asc*</i>	Número de bloques que pasaron a través de cada celda
<i>Nr_sourcecells.asc</i>	Número de celdas fuente que "alimentan" a una celda dada. Es decir, para cada celda, de cuántas celdas diferentes llegaron los bloques a esa celda dada
<i>Reach_probability.asc*</i>	Muestra si es probable (valores más altos en el mapa) o improbable (valores más bajos en el mapa, > 0) que una roca llegue a una celda dada, y la probabilidad (%) se calcula por la expresión: $Reach\_probability = \frac{Nr\_passages \cdot 100}{Nr\_simulations\_per\_source\_cell \cdot Nr\_sourcecells}$ Donde, <i>Nr_simulations_per_source_cell</i> es el número de simulaciones por celda fuente
<i>Propag_probability.asc</i>	Muestra la probabilidad de ocurrencia espacial (%), calculada por la expresión: $Propag\_probability = \frac{Nr\_passages \cdot 100}{Total\_Nr\_simulations}$ Donde, <i>Total_Nr_simulations</i> es el número total de simulaciones por celda de inicio
<i>Nr_deposited.asc*</i>	Número de bloques depositados en cada celda
<i>Rvol_deposit.asc*</i>	Volumen máximo de bloque (m <sup>3</sup> ) depositado en cada celda
<i>EL_angles.asc</i>	Ráster con la mínima cantidad de cálculos del ángulo de la línea de energía (°) por cada celda. El ángulo de la línea de energía es la inclinación de la línea entre la posición de desprendimiento de un bloque y su posición de depósito en la ladera.
<i>Traj_time.asc*</i>	Tiempo mínimo (s) que requiere un bloque para alcanzar una celda dada desde las zonas de desprendimiento definidas
<i>V_max.asc*</i>	Velocidad máxima absoluta (m/s) simulada por celda
<i>Tree_impact_heights.asc</i>	Altura máxima de impacto contra árbol (m) por celda
<i>Nr_tree_impacts.asc*</i>	Número de impactos contra árbol por celda

(\*) indican los ráster para los cuales se muestra mapa a continuación. Fuente: información tomada de Dorren, 2016.

Los ráster *E\_95CI.asc* (Fig. 6.10) y *Ph\_95CI.asc* (Fig. 6.11) muestran los valores máximos de energía cinética (kJ) y altura de salto (m), respectivamente. Dorren (2016) recomienda utilizar el percentil 95 de los valores de energía cinética y altura de salto para proponer la resistencia y dimensiones de las obras estructurales de protección para la caída de rocas.

El ráster *V\_max.asc* (Fig. 6.12) representa la velocidad máxima absoluta (m/s) simulada por celda, y también se puede emplear para el dimensionamiento de las medidas de mitigación por caída de rocas. Sin embargo, este ráster debe utilizarse con precaución (Dorren, 2016), ya que el modelo no proporciona más información sobre la distribución estadística de las velocidades del bloque de roca desprendido.

Los siguientes ráster también son útiles para conocer la magnitud asociada a la caída de rocas. El ráster *Traj\_time.asc* (Fig. 6.13) indica el tiempo mínimo (s) necesario para que un bloque finalice su trayectoria por la ladera, desde las celdas de inicio o zonas de desprendimiento definidas. El ráster *Rvol\_deposit.asc* (Fig. 6.14) muestra los volúmenes máximos de los bloques de roca (m<sup>3</sup>) depositados en cada celda.

El ráster *Nr\_deposited.asc* (Fig. 6.15) muestra la distribución espacial del número de bloques depositados al finalizar su trayectoria sobre la ladera. Asimismo, la trayectoria de caída de rocas se puede visualizar a partir del ráster *Nr\_passages.asc* (Fig. 6.16), el cual indica el número de bloques que pasaron a través de cada celda.

La probabilidad de alcance por caída de rocas se obtiene a partir del ráster *Reach\_probability.asc* (Fig. 6.17). Según Dorren (2016), cuando se ejecutan 100 simulaciones por celda de inicio, los resultados de *Reach\_probability.asc* con valores menores a 1.5% generalmente pueden considerarse como valores atípicos. Además, Dorren (2016) considera los ráster *Nr\_deposited.asc* y *Reach\_probability.asc* las fuentes más útiles para zonificar la peligrosidad por caída de rocas.

Por último, en el caso de realizar la simulación incluyendo el efecto de la cobertura forestal, *Rockyfor3D* generará los ráster *Tree\_impact\_heights.asc* y *Nr\_tree\_impacts.asc* (Fig. 6.18), los cuales representan la altura máxima de impacto (m) y la distribución espacial del número de impactos contra árboles del bosque, respectivamente.

A continuación, se muestran los mapas temáticos creados a partir de los datos de salida del modelo numérico de simulación, *Rockyfor3D* (Dorren, 2016).

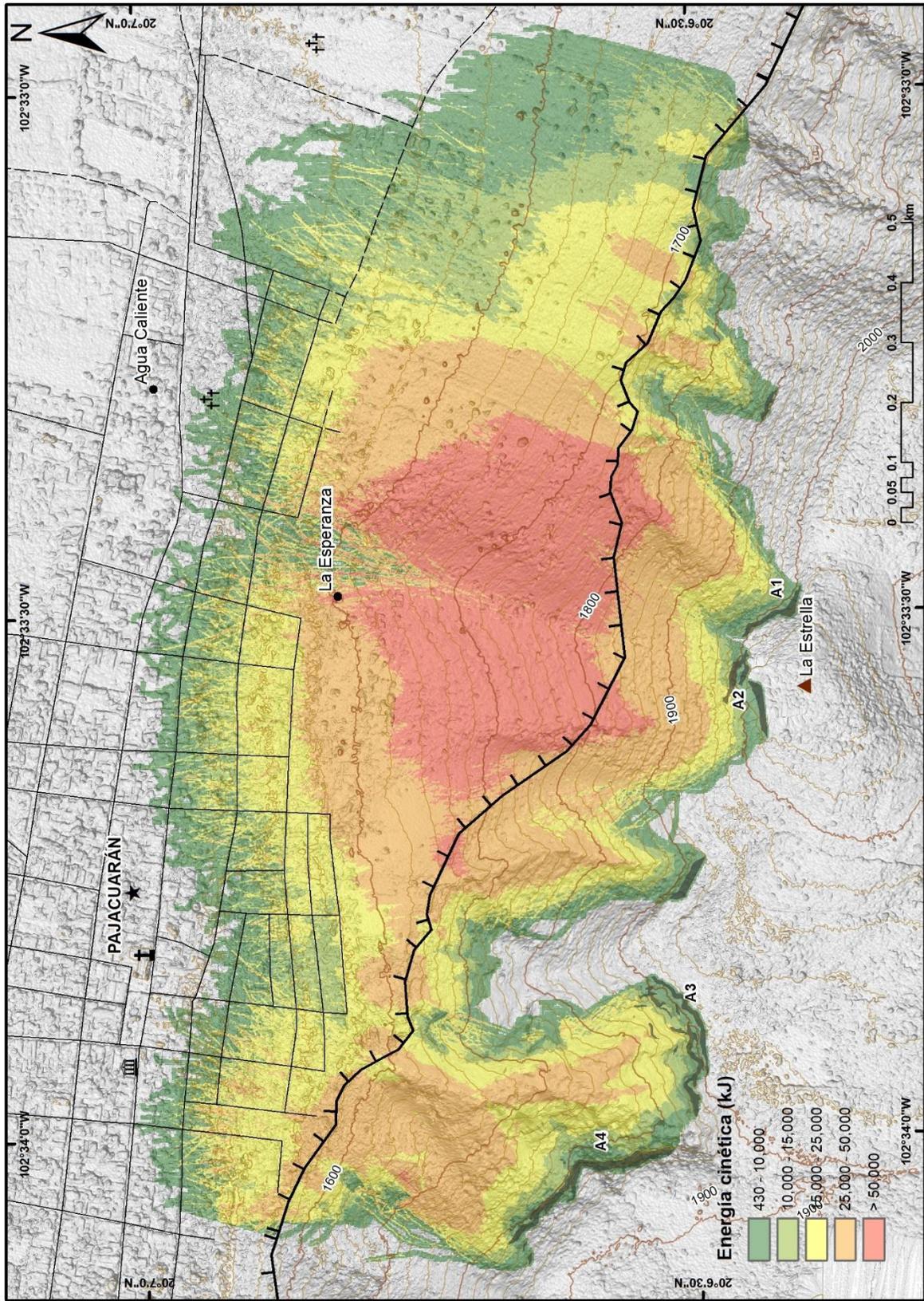


Figura 6.10 Mapa de los valores máximos de energía cinética (kJ) a partir del ráster E\_95Cl.asc. Fuente: Rockyfor3D. Octubre, 2018.

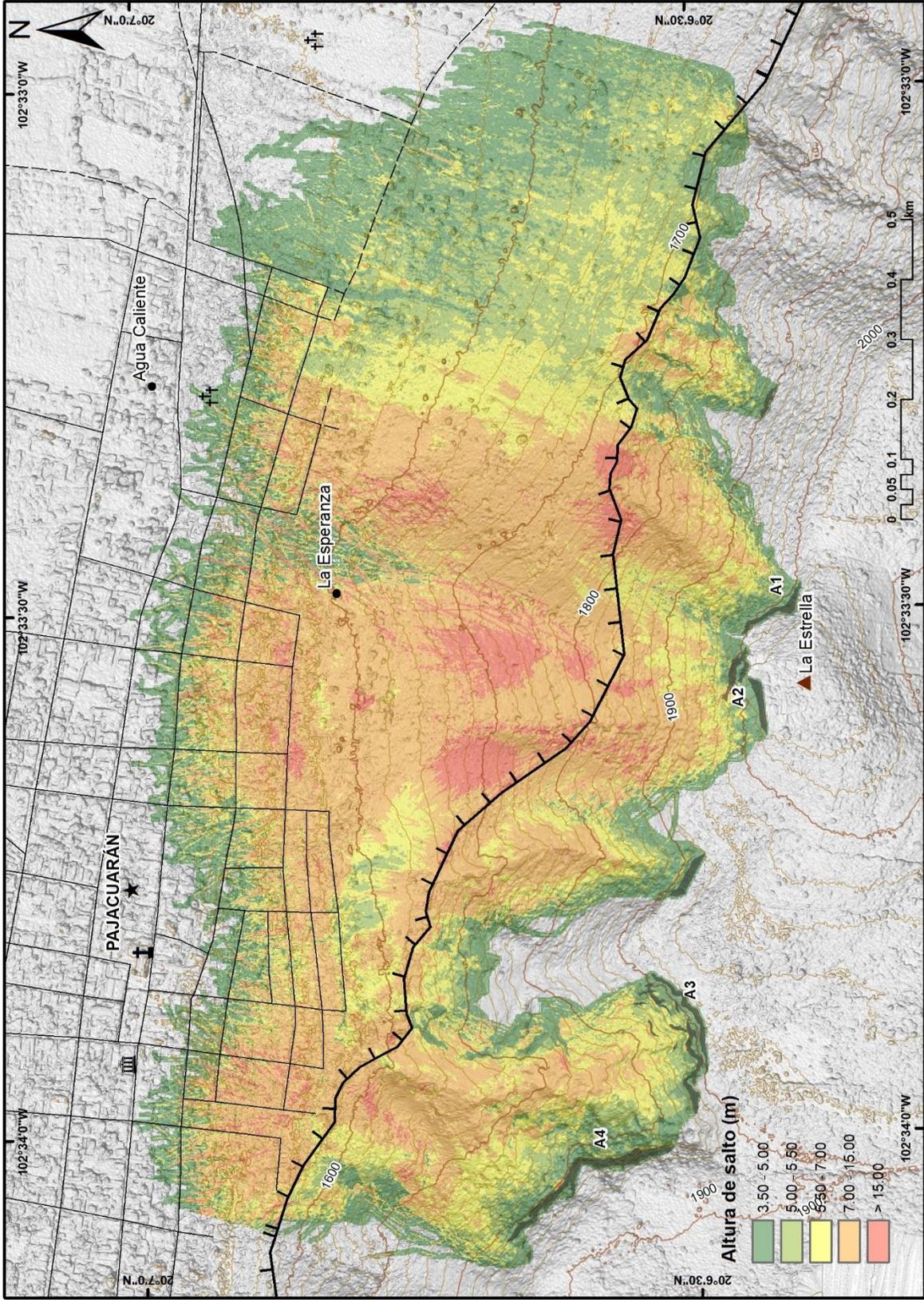


Figura 6.11 Mapa de los valores máximos de altura de salto (m) a partir del ráster Ph\_95Clasc. Fuente: Rockyfor3D. Octubre, 2018.

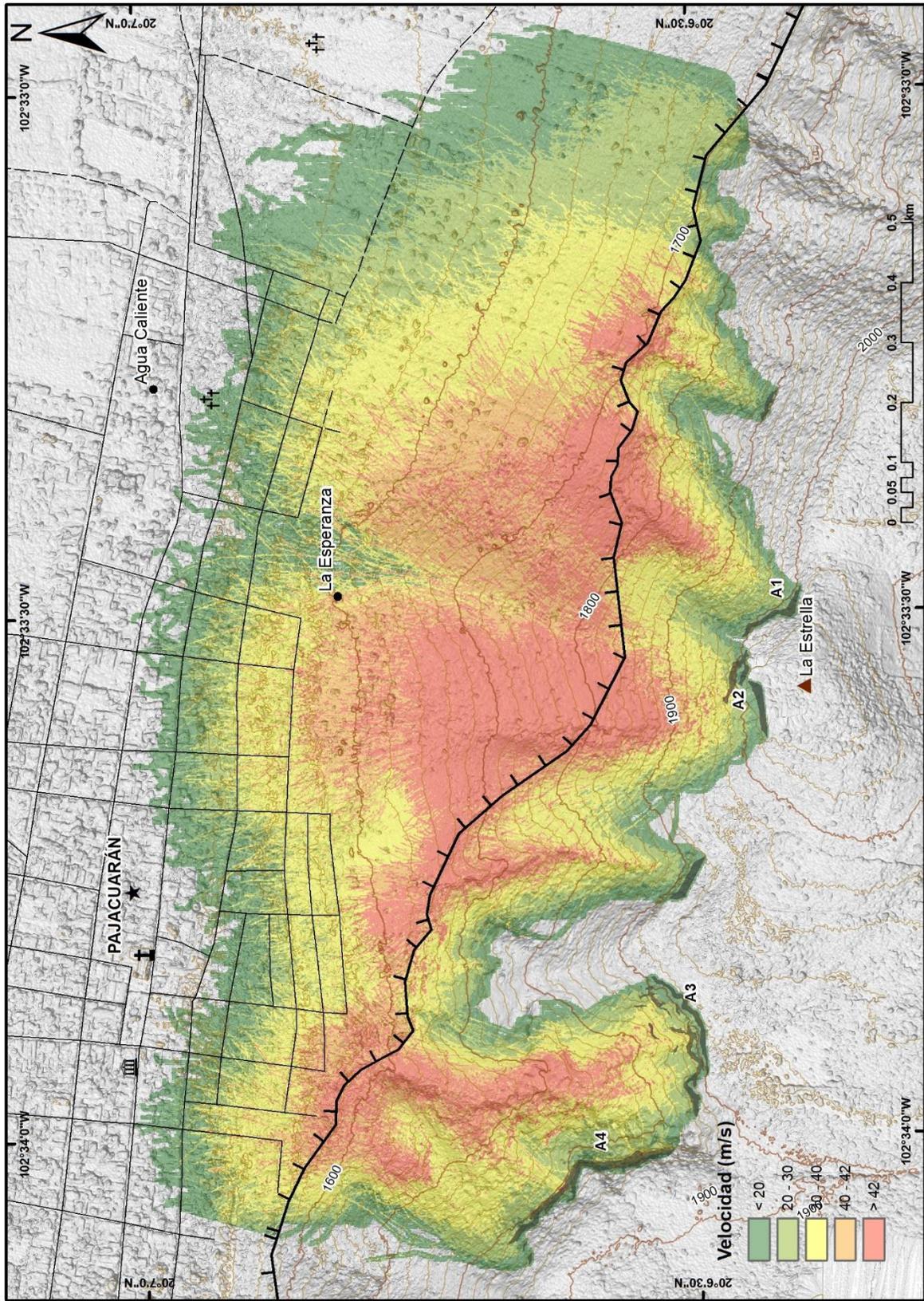
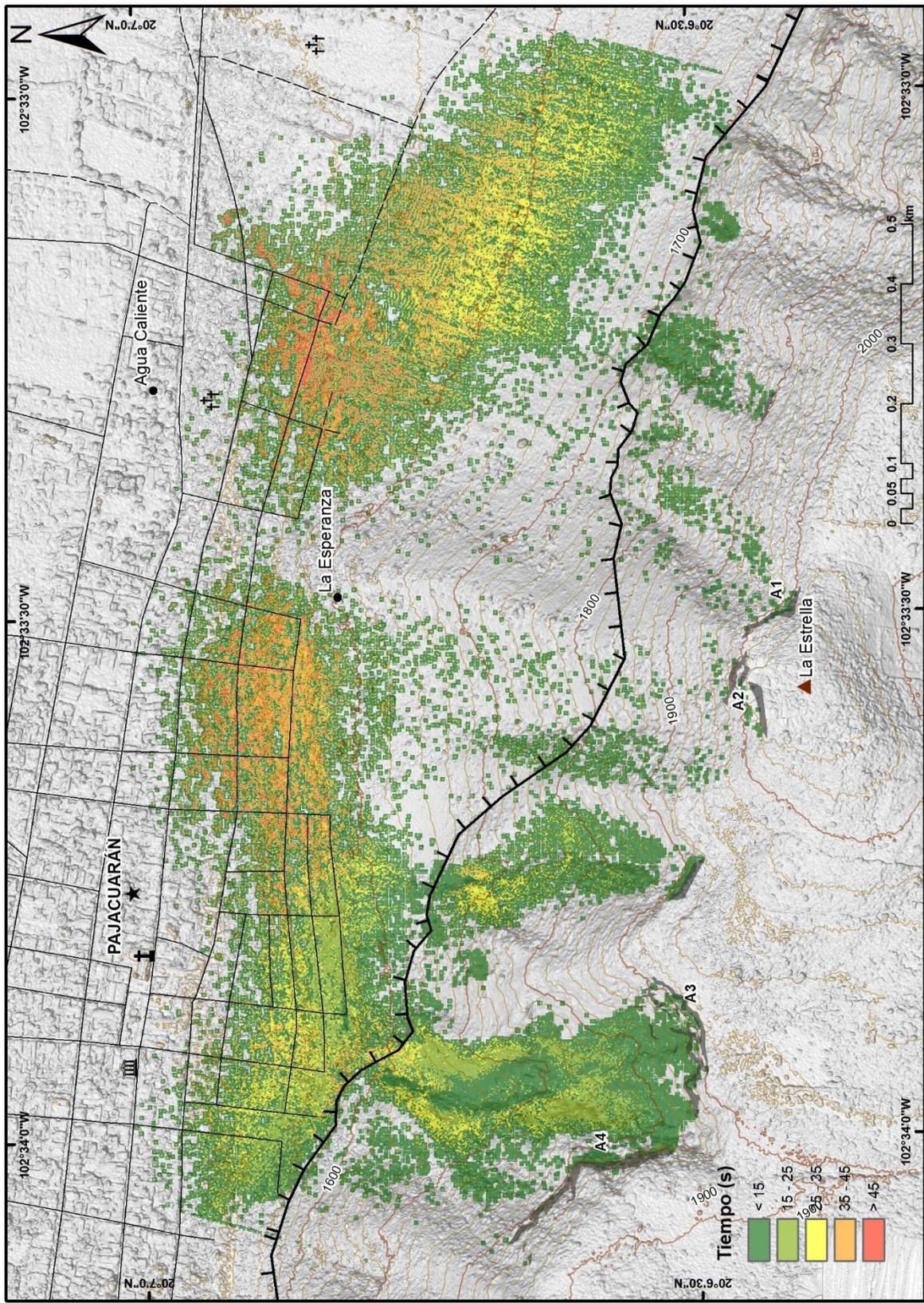


Figura 6.12 Mapa de los valores máximos de velocidad (m/s) a partir del ráster  $V_{max.asc}$ . Fuente: Rockyfor3D. Octubre, 2018.



**Figura 6.13** Mapa del tiempo mínimo (s) requerido por el bloque para detenerse a partir del ráster *Troj\_time.asc*. Fuente: *Rockyfor3D*. Octubre, 2018.

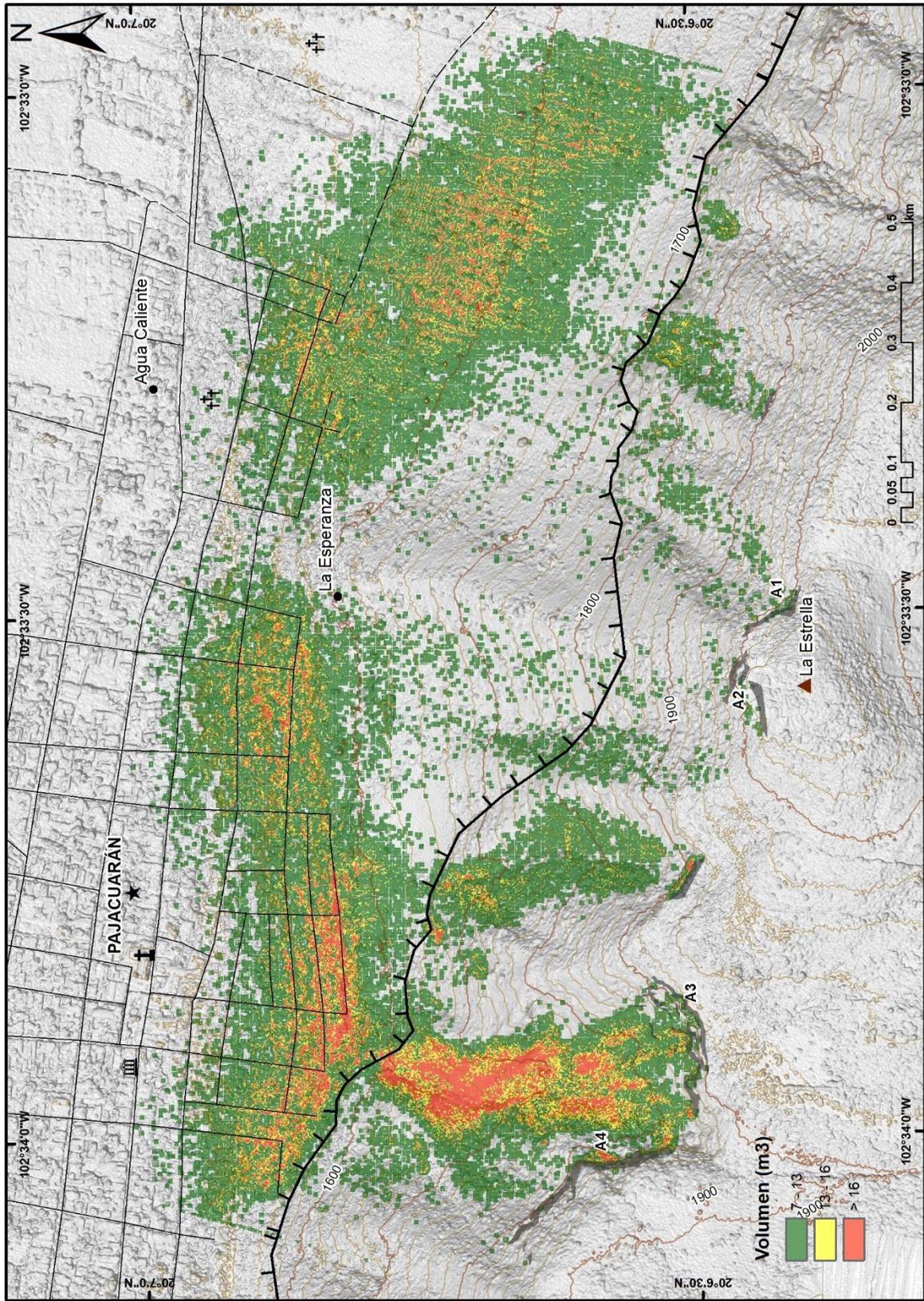


Figura 6.14 Mapa de los volúmenes máximos de bloque (m<sup>3</sup>) depositados sobre la ladera a partir del ráster Rvol\_deposit.asc. Fuente: Rockyfor3D. Octubre, 2018.

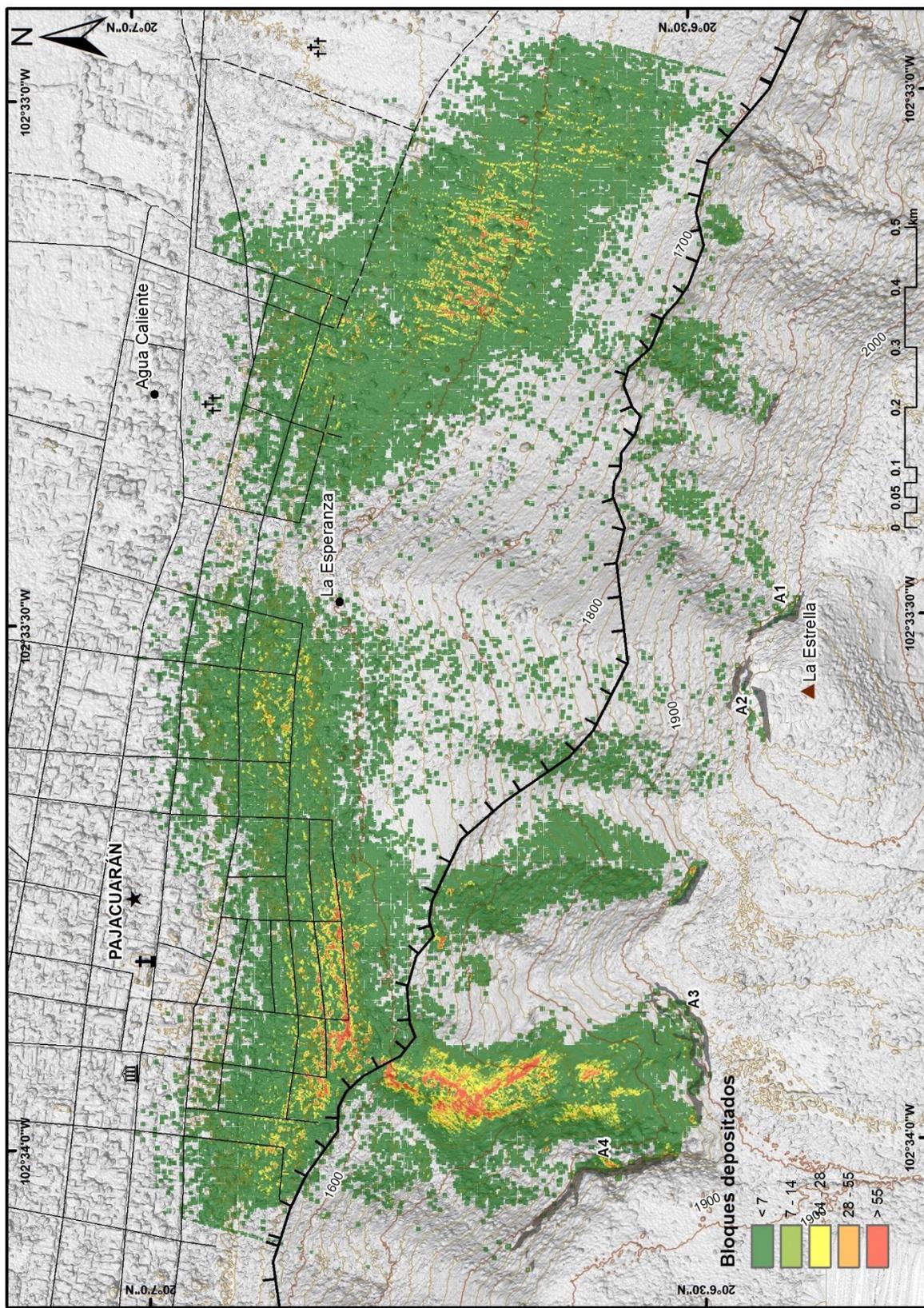


Figura 6.15 Mapa de la posición de los bloques depositados sobre la ladera a partir del ráster Nr\_deposited.asc. Fuente: Rockyfor3D. Octubre, 2018.

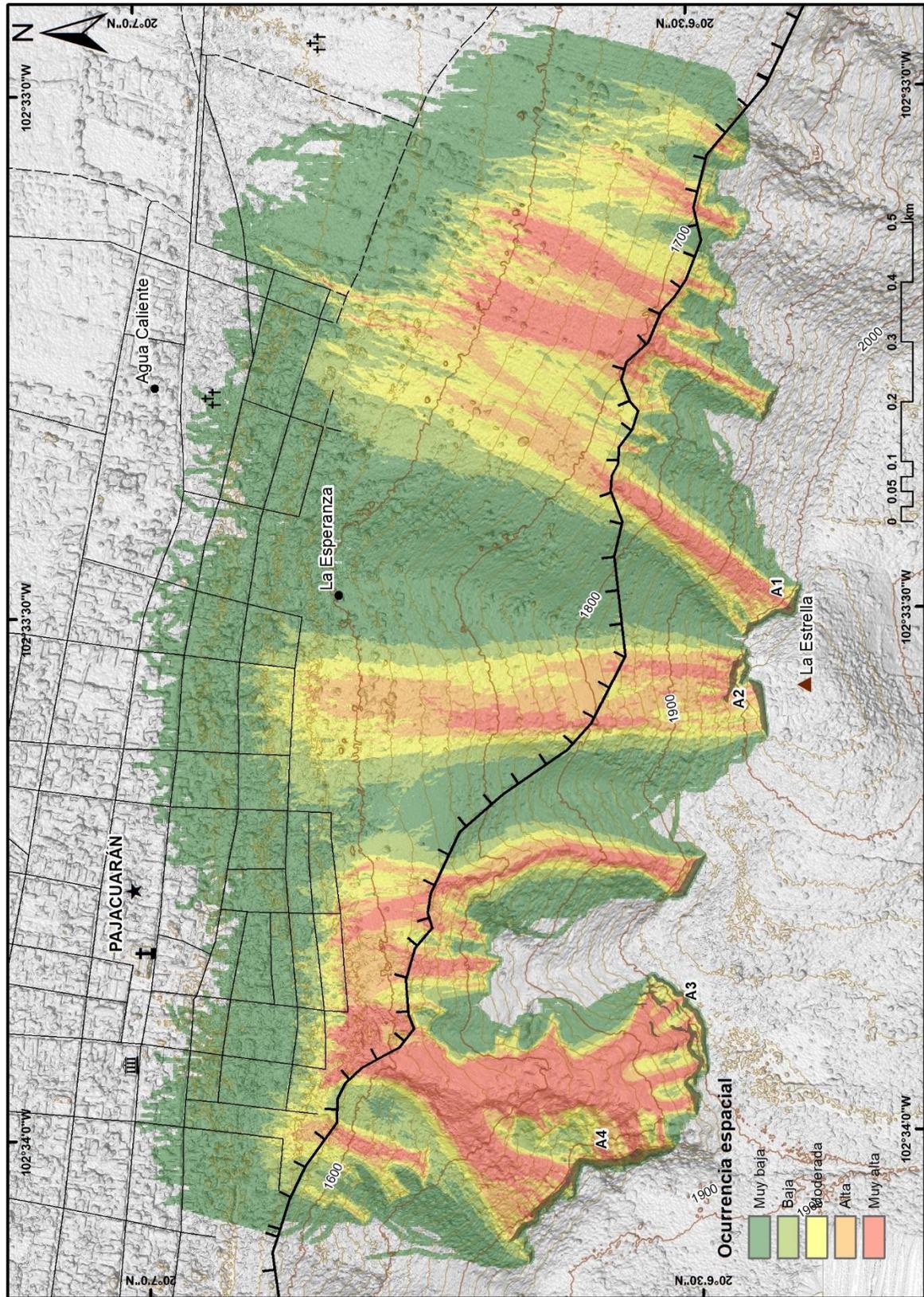


Figura 6.16 Mapa de las trayectorias de caída de rocas a partir del ráster Nr\_passages.asc. Fuente: Rockyfor3D. Octubre, 2018.

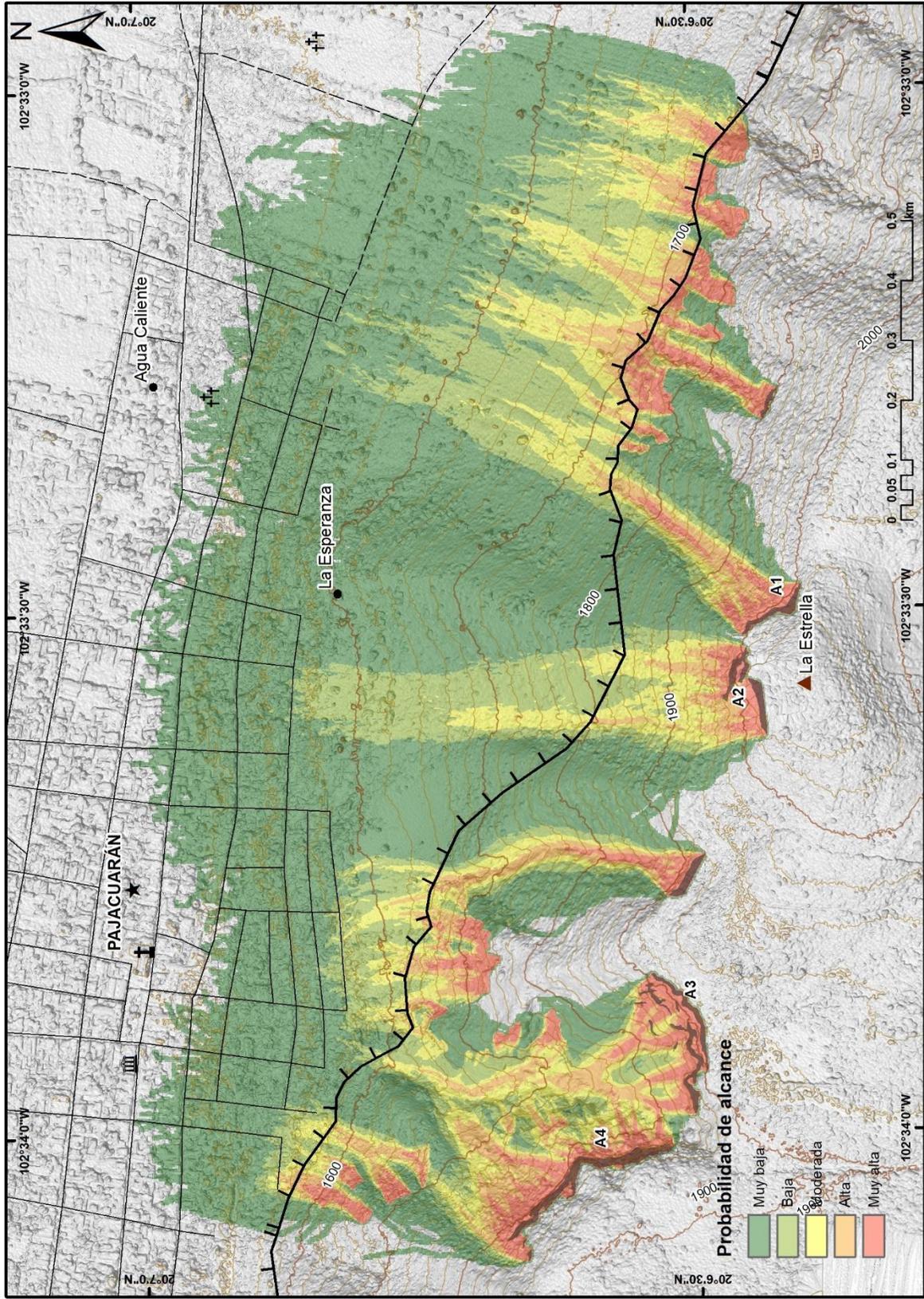


Figura 6.17 Mapa de la probabilidad de alcance por caída de rocas a partir del ráster Reach\_probability.asc. Fuente: Rockyfor3D. Octubre, 2018.



Figura 6.18 Mapa de la posición de los impactos contra árboles del bosque a partir del ráster Nr\_tree\_impacts.asc. Fuente: Rockyfor3D. Octubre, 2018.

## 6.5 MAPA DE PELIGROSIDAD POR CAÍDA DE ROCAS

Generalmente, la peligrosidad se describe en la literatura como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada, en un período de tiempo establecido y dentro de un área determinada (Varnes *et al.*, 1984; Guzzetti *et al.*, 1999; Crozier y Glade, 2005; Fell *et al.*, 2005; 2008). Esta definición considera los conceptos de ubicación espacial, magnitud y frecuencia de ocurrencia de un proceso de remoción en masa.

Según Crosta y Agliardi (2003), un mapa de peligrosidad por caída de rocas debe representar, como mínimo, la frecuencia de ocurrencia espacial de caída de rocas de magnitud definida a lo largo de una zona susceptible a su tránsito. A partir de estos parámetros, Crosta y Agliardi (2003) y Crosta *et al.* (2004) proponen la metodología del vector de peligrosidad por caída de rocas (RHV, *Rockfall Hazard Vector*), la cual se basa en los resultados obtenidos por modelos numéricos de simulación (Guzzetti *et al.*, 2002; Agliardi y Crosta, 2003; Frattini *et al.*, 2008; Agliardi *et al.*, 2009). En resumen, los valores de la energía cinética ( $k$ , *kinetic energy*), altura de salto ( $h$ , *fly height*), y frecuencia de alcance ( $c$ , *rockfall count*) se combinan para determinar la peligrosidad por caída de rocas (Labiouse y Abbruzzese, 2011; Volkwein *et al.*, 2011; Frattini *et al.*, 2012; Vanneschi *et al.*, 2019).

A través de los datos de salida – energía cinética media ( $E_{mean.asc}$ ), altura máxima de salto ( $Ph_{95CI.asc}$ ) y trayectoria de caída de rocas ( $Nr_{passages.asc}$ ) – obtenidos del modelado numérico en *Rockyfor3D* (Dorren, 2016), se aplicó la metodología RHV para evaluar la peligrosidad por caída de rocas en la falla geológica de Pajacuarán.

Primero, se reclasificaron dichos ráster en *ArcMap* (ESRI, 2018) con los valores que se muestran en el Cuadro 6.7. En cada celda del mapa ráster, la energía cinética ( $k$ ) se clasificó comparando la media de sus valores máximos con respecto a determinados valores de umbral. La energía cinética se consideró moderada (1) para  $k \leq 5,000$  kJ, alta (2) para  $5,000 < k < 10,000$  kJ, y muy alta (3) para  $k \geq 10,000$  kJ. Estos umbrales se plantearon de acuerdo con la capacidad de absorción de energía de los distintos tipos de medidas de protección. El valor mínimo de 5,000 kJ es representativo del potencial de absorción de la mayoría de los sistemas disponibles en el mercado – por ejemplo, mallas flexibles, atenuadores y túneles falsos – mientras que el valor máximo de 10,000 kJ superaría la capacidad de absorción de cualquier medida estructural (Suarez-Díaz, 2009; Volkwein *et al.*, 2011; Wyllie, 2015).

**Cuadro 6.7** Clasificación de los parámetros utilizando la metodología RHV

Clase	Energía cinética (kJ)	Altura de salto (m)	Ocurrencia espacial
1	≤ 5,000	≤ 5	< 0.01
2	5,000 -10,000	5 -10	0.01 – 0.1
3	≥ 10,000	≥ 10	> 0.1

Fuente: información tomada de Crosta y Agliardi, 2013.

Del mismo modo, los umbrales para la altura máxima de salto ( $h$ ) se establecieron a partir de las alturas más comunes entre las medidas estructurales de protección (Suarez-Díaz, 2009; Chen *et al.*, 2013). La altura de salto se clasifica de la siguiente manera: moderada (1) para  $h \leq 5$  m, alta (2) para  $5 < h < 10$  m, y muy alta (3) para  $h \geq 10$  m.

Para estudios a escala local, la frecuencia del alcance ( $c$ ) se evalúa normalizando el número de trayectorias que cruzaron una celda con respecto al número total de simulaciones. Crosta y Agliardi (2003) clasifican la ocurrencia espacial como baja para  $c < 0.01$ , moderada para  $0.01 < c < 0.1$ , y alta para  $c > 0.1$ . La forma en que se evalúa la frecuencia de alcance y los umbrales correspondientes difiere cuando el análisis se realiza a escala regional.

La clasificación de cada uno de los parámetros en las categorías 1 (moderada), 2 (alta) y 3 (muy alta) permitió definir el RHV en las dimensiones espaciales ( $c$ ,  $k$ ,  $h$ ), dadas por:

$$\|RHV\| = \sqrt{c^2 + k^2 + h^2} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Según la ecuación anterior, la peligrosidad se clasificó cualitativamente como moderado para  $1.732 < RHV < 3.000$ , alta para  $3.000 < RHV < 4.123$ , y muy alta para  $4.123 < RHV < 5.196$ . Debido a la resolución y escala de análisis, el ráster resultante de la metodología RHV está excesivamente fragmentado para aplicaciones prácticas (Fig. 6.19).

Para obtener una zonificación de la peligrosidad más uniforme, se suavizó el mapa mediante la opción *Estadísticas focalizadas* de las herramientas de *Vecindad* del programa *ArcMap* (ESRI, 2018). La herramienta calculó la media del valor de magnitud del RHV en cada celda con respecto a las celdas vecinas dentro de un radio de 15 m, para generar el mapa ráster representativo de la peligrosidad por caída de rocas de la porción de la falla geológica situada al sureste de la mancha urbana de la localidad de Pajacuarán (Fig. 6.20).

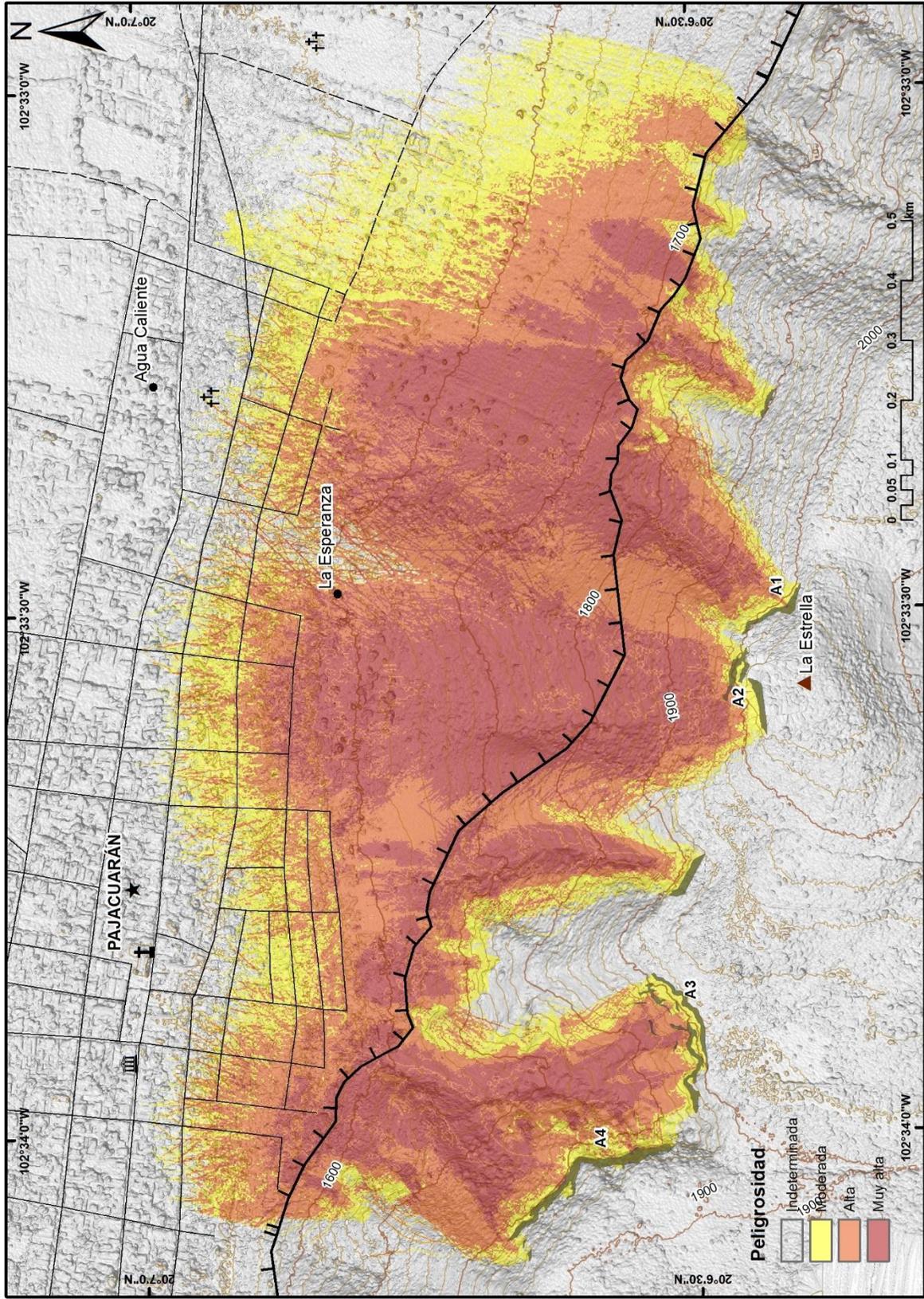


Figura 6.19 Mapa de la peligrosidad por caída de rocas obtenido de la metodología RHV. Fuente: MDE a partir de TLS. Noviembre, 2017.

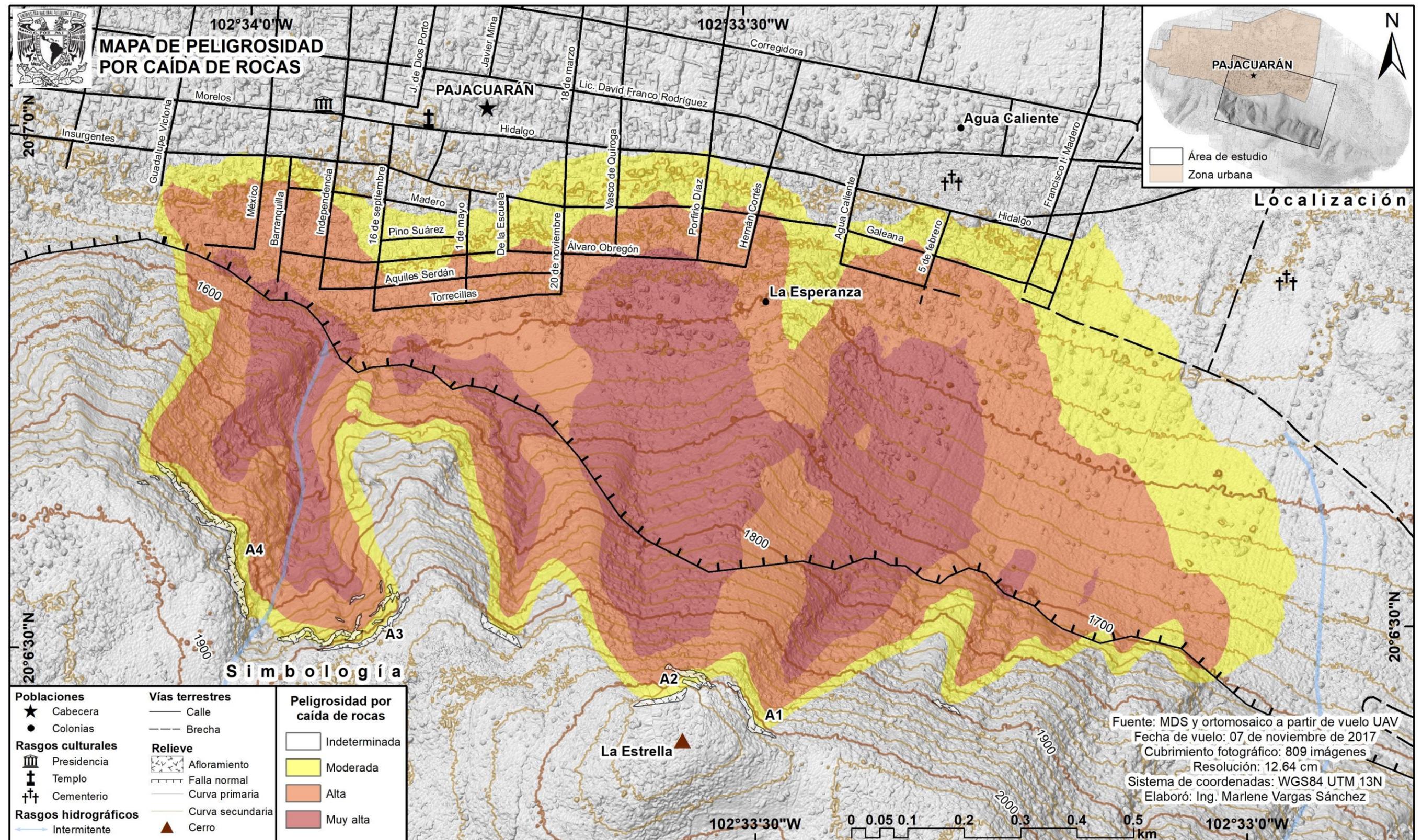


Figura 6.20 Mapa de zonificación de la peligrosidad por caída de rocas de una porción de la falla geológica activa de Pajacuarán. Fuente: información topográfica modificada de INEGI, 2002. Carta Topográfica Pajacuarán FI 3D88, escala 1: 50,000.

# Análisis y discusión

---

A continuación, se analizan y discuten los resultados que se obtuvieron a través del flujo de trabajo para el estudio de la trayectoria de caída de rocas. Las siguientes observaciones se refieren al trabajo de campo, datos de entrada, resultados del modelado numérico, y a la peligrosidad por caída de rocas en una porción de la falla geológica de Pajacuarán. Asimismo, se exponen ciertas limitaciones y ventajas del modelo *Rockyfor3D*.

### 7.1 TRABAJO DE CAMPO

Se obtuvo la topografía de detalle del área de estudio a través de la adquisición de imágenes de alta resolución a partir del vehículo aéreo no tripulado (UAV) y el registro de nubes de puntos por medio del escáner láser terrestre (TLS). Con base en el procesamiento de las imágenes aéreas, se generó el ortomosaico y modelo digital de superficie (MDS) de 0.1264 m de resolución, y con la nube de puntos del TLS se obtuvo el modelo digital de elevación (MDE) de 2 m de resolución. La [Fig. 7.1](#) muestra el contraste entre los productos cartográficos.

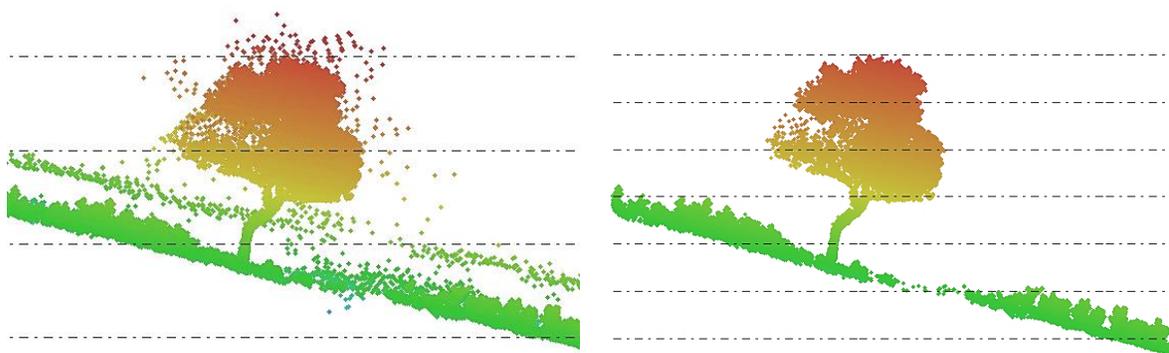
Al inicio del trabajo de investigación, se pretendía complementar los productos del LiDAR terrestre con los del UAV, tanto para superar las limitaciones de ambas plataformas, como para optimizar la calidad de los datos obtenidos. La mayor desventaja del TLS es la presencia de oclusiones en el caso de laderas muy elevadas. Además, algunos sitios resultan inaccesibles si el equipo no se puede orientar hacia el objeto de interés. Por otro lado, el punto de observación de los sistemas UAV – ortogonal a la superficie del terreno – es inconveniente en el estudio de afloramientos y escarpes verticales. Combinar una plataforma terrestre con una aérea, por lo tanto, puede reducir significativamente la mayoría de las restricciones relacionadas con la elevación, inclinación y geometría compleja de la ladera (Francioni *et al.*, 2017).



**Figura 7.1** Modelos digitales de sombras generados a partir de MDE de 2 m (recuadro central) y MDS de 0.1264 m de resolución espacial. Fecha de vuelo UAV y escaneo TLS: Noviembre, 2017.

La nube de puntos adquirida por TLS en el trabajo de campo resultó tener porciones con poca densidad de puntos, principalmente en la zona urbana de Pajacuarán, debido a las oclusiones que generan las construcciones. Se intentó combinar la nube de puntos LiDAR con la de UAV para llenar estos vacíos e incrementar la resolución angular de los datos. Sin embargo, los puntos de la última son imprecisos y se encuentran desfasados de la nube de puntos TLS, por lo que únicamente agregaron ruido a la misma (Fig. 7.2).

Finalmente, se decidió sólo utilizar los datos LiDAR para crear el MDE, requerido como dato de entrada para el modelado numérico en *Rockyfor3D* (Dorren, 2016). Con el fin de aprovechar el ortomosaico y MDS generados a partir del vuelo UAV, estos productos se emplearon en la descripción del área de estudio y para elaborar la cartografía de detalle, como mapa base y mapas temáticos de la localidad de Pajacuarán.



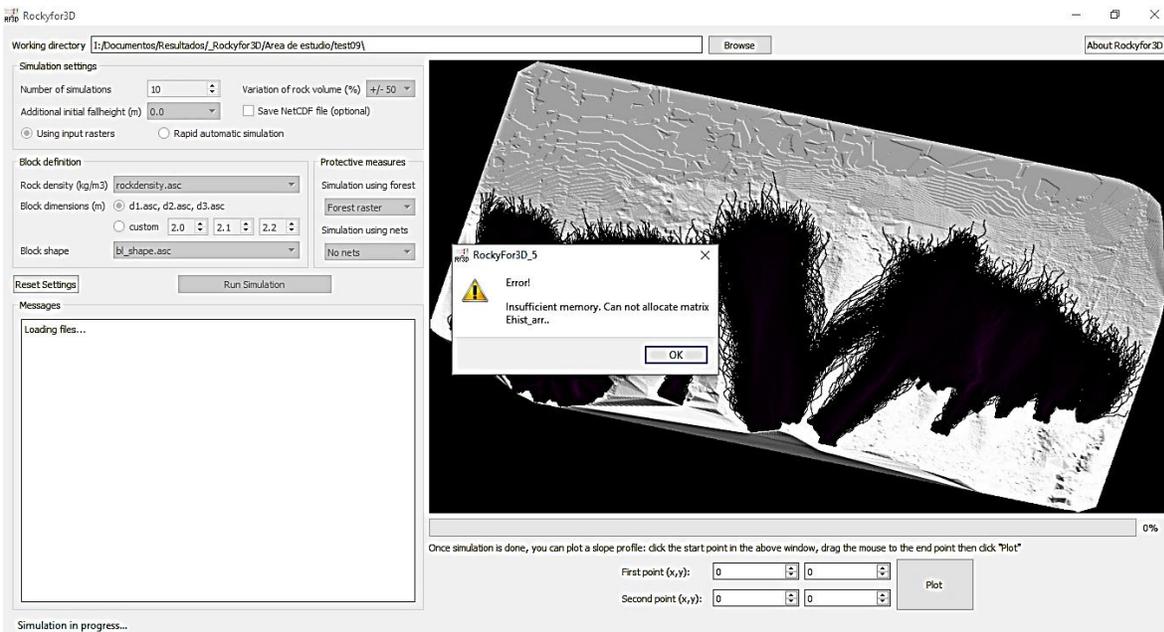
**Figura 7.2** Nube de puntos TLS con (izquierda) y sin (derecha) la nube de puntos UAV sobrepuesta. Fuente: captura de pantalla de Blue Marble Geographics, 2018.

## 7.2 DATOS DE ENTRADA

Preparar los datos de entrada para el modelo numérico *Rockyfor3D* (Dorren, 2016), resultó ser la fase más laboriosa, pero es esencial para garantizar un estudio confiable de la trayectoria de caída de rocas. Para empezar, esto involucró analizar y procesar los datos obtenidos en el trabajo de campo para crear un MDE representativo de la topografía del área de estudio.

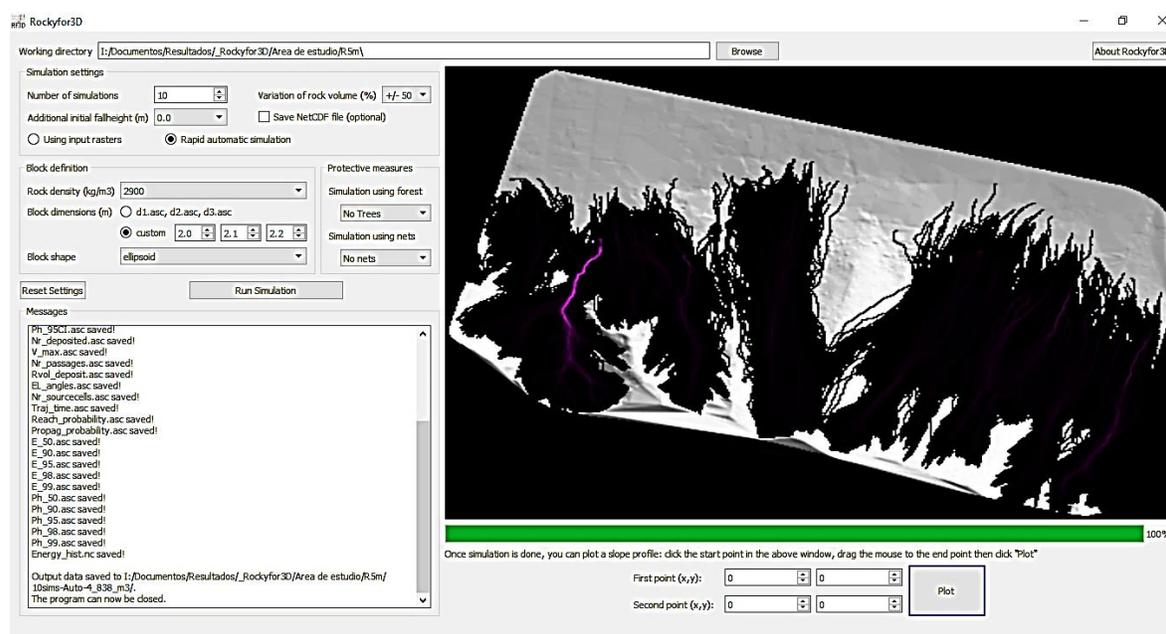
La resolución del MDE tiene gran influencia en los resultados de la simulación, ya que los datos de entrada para *Rockyfor3D* se digitalizan con base al MDE rasterizado (Dorren *et al.*, 2011). A medida que disminuye la resolución del MDE, también disminuye la exactitud de la cinemática simulada y la precisión espacial de los resultados, debido a que los ráster de baja resolución carecen de demasiados detalles. Sin embargo, una resolución muy alta podría introducir información innecesaria o redundante al MDE, y conducir a enormes conjuntos de datos, lo que puede disminuir la velocidad de cálculo del modelo numérico. Según Dorren (2016), un MDE de 1 m de resolución no necesariamente mejora la calidad de los resultados de *Rockyfor3D*, pero sí aumenta sustancialmente la cantidad de datos y tiempo de simulación. Por lo tanto, autores como Dorren *et al.* (2011) y Dorren (2016) sugieren emplear un MDE entre 2 y 10 m de resolución espacial.

Para corroborar las referencias y evaluar el efecto de la resolución espacial en los resultados del modelo numérico, se ejecutó una simulación automática rápida en *Rockyfor3D* utilizando MDE de 1 m, 2 m y 5 m de resolución, elaborados a partir de los datos LiDAR.



**Figura 7.3** Interfaz gráfica de usuario de *Rockyfor3D* al intentar ejecutar la simulación automática rápida con MDE de 1 m de resolución. Fuente: captura de pantalla de Dorren, 2016.

Efectivamente, resultaron ser demasiados datos para la simulación con el MDE de 1 m de resolución, ya que el modelo numérico indicó un error por memoria insuficiente y no pudo “asignar matriz” (Fig. 7.3). Por otro lado, al disminuir la resolución espacial del MDE a 5 m, los bloques de roca simulados tienden a desplazarse a mayores longitudes sobre la ladera (Fig. 7.4). Según Crosta y Agliardi (2003), esto se puede deber a que los modelos numéricos calculan mayores velocidades para MDE de baja resolución, lo cual consecuentemente aumenta la energía cinética y trayectoria de caída de rocas, dando valores más desfavorables a los esperados según los registros de eventos históricos. Dado los resultados anteriores, se concluyó que, efectivamente, la resolución óptima del MDE es de 2 m para realizar simulaciones en *Rockyfor3D* a una escala local de 1: 5'000 a 1: 10'000 (Dorren *et al.*, 2011).



**Figura 7.4** Interfaz gráfica de usuario de *Rockyfor3D* al ejecutar la simulación automática rápida con MDE de 5 m de resolución. Fuente: captura de pantalla de Dorren, 2016.

### 7.3 RESULTADOS DEL MODELADO NUMÉRICO

Los datos de salida del modelo numérico *Rockyfor3D* (Dorren, 2016) proporcionan información respecto a la probabilidad de alcance, distribución espacial de las rocas depositadas y el comportamiento dinámico de caída de rocas, dando como resultado valores de energía cinética, altura de salto y velocidad del bloque de roca. Asimismo, las trayectorias de caída de rocas son un indicador de la probabilidad de ocurrencia espacial de eventos de una magnitud definida.

De forma práctica, los valores máximos de energía cinética, altura de salto y velocidad del bloque de roca, se pueden implementar en el diseño de medidas estructurales de protección (Suarez-Díaz, 2009; Volkwein *et al.*, 2011; Frattini *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013). Asimismo, la probabilidad de alcance y distribución espacial de las rocas depositadas, sirven como base para zonificar la peligrosidad por caída de rocas en un área determinada (Dorren *et al.*, 2011; Volkwein *et al.*, 2011; Clouet *et al.*, 2012; Frattini *et al.*, 2012; Dorren, 2016).

Analizando los resultados, los valores máximos (~ 110,000 kJ a partir del ráster *E\_95CI.asc*) y media de los valores máximos (72,000 kJ a partir de *E\_mean.asc*) de energía cinética de los bloques simulados se obtienen ladera abajo de los afloramientos principales A1 y A2, a la mitad de su trayectoria de caída, y posterior a grandes desniveles o puntos de inflexión en el terreno. Se muestra un claro ejemplo en el bloque de techo de la falla normal (Fig. 6.10).

Los valores máximos ( $\sim 15$  m a partir del ráster *Ph\_95CI.asc*) y la media de los valores máximos (8 m a partir de *Ph\_mean.asc*) de altura de saltos de los bloques de roca se alcanzan después de su impacto sobre grandes desniveles en la superficie de la ladera. Particularmente, se observan estos valores máximos en el punto de inflexión generado por el bloque de techo de la falla normal (Fig. 6.11).

La velocidad máxima absoluta de las rocas simuladas es de aproximadamente 42 m/s (a partir del ráster *V\_max.asc*), y estos valores se presentan en zonas semejantes a los valores máximos de energía cinética. En general, los bloques de roca adquieren la velocidad máxima a la mitad de su trayectoria de caída (Fig. 6.12), en correspondencia con el escarpe actual de la falla geológica.

En la Fig. 7.5 se visualiza la envolvente del intervalo de confianza del 95% de los valores máximos de energía cinética (*Ec\_IC95*) y altura de salto (*As\_IC95*), la media de los valores máximos de energía cinética (*Ec\_media*) y altura de salto (*As\_media*), y la velocidad máxima absoluta (*V\_max*) a lo largo del perfil A1-A1' (Fig. 5.9) – a partir de la línea de corte de la Fig. 5.8 – que inicia en el afloramiento A1, de donde se desprendió la roca del evento histórico de noviembre de 2013, y termina en la zona de depósito y mancha urbana de Pajacuarán.

Comparando los resultados de la simulación con respecto al ángulo de inclinación de la ladera ( $\psi_s$ ), se observa lo siguiente (Fig. 7.5). En la zona de desprendimiento ( $\psi_s \geq 52^\circ$ ) los fragmentos de roca desarrollan energía cinética y altura de salto relativamente menores, pero velocidad inicial muy elevada. En la zona de tránsito ( $52^\circ > \psi_s > 37^\circ$ ) la energía cinética, altura de salto y velocidad de los bloques va en aumento y alcanza valores máximos en el punto de inflexión generado por el bloque de techo de la falla normal. Por último, en las zonas de tránsito y depósito ( $\psi_s \leq 37^\circ$ ), posterior al punto de inflexión, las rocas descienden por medio de una serie de impactos estrechamente espaciados, y los valores de energía cinética, altura de salto y velocidad comienzan a disminuir.

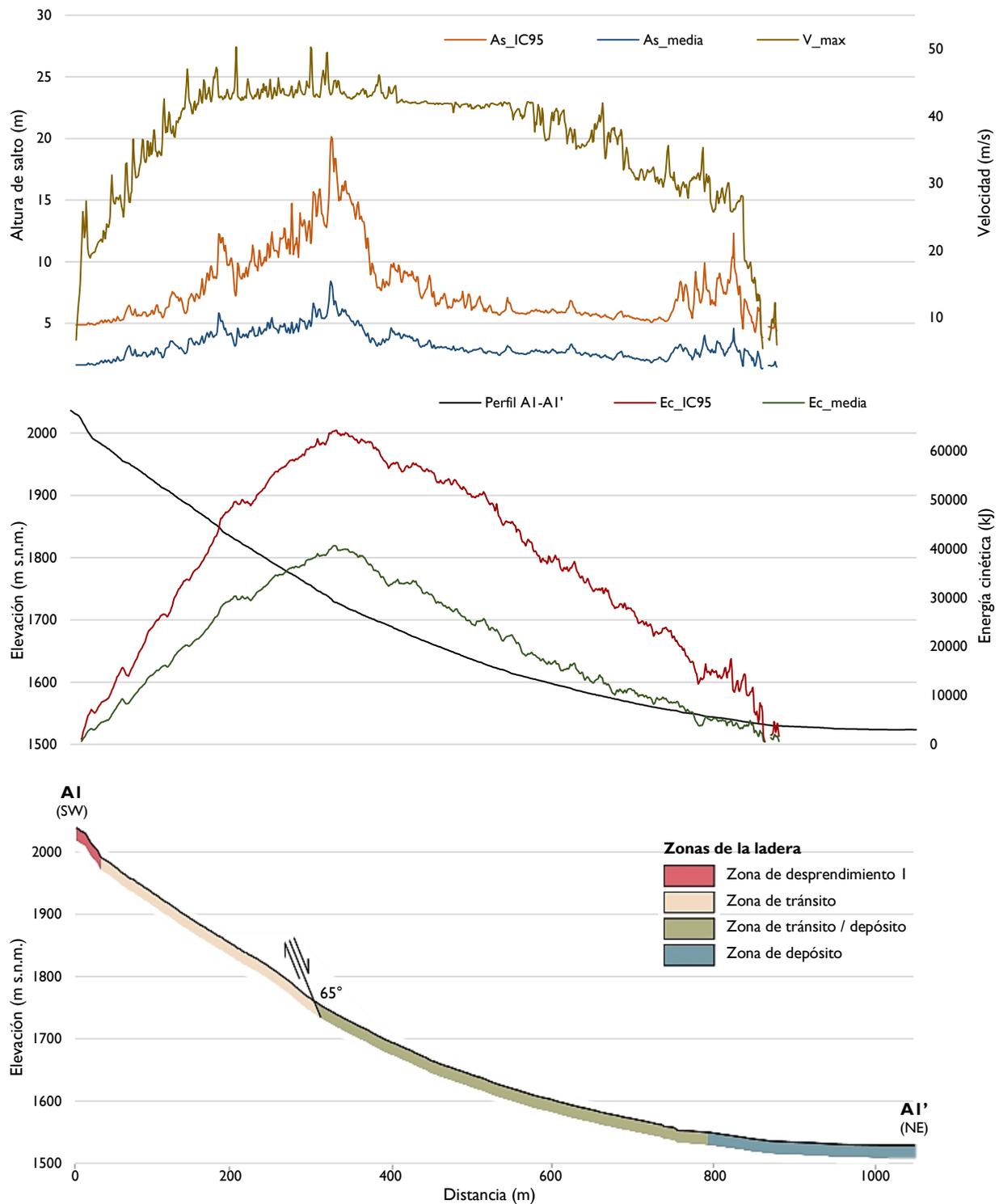
Los coeficientes de restitución ( $e$ ) cuantifican los cambios de velocidad durante el impacto y ayudan a comprender cómo las características de la superficie de la ladera influyen en el comportamiento y trayectoria de la caída de rocas. En *Rockyfor3D*, el tipo de suelo y la rugosidad superficial, definen el coeficiente de restitución normal ( $e_N$ ) y tangencial ( $e_T$ ), respectivamente (Dorren, 2016). El coeficiente de restitución normal depende de las

propiedades de compresión elástica de los materiales. Cuanto más deformable sea el material de la ladera, mayor será la pérdida de energía cinética, altura de salto y velocidad después del impacto (Wyllie, 2015). Por otro lado, la rugosidad superficial se refiere a las irregularidades encontradas sobre el terreno. Esta altera el ángulo inicial con el cual la roca impacta la ladera, por lo que, generalmente la altura de salto aumenta al incrementar la rugosidad (Wyllie, 2015).

El efecto de las características de la superficie de la ladera (Cuadro 6.4) se puede observar claramente en los resultados de la simulación (Fig. 7.5) y conforme a las diferentes zonas de la ladera (Fig. 6.7). En la zona de tránsito, sobre el bloque levantado o de piso de la falla normal, el material superficial está conformado principalmente por el macizo rocoso con material grueso erosionado y una cubierta de suelo. Consecuentemente, los valores de energía cinética, altura de salto y velocidad de los bloques de roca son elevados. Posterior al punto de inflexión producido por el bloque hundido o de techo de la falla normal, se encuentra una transición entre las zonas de tránsito y depósito de rocas. En esta área el material es compacto con grandes fragmentos de roca, y la rugosidad superficial es más elevada que en la zona de tránsito, por lo que la energía cinética, altura de salto y velocidad disminuyen drásticamente. Finalmente, en la zona de depósito al pie de ladera, comienza la mancha urbana de la localidad de Pajacuarán. El tipo de material es carpeta asfáltica y concreto – materiales muy rígidos según las categorías dadas por Dorren (2016), por lo que se forman picos en las envolventes de los valores máximos de energía cinética, altura de salto y velocidad.

Entre otros datos de salida del modelo numérico *Rockyfor3D*, tenemos el tiempo mínimo necesario para que un bloque finalice su trayectoria por la ladera. Dependiendo de la distancia alcanzada por la roca desprendida, el tiempo mínimo de trayectoria es entre 15 a 45 segundos (a partir del ráster *Traj\_time.asc* de la Fig. 6.13), tiempo con el que contaría la población para evacuar los sitios de mayor exposición ante un evento de caída de rocas.

Asimismo, el modelo simuló la caída de bloques de volúmenes entre 7 y más de 16 m<sup>3</sup> (del ráster *Rvol\_deposit.asc* de la Fig. 6.14), de acuerdo a una variación de volumen del 50%. Los resultados sugieren que hay una ligera tendencia espacial en cuanto a la clasificación natural de los bloques a lo largo de la ladera, donde las rocas de menor volumen se acumulan cerca de la porción superior y las de mayor volumen llegan hasta la base, de manera que los fragmentos de roca se agrandan ladera abajo (Statham, 1976; Dorren *et al.*, 2011; Wyllie, 2015).



**Figura 7.5** Resultados de la simulación a lo largo del perfil AI-AI'. Se puede consultar el corte y perfil geológico AI-AI' en la Fig. 5.8 y Fig. 5.9, respectivamente; el mapa de las zonas de la ladera en la Fig. 6.7; y la descripción de los parámetros de la superficie de la ladera y la cobertura forestal para cada zona en el Cuadro 6.4 y Cuadro 6.5, respectivamente. Fuente: Rockyfor3D. Octubre, 2018.

Naturalmente, la mayoría de las trayectorias de caída de rocas (a partir del ráster *Nr\_passages.asc* de la Fig. 6.16) se ubican justo por debajo de las zonas de desprendimiento, y se concentran en cañadas estrechas. Principalmente, se observa esta elevada recurrencia espacial ladera abajo de los afloramientos A3 y A4, que es además donde se acumulan la mayor cantidad de bloques depositados (del ráster *Nr\_deposited.asc* de la Fig. 6.15), así como los bloques de roca de mayor volumen (Fig. 6.14).

En cuanto a la probabilidad de alcance por caída de rocas (a partir del ráster *Reach\_probability.asc* de la Fig. 6.17), se conoce que la geometría de la ladera determina la distancia sobre la cual el bloque desciende y, por lo tanto, el alcance que este puede obtener (Abellán y Vilaplana, 2003). En efecto, los bloques de roca que se desprenden de las zonas más elevadas y escarpadas recorren mayor distancia – como en los cuatro afloramientos principales – mientras que los bloques de las zonas menos inclinadas y más próximas al pie de la ladera se detienen a distancias relativamente cortas.

Con relación al MDE empleado para el modelado numérico en *Rockyfor3D* (Fig. 6.1) – a partir de la combinación de MDS y MDT – y el efecto de la porción conformada por el MDS, se percibe que las edificaciones impiden una mayor ocurrencia espacial (Fig. 6.16) y probabilidad de alcance por caída de rocas (Fig. 6.17) dentro de la mancha urbana de Pajacuarán. Sin embargo, las construcciones se extienden hacia la zona de depósito sobre el pie de la ladera, por lo que bloques de roca de gran volumen (Fig. 6.14) se depositan (Fig. 6.15) en todo el margen de la mancha urbana con más proximidad a la falla Pajacuarán (Fig. 5.16).

La Fig. 6.18 (del ráster *Nr\_tree\_impacts.asc*.) muestra la posición de los impactos de los bloques de roca contra árboles del bosque. En esta distribución espacial, se observa una mayor cantidad de impactos en las zonas de la ladera con trayectorias de muy alta recurrencia (Fig. 6.16) y probabilidad de alcance por caída de rocas (Fig. 6.17) – ladera abajo de los cuatro afloramientos principales.

Los factores determinantes para absorber y, en consecuencia, disipar la cantidad de energía cinética son el tipo de árbol y diámetro del tallo (Dorren, 2016). Respecto al tipo de vegetación, en Pajacuarán predomina el huisache, mezquite y guamúchil. La *Acacia farnesiana*, conocido comúnmente como huisache, es una especie de árbol pequeño, perennifolio o subcaducifolio, de 3 a 10 m de altura y con un diámetro a la altura del pecho (DBH) de hasta

0.40 m (Clarke *et al.*, 1989). El mezquite, del género *Prosopis*, es un árbol caducifolio y, generalmente, llega a medir entre 6 y 9 m de altura. Los mezquites crecen lentamente, sin embargo, el tronco es duro y la raíz se ha registrado hasta a 47 m de profundidad (Martin *et al.*, 1951). El guamúchil, de la especie *Pithecellobium dulce*, es un árbol de tamaño mediano y crecimiento rápido, espinoso y perennifolio, de 5 a 22 m de altura y con un tronco corto de 0.30 hasta 1 m en DBH (Arriaga *et al.*, 1994).

Según las características anteriores, las especies endémicas de la zona tienen potencial para ser implementadas como barreras verdes de protección por caída de rocas debido a su alta capacidad de absorción y disipación de energía cinética. Desafortunadamente, para el presente caso de estudio, la cobertura forestal no tuvo significativa influencia en la reducción de probabilidad de alcance, ni en la disipación de energía cinética de los bloques de roca desprendidos (Fig. 7.6). En general, esto se debe al escaso número de árboles por hectárea o densidad del bosque, y al reducido diámetro de los tallos registrados en el trabajo de campo (Cuadro 6.5).

```
Rockyfor3D v5.2.6 - Simulations completed on Wed Oct 17 15:45:41 2018
simulation started on Wed Oct 17 15:44:02 2018

simulation settings:
- rock volume variation = +/- 50
- nr. of simulations per source cell = 10
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 74410
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation with forest and without nets

Overall simulated energy values:
- maximum of the mean energy values = 24302.700000 kj
- maximum energy value = 38886.800000 kj
```

```
Rockyfor3D v5.2.6 - Simulations completed on Wed Oct 17 16:47:31 2018
simulation started on Wed Oct 17 16:45:51 2018

simulation settings:
- rock volume variation = +/- 50
- nr. of simulations per source cell = 10
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 74410
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation without forest and without nets

Overall simulated energy values:
- maximum of the mean energy values = 25065.000000 kj
- maximum energy value = 37570.600000 kj
```

**Figura 7.6** Comparación de los valores de energía cinética en los archivos de registro de las simulaciones en Rockyfor3D realizadas con (superior) y sin (inferior) considerar la cobertura forestal de la ladera.

### 7.3.1 Limitaciones y ventajas de *Rockyfor3D*

Al igual que en la mayoría de los modelos numéricos de simulación, *Rockyfor3D* (Dorren, 2016) considera que la masa y forma de la roca permanecen constantes durante toda la trayectoria de caída. Sin embargo, los bloques por lo regular se fragmentan durante eventos de caída de rocas. La probabilidad de fragmentación depende de las propiedades elásticas, resistencia, tamaño y velocidad de la roca (Chau *et al.*, 2002; 2003). Las características de las discontinuidades del bloque, como espaciado y persistencia, también influyen en este proceso (Frattoni *et al.*, 2012).

Lamentablemente, aún no se ha logrado una comprensión completa del proceso de fragmentación. Los datos experimentales a gran escala son escasos y se han propuesto pocos modelos numéricos que la consideren (Crosta *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2010). Los problemas principales en el desarrollo de tales modelos incluyen la definición de las condiciones de umbral para el inicio de la fragmentación, el control de las propiedades del bloque – por ejemplo, módulo de Young y coeficiente de Poisson – la distribución del tamaño de los fragmentos y la transferencia de energía cinética desde el bloque inicial a los fragmentos.

Otra limitación de los modelos numéricos, como *Rockyfor3D*, es que utilizan parámetros simplificados para simular la trayectoria de caída de rocas. Por lo regular, los datos de entrada incluyen las propiedades de las rocas, y la geometría y características de la superficie de la ladera. Entre estos parámetros, los coeficientes de restitución son los más difíciles de determinar y los de mayor impacto en el comportamiento de caída de rocas (Wyllie, 2015).

Por un lado, el coeficiente de restitución normal – definido por las propiedades mecánicas de los materiales o tipo de suelo que conforma la superficie de la ladera (Dorren, 2016) – se caracteriza para "materiales modelo" (Cuadro 3.3), simplificados mediante pruebas de caída de rocas *in situ* o de laboratorio (Bourrier y Hungr, 2011). Asimismo, el coeficiente de restitución tangencial – definido por la rugosidad superficial de la ladera (Dorren, 2016) – se caracteriza por la relación del tamaño de la roca desprendida con el tamaño promedio de las rocas que cubren la superficie de la ladera (Fig. 3.6), o la altura media de los bloques (MOH) que una roca pudiera impactar en su descenso (Fig. 3.9).

Sin embargo, la realidad es que los coeficientes de restitución no dependen únicamente de las características de la superficie de la ladera, sino también de la interacción entre otros factores como la masa, forma, litología, meteorización y discontinuidades de los bloques de

roca; la resistencia y el módulo de elasticidad de los materiales; el modo, ángulo y velocidad de impacto; la profundidad de penetración; y la presencia y tipo de vegetación (Peng, 2000; Bourrier y Hungr, 2011; Frattini *et al.*, 2012; Wyllie, 2015).

Varios investigadores han realizado esfuerzos significativos para obtener valores precisos y específicos del sitio para estos coeficientes (Pfeiffer y Bowen, 1989; Azzoni y de Freitas, 1995; Peng, 2000; Chau *et al.*, 2002; Heidenreich, 2004; Labiouse y Heidenreich, 2009; Bourrier y Hungr, 2011). No obstante, la caracterización de la mayoría de los parámetros que definen el comportamiento de caída de rocas es sumamente complicada debido a su alta variabilidad espacial en un sitio de estudio dado.

A pesar de lo anterior, los modelos numéricos en 3D se utilizan cada vez más para simular la caída de rocas (Guzzetti *et al.*, 2002; Agliardi y Crosta, 2003; Crosta *et al.*, 2004; Dorren *et al.*, 2006), ya que superan las limitaciones de los modelos 2D explotando la forma tridimensional de la topografía proporcionada por los MDE. Entre las ventajas principales de *Rockyfor3D* se tiene que este calcula múltiples trayectorias en función del relieve y tipo de movimiento seguido por la roca a partir de un origen conocido. Además, por su enfoque híbrido, *Rockyfor3D* representa los bloques de roca como cuerpos rígidos para simular su rotación, rebote en la ladera e impacto contra los árboles, lo cual también influye en el comportamiento dinámico resultante (Volkwein *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2013).

Asimismo, los modelos numéricos rara vez incluyen medidas de protección en la simulación de caída de rocas (Guzzetti *et al.*, 2002; Volkwein *et al.*, 2011), aunque estas tengan efectos significativos en la trayectoria y disipación de energía (Dorren *et al.*, 2004; 2005; 2006). Por lo que, modelos como *Rockyfor3D* son de gran utilidad para evaluar la eficacia del diseño de estas. Ciertas especies de árboles tienen la capacidad de proporcionar un grado de protección comparable a muchas medidas estructurales. Al mismo tiempo, la presencia de bosques en las laderas canaliza las trayectorias de caída, permitiendo localizar posiciones para instalar medidas estructurales y garantizar una protección efectiva. Además, los bosques ofrecen soluciones ecológicas para la gestión del peligro por caída de rocas. El sistema de mitigación ideal – ya sea estructural, mixto o forestal – depende de la magnitud de los eventos de caída de rocas, la longitud de la ladera entre la zona de desprendimiento y los elementos en riesgo, y la estructura del bosque endémico de la zona (Frattini *et al.*, 2012).

## 7.4 PELIGROSIDAD POR CAÍDA DE ROCAS

Un mapa de zonificación de la peligrosidad debe representar la frecuencia de ocurrencia espacial de caída de rocas de magnitud definida a lo largo de una zona susceptible a su tránsito (Crosta y Agliardi, 2003). Resulta conveniente combinar mapas ráster para realizar una evaluación espacial de la peligrosidad. Por lo que, a partir de los datos de salida – energía cinética media (*E\_mean.asc*), altura máxima de salto (*Ph\_95Cl.asc*) y trayectoria de caída de rocas (*Nr\_passages.asc*) – obtenidos del modelado numérico en *Rockyfor3D* (Dorren, 2016), se creó el mapa de peligrosidad por caída de rocas de la porción de la falla geológica situada al sureste de la mancha urbana de la localidad de Pajacuarán (Fig. 6.20).

Dependiendo de la ocurrencia espacial y valores de energía cinética y altura de salto, la peligrosidad por caída de rocas se clasifica en muy alta (roja), alta (naranja) y moderada (amarilla). En cuanto a las zonas susceptibles a la caída de rocas ubicadas al pie de la ladera, y sobre la planicie lacustre y mancha urbana de Pajacuarán, se tiene lo siguiente.

**Muy alta peligrosidad.** Se ubican 2 manzanas entre las calles Guadalupe Victoria, Independencia y Álvaro Obregón – ladera abajo de los afloramientos A3 y A4 – y 3 manzanas entre las calles 20 de noviembre, Hernán Cortés y Álvaro Obregón – ladera abajo del afloramiento A2 – dando en total al menos 5 manzanas en la colonia Centro de la localidad de Pajacuarán.

**Alta peligrosidad.** Se ubican 16 manzanas entre las calles Guadalupe Victoria, Hernán Cortés, Insurgentes, Madero, Álvaro Obregón y Galeana en la colonia Centro – ladera abajo de los afloramientos A2, A3 y A4 – y 5 manzanas entre las calles Hernán Cortés, Francisco I. Madero y Galeana en la colonia La Esperanza – ladera abajo de los afloramientos A1 y A2 – dando en total al menos 21 manzanas en la localidad de Pajacuarán.

**Moderada peligrosidad.** Se ubican 13 manzanas entre las calles Guadalupe Victoria, Hernán Cortés, Insurgentes, Madero, Galeana e Hidalgo en la colonia Centro – ladera abajo de los afloramientos A2, A3 y A4 – y 5 manzanas entre las calles Hernán Cortés, Francisco I. Madero e Hidalgo en la colonia La Esperanza – ladera abajo de los afloramientos A1 y A2 – dando en total al menos 18 manzanas en la localidad de Pajacuarán.

Asimismo, la zonificación indica el nivel de peligrosidad para los residentes y el daño a la propiedad, y propone las implicaciones para el uso del suelo (Labieuse y Abbruzzese, 2011).

**Muy alta peligrosidad.** Representa las zonas susceptibles a la caída de rocas de muy alta magnitud y alta probabilidad de ocurrencia espacial. Los valores de la energía cinética y altura de salto de los bloques de roca son superiores a 10,000 kJ y 10 m, respectivamente. Por lo tanto, un evento de muy alta magnitud no sería técnicamente manejable a través de medidas de protección estructurales. Las construcciones ubicadas en esta zona pueden sufrir daños graves o, incluso, ser destruidas. Los residentes, tanto fuera como dentro de las construcciones, podrían estar expuestos a un peligro contundente, el cual puede causar la muerte o lesiones físicas graves. Las zonas de muy alta peligrosidad deberían estar prohibidas para el desarrollo urbano y destinarse a otro tipo de uso del suelo. En zonas ya habitadas, se sugieren medidas de protección estructurales y/o no estructurales con elevada capacidad de absorción de energía para reducir la vulnerabilidad de los elementos en riesgo.

**Alta peligrosidad.** Representa las zonas susceptibles a la caída de rocas de alta magnitud y probabilidad de ocurrencia espacial que varía de moderada a alta. Los valores de la energía cinética se encuentran entre 5,000 y 10,000 kJ, y los de altura de salto entre 5 y 10 m. Un evento de alta magnitud se puede mitigar mediante medidas de protección estructurales con elevada capacidad de absorción. Las construcciones ubicadas en esta zona pueden sufrir daños moderados a graves. Los residentes fuera de las construcciones podrían estar expuestos a una peligrosidad elevada y sufrir lesiones físicas, o a una peligrosidad moderada dentro de las mismas. Las zonas de alta peligrosidad deberían estar generalmente prohibidas para el desarrollo urbano o desarrollarse bajo restricciones severas e implementando medidas de protección estructurales y/o no estructurales con elevada capacidad de absorción de energía.

**Moderada peligrosidad.** Representa las zonas susceptibles a la caída de rocas de moderada magnitud y probabilidad de ocurrencia espacial. Los valores de la energía cinética y altura de salto de los bloques de roca son inferiores a 5,000 kJ y 5 m, respectivamente, por lo que se encuentran dentro de los rangos de capacidad de absorción de la mayoría de las medidas de protección estructurales. Las construcciones ubicadas en esta zona pueden sufrir daños leves a moderados. Los residentes fuera de las construcciones podrían estar expuestos a una peligrosidad moderada y sufrir lesiones físicas. Las zonas de moderada peligrosidad deberían desarrollarse bajo ciertas restricciones e implementando medidas de protección estructurales y/o no estructurales con moderada capacidad de absorción de energía y de costo económico accesible.

# Conclusiones

---

Se confirmó la hipótesis de trabajo. Para empezar, el LiDAR terrestre, entre otras técnicas de percepción remota, proporciona información indispensable en la evaluación de la peligrosidad por caída de rocas. Entre las ventajas principales, se puede mencionar la adquisición de datos a alta velocidad, gran precisión y exactitud, y amplia cobertura espacial. Además, su aplicación en el trabajo de campo resulta ser más segura y eficaz que otros métodos de medición. Sobre todo, el procesamiento de las nubes de puntos 3D garantiza la representación precisa de la topografía mediante el modelo digital de elevación de alta resolución.

Por otro lado, a través de *Rockyfor3D*, es posible realizar análisis probabilísticos – regionales, locales y específicos del sitio – de la trayectoria de caída de rocas basados en mapas ráster de los parámetros que definen los bloques inestables y la superficie de la ladera. El cálculo numérico se basa en los coeficientes de restitución normal y tangencial, definidos por el tipo de suelo y rugosidad superficial de la ladera, respectivamente. Todos los datos de entrada, incluyendo la ubicación, litología, forma y tamaño de los fragmentos de roca susceptibles a desprendimiento, se pueden determinar mediante trabajo de campo. La adquisición y procesamiento de los datos de campo representan etapas fundamentales de la metodología, necesarias para obtener resultados válidos que reflejen la peligrosidad por caída de rocas.

Finalmente, aplicar el modelo numérico *Rockyfor3D* resulta ser un método eficaz y relativamente rápido para especificar la idoneidad, ubicación óptima y capacidad de absorción requerida de las medidas de mitigación – estructurales o forestales – contra la caída de rocas. Asimismo, se pueden evaluar las trayectorias de caída y la distribución de energía cinética, altura de salto y velocidad, tanto en planta como a lo largo de perfiles topográficos, para identificar con exactitud las zonas más susceptibles a la caída de rocas.

Los datos de salida de *Rockyfor3D* permitieron evaluar la peligrosidad por caída de rocas en una porción de la falla geología activa de Pajacuarán. La morfología abrupta de la zona de falla – es decir, la geometría y características de la superficie de la ladera – es la que condiciona la trayectoria y probabilidad de alcance. Los bloques de gran volumen que se desprenden de las zonas más elevadas y escarpadas – en los cuatro afloramientos principales – son los que recorren mayor distancia y se depositan a lo largo de todo el margen de la mancha urbana con más proximidad a la falla Pajacuarán.

El mapa de zonificación de la peligrosidad indica que más de 5 manzanas en la colonia Centro de la localidad de Pajacuarán se ubican en una zona de muy alta peligrosidad por caída de rocas, con valores de energía cinética y altura de salto superiores a 10,000 kJ y 10 m, respectivamente. En la zona de alta peligrosidad se ubican al menos 21 manzanas en las colonias Centro y La Esperanza. Los valores de la energía cinética en esta zona se encuentran entre 5,000 y 10,000 kJ, y los de altura de salto entre 5 y 10 m. Por último, aproximadamente 18 manzanas en las colonias Centro y La Esperanza se localizan en la zona de moderada peligrosidad, con valores de energía cinética y altura de salto inferiores a 5,000 kJ y 5 m, respectivamente.

Se debe dar prioridad a evitar que la población se exponga a un evento de gran magnitud a través de la planificación adecuada del uso de suelo, y la prohibición y restricción del desarrollo urbano en zonas de alta peligrosidad. Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación pueden ser de provecho para las autoridades, gestores y técnicos de la localidad con respecto a la priorización de fondos, y la valoración preliminar de medidas de prevención y mitigación por caída de rocas.

A manera de sugerencia, se mencionan algunas futuras líneas de investigación relacionadas a la caída de rocas en Pajacuarán: análisis de peligrosidad de toda la falla Pajacuarán o, al menos, de la porción situada al suroeste de la mancha urbana; análisis de susceptibilidad considerando el mecanismo de falla; análisis de riesgo definiendo el grado de vulnerabilidad de los elementos, y estimando los daños y pérdidas económicas; evaluación del sistema de protección ideal ante la caída de rocas; estudio de las especies endémicas de la zona para la implementación de un bosque de protección; y aplicar la metodología del presente trabajo en diversas áreas de estudio para comparar los coeficientes de restitución según el tipo de suelo y rugosidad superficial.

---

# Referencias

---

- [1] Abbas, M. A., Luh, L. C., Setan, H., Majid, Z., Chong, A. K., Aspuri, A., Idris, K. M., Mohd Ariff, M. F., 2014, Terrestrial laser scanners pre-processing. Registration and georeferencing: *Jurnal Teknologi*, 71(4), 115-122.
- [2] Abellán, A., Asensio, E., Calvet, J., García-Sellés, D., Vilaplana, J. M., 2011, Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning - Case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain): *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(3), 829–841.
- [3] Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., Blanchard, J., 2010, Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring: *Geomorphology*, 119(3–4), 162–171.
- [4] Abellán, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Vilaplana, J. M., 2009, Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: Experiment and application to a rockfall event: *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2), 365–372.
- [5] Abellán, A., Martínez, J., Vilaplana, J. M., 2006, Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain): *Engineering Geology*, 88(3–4), 136–148.
- [6] Agliardi, F., Crosta, G. B., Frattini, P., 2009, Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1059–1073.

- [7] Agliardi, F., Crosta, G., 2003, High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(4), 455–471.
- [8] Aguayo, J. E., Trápaga, R., 1996, Geodinámica de México y minerales del mar (en línea), en *La Ciencia para Todos: Ciudad de México, México, Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa*, <<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/141/htm/geodina.htm>>, acceso libre, consulta: 14 de diciembre de 2016.
- [9] Alatorre-Zamora, M. A., Campos-Enríquez, J. O., Rosas-Elguera, J. G., Peña-García, L., Maciel-Flores, R., Fregoso-Becerra, E., 2015, Chapala half-graben structure inferred. A magnetometric study: *Geofísica Internacional*, 54(4), 323-342.
- [10] Alcántara-Ayala, I., 2000, Landslides. ¿Deslizamientos o movimientos de terreno? Definición, clasificación y terminología: *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 41, 7-25.
- [11] Alcántara-Ayala, I., Borja-Baeza, R. C., López, J. M. 2003, Valoración económica del servicio de ecosistemas. *Prevención de desastres: Ciudad de México, Instituto Nacional de Ecología*, 88 pp.
- [12] Allan, J. F., 1986, Geology of the Northern Colima and Zacoalco grabens, southwest Mexico: Late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, 97, 473-485.
- [13] Allan, J. F., Nelson, S. A., Luhr, J. F., Carmichael, I. S. E., Wopat, M., Wallace, P. J., 1991, Pliocene-Recent rifting in SW Mexico and associated volcanism. An exotic terrane in the making, *in* Dauphin, P. J., Simoneit, B. R. T., (eds.), *The Gulf and peninsular province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 47, 425-445.
- [14] Alor-Ortiz, I., Uribe-Luna, J., 1986, Estudio geológico de La Piedad de Cabadas y paleomagnetismo del norte del Estado de Michoacán: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de licenciatura.
- [15] Armesto, J., Alejano, L., Arias, P., Ordóñez, C., 2009, Terrestrial laser scanning used to determine the geometry of a granite boulder for stability analysis purposes: *Geomorphology*, 106(3–4), 271–277.

- 
- [16] Arriaga, M., Cervantes, G., Vargas, M., 1994, Manual de reforestación con especies nativas. Colecta y preservación de semillas, propagación y manejo de plantas: México Instituto Nacional de Ecología, manual, 219 pp.
- [17] Azzoni, A., de Freitas, M. H., 1995, Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28, 111–124.
- [18] Azzoni, A., La Barbera, G., Zaninetti, A., 1995, Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model: *International Journal Rock Mechanics Mining Sciences*, 32, 709-724.
- [19] Blue Marble Geographics, 2018, GlobalMapper. Getting started guide: Hallowell, Maine, U.S.A., Blue Marble Geographics, guide, 24 pp. Retrieved from [www.blumarblegeo.com](http://www.blumarblegeo.com).
- [20] Blue Marble Geographics, 2019, GlobalMapper user guide in HTML format (online): Hallowell, Maine, U.S.A., Blue Marble Geographics, knowledge base, <<https://www.blumarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-20-1/index.htm>>, free access, consulted: June 5th, 2019.
- [21] Bollinger, D., Gruner, U., Jordan, P., Liniger, M., Rovina, H., 2012, Various methods, different results - on dealing with rockfall modelling in hazard and risk analyses: *Geomechanics and Tunnelling*, 5(4), 347–354.
- [22] Bourrier, F., Eckert, N., Nicot, F., Darve, F., 2009, Bayesian stochastic modeling of a spherical rock bouncing on a coarse soil: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 831–846.
- [23] Bourrier, F., Hungr, O., 2011, Rockfall dynamics. A critical review of collision and rebound models, *in* Lambert, S., Nicot, F. (eds.), *Rockfall engineering*: Hoboken, New Jersey, U.S.A., John Wiley & Sons Inc., 174–209.
- [24] Bozzolo, D., Pamini, R., 1986, Simulation of rock falls down a valley side: *Acta Mechanica*, 63, 113-130.
- [25] Brabb, E. E., Harrod, B. L., 1989, Landslides. Extent and economic significance, *in* 28<sup>th</sup> International Geological Congress. Symposium on landslides, Netherlands. Rotterdam, A. A. Balkema, 385 pp.
- [26] Broilli, L., 1974, Ein Felssturz in Großversuch: *Rock Mechanics Supplement*, 3, 69–78.

- [27] Burton, I., Kates, R. W., 1964, The perception of natural hazards in resource management: *Natural Recourse Journal*, 3(3), 412-441.
- [28] Campbell, J. B., 2002, *Introduction to remote sensing*: London, Taylor & Francis, 621 pp.
- [29] Campos-Enríquez, J. O., Alatorre-Zamora, M. A., 1998, Shallow crustal structure of the junctions of the grabens of Chapala, Tepic-Zacoalco and Colima, Mexico: *Geofísica Internacional*, 37, 263-282.
- [30] Carr, S., Douglas, B., Crosby, C., 2013, *Terrestrial laser scanning (TLS). Field camp manual*: Boulder, Colorado, U.S.A., University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), manual, 26 pp.
- [31] Cascini, L., Bonnard, C. H., Corominas, J., Jibson, R., Montero-Olarte, J., 2005, Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development, *in* *Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver, Rotterdam, Balkema, 199-235.
- [32] Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2014, *Desprendimientos de roca en la ladera norte del cerro La Estrella, municipio de Pajacuarán, Michoacán de Ocampo: Michoacán, México, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), informe*, 14 pp.
- [33] Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olguín, S. L., Lucero-Martínez, R., Espinoza-Rodríguez, J. M., Miranda-Viquez, E., Pineda-Velázquez, A., 1990, Provincias fisiográficas de México, escala 1: 4,000,000, en *Clasificación de regiones naturales de México 1. tomo II, sección IV, 10.*, Atlas nacional de México (1990-1992): Ciudad de México, México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 1 mapa.
- [34] Changoonga, 2013, *Emite SSP recomendaciones para mitigar riesgos en colonias del cerro La Estrella* (en línea): Morelia, Michoacán, fecha de publicación: 23 de noviembre de 2013, noticia municipal, acceso libre, <<http://www.changoonga.com/emite-ssp-recomendaciones-para-mitigar-riesgos-en-colonias-del-cerro-la-estrella/>>, consulta: 05 de diciembre de 2016.

- 
- [35] Chau, K. T., Wong, R. H. C., Wu, J. J., 2002, Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(1), 69-77.
- [36] Chau, K. T., Wu, S. Z., Zhu, W. C., Tang, C. A., Yu, T. X., 2003, Dynamic fracture and fragmentation of spheres, *in* 16<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seattle, U.S.A.
- [37] Chen, G., Zheng, L., Zhang, Y., Wu, J., 2013, Numerical simulation in rockfall analysis. A close comparison of 2-D and 3-D DDA: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 527-541.
- [38] Chuvieco, E., 2007, *Teledetección ambiental: Barcelona, España, Ariel*, 72 pp.
- [39] Clarke, H. D., Seigler, D. S., Ebinger, J. E., 1989, *Acacia farnesiana* (Fabaceae: Mimosoideae) and related species from Mexico, the southwestern U.S., and the Caribbean: *Systematic Botany*, 14, 549-564.
- [40] Clouet, N., Berger, F., Liévois, J., 2012, Rockfall modelling and risk zoning. A case study in the French Alps using geomatics, airborne laser scanning, 2D & 3D runout models, *in* 12<sup>th</sup> Congress INTERPRAEVENT, Grenoble, France: Conference Proceedings, 479-486.
- [41] Comisión Estatal del Agua (CEA), 2011, *Aves del Lago de Chapala: Jalisco, México, Comisión Estatal del Agua (CEA) de Jalisco, folleto informativo*, 19 pp.
- [42] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tizapán (1429), Estado de Jalisco: Jalisco, México, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Diario Oficial de la Federación*, 31 pp.
- [43] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015a, *Estaciones climatológicas: Michoacán, México, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Meteorológico Nacional, Datos de la estación San Simón 16220*, 13 pp.
- [44] Copons-Llorens, R., Tallada-Masquef, A., 2009, *Movimientos de ladera: Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 284-297.
- [45] Corominas, J., Mavrouli, O., Ruiz-Carulla, R., 2017, Rockfall occurrence and fragmentation, *in* 4<sup>th</sup> World Landslide Forum, Liubliana, Eslovenia: *Advancing Culture of Living with Landslides*, Sassa *et al.* (eds.), 75-97.

- [46] Corona, C., Trappmann, D., Stoffel, M., 2013, Parameterization of rockfall source areas and magnitudes with ecological recorders. When disturbances in trees serve the calibration and validation of simulation runs: *Geomorphology*, 202, 33-42.
- [47] Crosta, G. B., Agliardi, F., 2003, A methodology for physically based rockfall hazard assessment: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 407-422.
- [48] Crosta, G. B., Agliardi, F., Frattini, P., Imposimato, S., 2004, A three-dimensional hybrid numerical model for rockfall simulation: *Geophysical Research Abstracts*, 6, 04502.
- [49] Crosta, G. B., Frattini, P., Imposimato, S., Agliardi, F., 2006, Modeling vegetation and fragmentation effects on rockfalls: *Geophysical Research Abstracts*, 8, 07694.
- [50] Crozier, M. J., Glade, T., 2005, Landslide hazard and risk. Issues, concepts and approach, *in* Glade, T., Anderson, M., Crozier, M. J. (eds.), *Landslide hazard and risk: U.S.A.*, John Wiley & Sons, 1-40.
- [51] Cruden, D. M., 1991, A simple definition of a landslide: *Bulletin International Association for Engineering Geology*, 43, 27-29.
- [52] Cruden, D. M., 1993, *The multilingual landslide glossary*: Richmond., British Columbia, Bitech Publishers, for the UNESCO Working Party on World Landslide Inventory in 1993, 32 pp.
- [53] Delgado, G. H., 1992, Importancia de los estudios estratigráficos en la FVT para la comprensión de su evolución y origen. El caso del grupo Chapala: *GEOS boletín, Unión Geofísica Mexicana*, 12, 5-13.
- [54] Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Revista de la Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, 2(2), 172-187.
- [55] DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., Stein, S., 1994, Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions: *Geophysical Research Letters*, 21, 2191- 2194.
- [56] DeMets, C., Traylen, S., 2000, Motion of the Rivera plate since 10 Ma relative to the Pacific and North American and the mantle: *Tectonophysics*, 318, 119-159.

- 
- [57] Derron, M. H., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., Michoud, C., Villemin, T., 2011, Remote sensing and monitoring techniques for the characterization of rock mass deformation and change detection, *in* Lambert, S., Nicot, F. (eds.), *Rockfall Engineering*: Hoboken, New Jersey, U.S.A., John Wiley & Sons Inc., 39–58.
- [58] Diebel, J., Norda, J., Kretchmer, O., 2016, El clima promedio en Pajacuarán, México (en línea): Minneapolis, Minnesota, U.S.A., Cedar Lake Ventures, actualización: 31 de diciembre de 2016, acceso libre, <<https://es.weatherspark.com/y/4176/Clima-promedio-en-Pajacuar%C3%A1n-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>>, consulta: 05 de diciembre de 2018.
- [59] Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M. L., 1996, *Landslide recognition. Identification, movement and causes*: Chichester, U.K., John Wiley & Sons, 274 pp.
- [60] Dorren, L. K. A., 2003, A review of rockfall mechanics and modelling approaches: *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69-87.
- [61] Dorren, L. K. A., 2011, Rockyfor3D (v4.0) revealed – Description of the complete 3D rockfall model: Geneva, Switzerland, Int. ecorisQ Association, ecorisQ paper, 21 pp. Retrieved from [www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org).
- [62] Dorren, L. K. A., 2016, Rockyfor3D (v5.2) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model: Geneva, Switzerland, Int. ecorisQ Association, ecorisQ paper, 33 pp. Retrieved from [www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org).
- [63] Dorren, L. K. A., Berger, F., Le Hir, C., Mermin, E., Tardif, P., 2005, Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests: *Forest Ecology and Management*, 215(1-3), 183-195.
- [64] Dorren, L. K. A., Berger, F., Putters, U. S., 2006, Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and nonforested slopes: *Natural Hazards and Earth System Science*, 6, 145–153.
- [65] Dorren, L. K. A., Domaas, U., Kronholm, K., Labiouse, V., 2011, Methods for predicting rockfall trajectories and run-out zones, *in* Lambert, S., Nicot, F. (eds.), *Rockfall engineering*: Hoboken, New Jersey, U.S.A., John Wiley & Sons Inc., 143–173.

- [66] Dorren, L. K. A., Maier, B., Putters, U. S., Seijmonsbergen, A. C., 2004, Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps: *Geomorphology*, 57(3), 151-167.
- [67] Dorren, L. K. A., Seijmonsbergen, A. C., 2003, Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale: *Geomorphology*, 56(1-2), 49-64.
- [68] Durón-Díaz, J.J., 2007, Modelos digitales de elevación para el continuo de elevaciones mexicano: Aguascalientes, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), manual, 24 pp.
- [69] Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2018, ArcGIS Desktop. ArcMap: Redlands, California, U.S.A., Environmental Systems Research Institute, Inc., knowledge base, < <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>>, free access, consulted: June 5th, 2019.
- [70] EPOCH, 1993, The temporal occurrence and forecasting of landslides, *in* Flageollet, J. C. (ed.), the European community, Contract No. 90 0025, 3 volumes.
- [71] Federman, A., Santana-Quintero, M., Kretz, S., Gregg, J., Lengies, M., Ouimet, C., Laliberte, J., 2017, UAV photogrammetric workflows. A best practice guideline, *in* 26<sup>th</sup> International CIPA Symposium 2017, Ottawa, Canada: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 237-244.
- [72] Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W. Z. on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, 2008, Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning: *Engineering Geology*, 102(3-4), 85-98.
- [73] Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S., Leroi, E., 2005, A framework for landslide risk assessment and management, *in* *Landslide Risk Management*: London, Taylor & Francis Group, 3-25.
- [74] Feng, Q., Röshoff, K., 2015, A survey of 3D laser scanning techniques for application to rock mechanics and rock engineering, *in* Ulusay, R. (ed.), *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*: Switzerland, Springer, 265-293.

- 
- [75] Ferrari, L., 2000, Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 84-92.
- [76] Francioni, M., Salvini, R., Stead, D., Coggan, J., 2017, Improvements in the integration of remote sensing and rock slope modelling: *Natural Hazards*, 90(2), 975–1004.
- [77] Frattini, P., Crosta, G., Agliardi, F., 2012, Rockfall characterization and modeling, *in* Clague, J. J., Stead, D. (eds.), *Landslides. Types, Mechanisms and Modeling*: New York, U.S.A., Cambridge University Press, 267-281.
- [78] Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., Agliardi, F., 2008, Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches: *Geomorphology*, 94, 419–437.
- [79] Frattini, P., Valagussa, A., Zenoni, S., Crosta, G. B., 2013, Calibration and validation of rockfall models, *in* EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria, 7 - 12 April 2013, *Geophysical Research Abstracts*, 15, 11059.
- [80] Garduño-Monroy, V. H., Spinnler, J., Ceragioli, E., 1993, Geological and structural study of the Chapala rift, state of Jalisco, Mexico: *Geofísica Internacional*, 32(3), 487-499.
- [81] Geist, T., Hofle, B., Rutzinger, M., Pfeifer, N., Stotter, J., 2009, Laser scanning - a paradigm change in topographic data acquisition for natural hazard management, *in* *Sustainable Natural Hazard Management in Alpine Environment: Switzerland*, Springer, 309-344.
- [82] Gigli, G., Casagli, N., 2013, Extraction of rock mass structural data from high resolution laser scanning products, *in* Margottini *et al.* (eds.), *Landslide Science and Practice 3: Switzerland*, Springer, 89-94.
- [83] Gigli, G., Frodella, W., Garfagnoli, F., Morelli, S., Mugnai, F., Menna, F., Casagli, N., 2014a, 3D geomechanical rock mass characterization for the evaluation of rockslide susceptibility scenarios: *Landslide*, Springer, 11, 131-140.
- [84] Gigli, G., Morelli, S., Fornera, S., Casagli, N., 2014b, Terrestrial laser scanner and geomechanical surveys for the rapid evaluation of rock fall susceptibility scenarios: *Landslide*, Springer, 11, 1-14.

- [85] Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., 2005, Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana, *en* Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana: Juriquilla, Querétaro, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57(2), 227-283.
- [86] González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002, Riesgos geológicos, *en* Capella, I., Ayerra, S. (eds.), Ingeniería geológica: Madrid, España, Pearson Education, 744 pp.
- [87] Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M., 2001, Application of high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements, *in* 10<sup>th</sup> FIG International Symposium on Deformation Measurements: California, U.S.A., 23–32.
- [88] Gutiérrez-Nájera, R., Barba-Calvillo, G., Del Toro-Gaytán, M. R., 2008, Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) - Versión 2006-2008: Jalisco, México, ficha informativa, 50 pp.
- [89] Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999, Landslide hazard evaluation. A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy: *Geomorphology*, 31, 181-216.
- [90] Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., 2002, STONE. A computer program for the three-dimensional simulation of rockfalls: *Computers and Geosciences*, 28, 1081–1095.
- [91] Heidenreich, B., 2004, Small- and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes: Switzerland, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, PhD thesis, 243 pp.
- [92] Hoek, E., Bray, J. W., 1981, Rock slope engineering: London, The Institution of Mining and Metallurgy, 402 pp.
- [93] Hungr, O., Evans, S., 1988, Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards, *in* 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland: Rotterdam, A. A. Balkema, 1, 685–690.
- [94] Hutchinson, J. N., 1988, Morphology and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, *in* 5<sup>th</sup> International Symposium on landslides: Lausanne, 3-35.
- [95] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000, XII Censo General de Población y Vivienda 2000 (en línea): México, clave geoestadística 16062,

- 
- <<https://www.inegi.org.mx/sistemas/scitel/Default?ev=5>>, acceso libre en el Sistema de Consulta de Integración Territorial, Entorno Urbano y Localidad (SCITEL), consulta: 20 de diciembre de 2018.
- [96] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2002, Carta Topográfica Pajacuarán F13D88, escala 1: 50,000: Aguascalientes, México, INEGI, Dirección General de Geografía, edición 4, 1 mapa.
- [97] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2009, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Pajacuarán, Michoacán de Ocampo (en línea): México, clave geoestadística 16062, <<http://inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/16/16040.pdf>>, acceso libre, consulta: 04 de noviembre de 2016.
- [98] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010, Censo de Población y Vivienda 2010 (en línea): México, clave geoestadística 16062, <<https://www.inegi.org.mx/sistemas/scitel/Default?ev=5>>, acceso libre en el Sistema de Consulta de Integración Territorial, Entorno Urbano y Localidad (SCITEL), consulta: 20 de diciembre de 2018.
- [99] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2013, Carta Edafológica Guadalajara F13-12, escala 1: 250,000: México, D.F., INEGI, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, serie II, edición 1, 1 mapa.
- [100] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2015, Carta Uso del Suelo y Vegetación Guadalajara F13-12, escala 1: 250,000: México, D.F., INEGI, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, serie V, edición 1, 1 mapa.
- [101] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2017, Recursos naturales. Edafología (en línea): México, < <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/cartaedafologica.aspx>>, acceso libre, consulta: 01 de junio de 2016.
- [102] Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED), s.f., Pajacuarán, estado de Michoacán de Ocampo (en línea), en Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México: México, <<http://www.inafed.gob.mx/>

work/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16062a.html>, acceso libre, consulta: 14 de diciembre de 2017.

- [103] International Union of Geological Sciences (IUGS) Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment, 1997, Quantitative risk assessment for slopes and landslides. The state of the art, *in* Cruden, D. M., Fell, R. (eds), *Landslide Risk Assessment*: Rotterdam, Netherlands, Balkema, 3–12.
- [104] International Union of Soil Science (IUSS) Grupo de Trabajo WRB, 2007, Base referencial mundial del recurso suelo: Roma, Italia, Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), International Union of Soil Science (IUSS), International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos*, 103, 130 pp.
- [105] Kirkby, M. J., Statham, I., 1975, Surface stone movement and scree formation: *Journal of Geology*, 83, 349–362.
- [106] Kliche, C. A., 1999, Kinematic slope stability analysis, *in* *Rock Slope Stability*: U.S.A., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 273.
- [107] Komar, P. D., 1987, Selective gravel entrainment and the empirical evaluation of flow competence: *Sedimentology*, 34(6), 1165–1176.
- [108] Labiouse, V., Abbruzzese, J. M., 2011, Rockfall hazard zoning for land use planning, *in* Lambert, S., Nicot, F. (eds.), *Rockfall engineering*: Hoboken, New Jersey, U.S.A., John Wiley & Sons Inc., 211–253.
- [109] Labiouse, V., Heidenreich, B., 2009, Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1981–1993.
- [110] Lemmens, M., 2011, Terrestrial laser scanning, *in* Gatrell, J. D., Jensen, R. R. (eds.), *Geo-information. Geotechnologies and the Environment*: Dordrecht, Springer, 5, 101–121.
- [111] Márquez, A., 2010, *Un tratado sobre el escáner terrestre TLS*: Venezuela, Mediciones Científicas e Industriales C. A. (MECINCA), manual, 31 pp.
- [112] Martin, A. C., Zim, H. S., Nelson, A. L., 1951, *American wildlife and plants. A guide to wildlife food habits*: New York, U.S.A., Dover Publications, guide, 500 pp.

- 
- [113] Martínez-Reyes, J., Nieto-Samaniego, A. F., 1990, Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 9(1), 33-50.
- [114] Mas, J. F., Ramírez, M. I., 2011. Percepción remota. Conceptos básicos y técnicas de análisis recientes, *en* Bautista, F. (ed.), Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales: Instituto Nacional de Ecología, 735-770.
- [115] Mateos, R. M., García-Moreno, I., Reichenbach, P., Herrera, G., Sarro, R., Rius, J., Aguiló, R., Fiorucci, F., 2016, Calibration and validation of rockfall modelling at regional scale. Application along a roadway in Mallorca (Spain) and organization of its management: Landslides, 13, 751-763.
- [116] Mazzanti, P., Brunetti, A., Bretschneider, A., 2015, A new approach based on terrestrial remote-sensing techniques for rock fall hazard assessment, *in* Modern Technologies for Landslide Monitoring and Predictions: Switzerland, Springer Natural Hazards, 69-87.
- [117] Moore, G., Marone, C., Carmichael, I.S.E., Renne, P., 1994, Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt: Geological Society of America Bulletin, 106, 383-394.
- [118] Noticias en Michoacán, 2013, Desalojan a 400 habitantes de Pajacuarán (en línea): Morelia, Michoacán, fecha de publicación: 11 de noviembre de 2013, noticia municipal, acceso libre, <<https://noticiasenmichoacancommx.wordpress.com/2013/11/11/desalojan-a-400-habitantes-de-pajacuaran/>>, consulta: 05 de diciembre de 2016.
- [119] Oporto-Gallardo, R. B., 2006, Estudios de fenómenos de remoción en masa. Sector Niebla - San Ignacio Comuna de Valdivia 10ª Región: Chile, Universidad Austral de Chile, Instituto de Obras Civiles, tesis de licenciatura, 200 pp.
- [120] Pacheco, J. F., Mortera-Gutiérrez, C. A., Delgado, H., Singh, S. K., Valenzuela, R. W., Shapiro, N. M., Santoyo, M. A., Hurtado, A., Barron, R., Gutiérrez-Moguel, E., 1999, Tectonic significance of an earthquake sequence in the Zacoalco half-graben, Jalisco, Mexico: Journal of South American Earth Sciences, 12, 557-565.

- [121] Pardo, M., Suárez, G., 1993, Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco Block in western Mexico: *Geophysical Research Letters*, 20, 2391-2394.
- [122] Pardo, M., Suárez, G., 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plate in southern Mexico. Seismic and tectonic implications: *Journal of Geophysical Research*, 100, 12357-12373.
- [123] Pasquarè, G., Ferrari, L., Garduño, V. H., Tibaldi, A., Vezzoli, L., 1991, Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico: Geological Society of America, Map and Charts Series, MCH072.
- [124] Peng, B., 2000, Rockfall trajectory analysis. Parameter determination and application: Christchurch, New Zealand, University of Canterbury, master's thesis, 211 pp.
- [125] Petley, D. N., 2012, Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding, *in* Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A. K., Leroueil, S., (eds.), *Landslides and engineered slopes*. Vol. 1: London, CRC Press, 3–13.
- [126] Pfeiffer, T., Bowen, T., 1989, Computer simulation of rockfalls: *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 26, 135–146.
- [127] Pichler, B., Hellmich, Ch., Mang, H. A., 2005, Impact of rocks onto gravel. Design and evaluation of experiments: *International Journal of Impact Engineering* 31, 559-578.
- [128] Pratesi, F., Bianchini, S., Casagli, N., Fanti, R., Leva, D., Lombardi, L., Nolesini, T., 2015, Early warning GBInSAR-based method for monitoring Volterra (Tuscany, Italy) city walls: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4), 1753–1762.
- [129] Quadratín, 2013, Cae roca de un cerro y destroza viviendas en Pajacuarán (en línea): Morelia, Michoacán, fecha de publicación: 09 de noviembre de 2013, noticia municipal, acceso libre, <<https://www.quadratín.com.mx/principal/Cae-roca-de-un-cerro-y-destroza-viviendas-en-Pajacuaran/>>, consulta: 05 de diciembre de 2016.
- [130] Ramírez-Sánchez, A. K., Corona-Bojorge, C., Sánchez-Allar, Y. J., 2015, Material de difusión del patrimonio paleontológico y arqueológico de la Ciénega de Chapala: Michoacán, México, *Página Seis*, 82 pp.

- 
- [131] RIEGL Laser Measurement Systems, 2015a, Operating & processing software RiSCAN PRO for RIEGL 3D laser scanners: Horn, Austria, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, data sheet, 4 pp. Retrieved from [www.riegl.com](http://www.riegl.com).
- [132] RIEGL Laser Measurement Systems, 2015b, RIEGL VZ-1000. 3D terrestrial laser scanning with online waveform processing: Horn, Austria, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, data sheet, 4 pp. Retrieved from [www.riegl.com](http://www.riegl.com).
- [133] Ritchie, A. M., 1963, Evaluation of rockfall and its control: Washington D.C., Highway Research Board - NRC, Highway Research Record 17, 13–28.
- [134] Rosas-Elguera, J., Barrera-Hernández, D., Valladolid-Cacho, R., Pérez-Rodríguez, G., Sánchez-González, A., Maldonado-Sánchez, G., 2000, Carta Geológica-Minera Guadalajara F13-12, escala 1: 250,000: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano (SGM), edición 1, 1 mapa con texto.
- [135] Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J., 1998, The tectonic control on the volcano-sedimentary sequence of the Chapala graben, western México: *International Geology Review*, 40, 350-362.
- [136] Salamanca-Céspedes, J. E., Pérez-Castillo, J. N., 2008, LIDAR. Una tecnología de última generación para planeación y desarrollo urbano: *Ingeniería*, 13(1), 67-76.
- [137] Schober, A., Bannwart, C., Keuschnig, M., 2012, Rockfall modelling in high alpine terrain – validation and limitations: *Mechanics and Tunnelling*, 5(4), 368-378.
- [138] Sellmeier, B., 2015, Quantitative parameterization and 3D-run-out modelling of rockfalls in steep limestone cliffs in the Bavarian Alps: Germany, Technische Universität München, PhD thesis, 159 pp.
- [139] senseFly, 2014, eBee senseFly extended user manual: Switzerland, senseFly Ltd., user manual, 166 pp. Retrieved from [www.sensefly.com](http://www.sensefly.com).
- [140] senseFly, 2017, eBee senseFly. El dron de cartografía profesional: Suiza, senseFly Ltd., ficha de datos, 6 pp. Recuperado de [www.sensefly.com](http://www.sensefly.com).

- [141] Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2008, Carta Geológica-Minera Estado de Michoacán, escala 1: 500,000: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano (SGM), edición 1, 1 mapa.
- [142] Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2017, Sismología de México (en línea): Pachuca, Hidalgo, Servicio Geológico Mexicano, actualización: 06 de octubre de 2017, <<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>>, acceso libre, consulta: 14 de diciembre de 2017.
- [143] Shervais, K., 2015, Structure from Motion introductory guide: Boulder, Colorado, U.S.A., University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), guide, 18 pp.
- [144] Shervais, K., 2016, Structure from Motion (SfM) photogrammetry field methods manual for students: Boulder, Colorado, U.S.A., University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), manual, 10 pp.
- [145] Singh, R. P., Kumar-Upadhyay, V., Das, A., 1987, Weathering potential index for rocks based on density and porosity measurements: Proceedings of the Indian Academy of Sciences. Earth and Planetary Sciences, 96(3), 239-247.
- [146] Slob, S., Hack, R., 2004, 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique, *in* Azzam, R., Charlier, R., Hack, R. (eds.), Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe: A European Perspective: Switzerland, Springer, 179–189.
- [147] Statham, I., 1976, A scree slope rockfall model: Earth Surf Process, 1, 43–62.
- [148] Stevens, W. D., 1998, Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls: Canada, University of Toronto, master's thesis, 38 pp.
- [149] Suarez-Díaz, J., 1998, Caracterización de los movimientos, *en* Acevedo-Prada, C., Silva-Sarquez, L.L., (eds.), Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales: Colombia, Ingeniería de Suelos Ltda., 1-30.
- [150] Suarez-Díaz, J., 2009, Control de caídos y deslizamientos en roca, *en* Deslizamientos. Técnicas de remediación. Vol. II: Colombia, Universidad Industrial de Santander, 313-360.

- 
- [151] Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., 2005, Procesos gravitacionales. La fuerza de la gravedad, *en* Martín-Romo, M., Caicoya, M., (eds.), Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física: Madrid, España, Pearson Education, 736 pp.
- [152] Thanh Vo, D., 2015, RAMMS::Rockfall versus Rockyfor3D in rockfall trajectory simulations at the community of Vik, Norway: Norway, University of Oslo, master's thesis, 62 pp.
- [153] Transportation Research Board (TRB), 1996, Landslides. Investigation and mitigation: U.S.A., Transportation Research Board (TRB), special report 247, 673 pp.
- [154] Troisi, C., Berger, F, Dorren, L., 2008, Protection of alpine viability: PROVIALP project report, Interreg IIIa 200 - 2006 Latin Alps N° 165, ARPA/Cemagref,
- [155] Turner, A. K., Jayaprakash, G. P., 2012, Introduction, *in* Turner, A. K., Schuster, R. L. (eds.), Rockfall characterization and control: Washington D.C., Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 3–20.
- [156] Uehara, J. S., Ambroso, M. A, Ojha, R. P., Durian, D. J., 2003, Low–speed impact craters in loose granular media: Physical Review Letters, 90(19), 194301.
- [157] University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), 2013, Riegl TLS field operation manual and workflow: Boulder, Colorado, U.S.A., University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), manual, 26 pp.
- [158] Urrutia-Fucugauchi, J., Rosas-Elguera, J., 1994, Paleomagnetic study of the eastern sector of Chapala Lake and implications for the tectonics of west-central Mexico: Tectonophysics, 239, 61-71.
- [159] Van Veen, M., Hutchinson, D. J., Bonneau, D. A., Sala, Z., Ondercin, M., Lato, M., 2018, Combining temporal 3-D remote sensing data with spatial rockfall simulations for improved understanding of hazardous slopes within rail corridors: Natural Hazards and Earth System Sciences, 18, 2295-2308.
- [160] Vanneschi, C., Di Camillo, M., Aiello, E., Bonciani, F., Salvini, R., 2019, SfM-MVS photogrammetry for rockfall analysis and hazard assessment along the ancient Roman Via Flaminia road at the Furlo Gorge (Italy): International Journal of Geo-Information, 8(8), 325.

- [161] Varnes, D. J., 1978, Slope movement types and processes, *in* Schuster, R. L., Krizek, R. J. (eds.), *Landslides - Analysis and control*. National Research Council: Washington D.C., Transportation Research Board, special report, 176, 11-33.
- [162] Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., Jaboyedoff, M., 2011, Rockfall characterization and structural protection -a review: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2617-2651.
- [163] Winkler, E. M., 1975, Properties of stone, in *Stone. Properties, durability in man's environment*: New York, U.S.A., Springer, 27-50.
- [164] Wyllie, D. C., 2015, Rock falls – Causes and consequences, *in* *Rock Fall Engineering*: Florida, U.S.A., CRC Press, 1-13.
- [165] Zárata del Valle, P. F., Simoneit, B. R. T., 2005, La generación de petróleo hidrotermal en sedimentos del Lago de Chapala y su relación con la actividad geotérmica del rift Citala en el estado de Jalisco, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), 358-370.

---

# Nomenclatura

---

$e_N = R_N$	Coeficiente de restitución normal
$e_T = R_T$	Coeficiente de restitución tangencial
$g$	Aceleración gravitacional ( $m/s^2$ )
$h$	Altura de salto vertical a la ladera (m)
$L$	Longitud de trayectoria entre dos puntos de impacto (m)
$m$	Masa de un bloque de roca (kg)
$n, n+1$	Punto de impacto
$R$	Resistencia a la fricción en el punto de impacto
$r$	Radio de un bloque de roca (m)
$s$	Dimensión que define la rugosidad superficial de la ladera (m)
$V_f = V_0$	Velocidad del centro de masa, final o de restitución en el momento $t = f$ (m/s)
$V_{fN}$	Componente normal de la velocidad final del centro de masa (m/s)
$V_{fT}$	Componente tangencial de la velocidad final del centro de masa (m/s)
$V_i$	Velocidad del centro de masa, inicial o de impacto en el momento $t = 0$ (m/s)
$V_{iN}$	Componente normal de la velocidad de impacto del centro de masa (m/s)
$V_{iT}$	Componente tangencial de la velocidad de impacto del centro de masa (m/s)

$V_N$	Componente normal de la velocidad (m/s)
$V_T$	Componente tangencial de la velocidad (m/s)
$\alpha_0$	Ángulo del vector de velocidad relativo al eje X positivo ( $^\circ$ )
$\varepsilon$	Ángulo que define la rugosidad superficial de la ladera (m)
$\vartheta_f = \vartheta_0$	Ángulo final o de restitución relativo a la superficie de la ladera ( $^\circ$ )
$\vartheta_i$	Ángulo inicial o de impacto relativo a la superficie de la ladera ( $^\circ$ )
$\mu$	Coefficiente de fricción o de rozamiento dinámico
$\varphi$	Ángulo de reposo, de fricción o de rozamiento interno ( $^\circ$ )
$\psi_s$	Ángulo de inclinación de la ladera ( $^\circ$ )
$\omega$	Velocidad angular o rotacional (rad/s)

---

# Acrónimos

---

<b>2D</b>	Bidimensional o Dos Dimensiones
<b>3D</b>	Tridimensional o Tres Dimensiones
<b>ASCII</b>	Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información ( <i>American Standard Code for Information Interchange</i> )
<b>ASPRS</b>	Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección ( <i>American Society of Photogrammetry and Remote Sensing</i> )
<b>CEA</b>	Comisión Estatal del Agua
<b>CENAPRED</b>	Centro Nacional de Prevención de Desastres
<b>COBAEM</b>	Colegio de Bachilleres del Estado de Michoacán
<b>CONACYT</b>	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional del Agua
<b>CRSP</b>	Programa de Simulación de Caída de Rocas de Colorado ( <i>Colorado Rockfall Simulation Program</i> )
<b>DBH</b>	Diámetro del Tallo a la Altura del Pecho ( <i>Stem Diameter at Breast Height</i> )
<b>DSLR</b>	Réflex Digital de un Solo Lente ( <i>Digital Single Lens Reflex</i> )
<b>EPOCH</b>	Programa de la Comunidad Europea ( <i>European Community Programme</i> )

<b>ESRI</b>	Instituto de Investigaciones en Sistemas Ambientales ( <i>Environmental Systems Research Institute</i> )
<b>FVTM</b>	Faja Volcánica Transmexicana
<b>GNSS</b>	Sistema Global de Navegación por Satélite ( <i>Global Navigation Satellite System</i> )
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamiento Global ( <i>Global Positioning System</i> )
<b>GUI</b>	Interfaz Gráfica de Usuario ( <i>Graphical User Interface</i> )
<b>IMU</b>	Unidad de Medida Inercial ( <i>Inertial Measurement Unit</i> )
<b>INAFED</b>	Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal
<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
<b>INICIT</b>	Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra
<b>IUGS</b>	Unión Internacional de Ciencias Geológicas ( <i>International Union of Geological Sciences</i> )
<b>IUSS</b>	Unión Internacional de Ciencia del Suelo ( <i>International Union of Soil Science</i> )
<b>InSAR</b>	Radar Interferométrico de Apertura Sintética ( <i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i> )
<b>LiDAR</b>	Detección por Luz y Distancia ( <i>Light Detection and Ranging</i> )
<b>MDE</b>	Modelo Digital de Elevación
<b>MDS</b>	Modelo Digital de Superficie
<b>MDT</b>	Modelo Digital de Terreno
<b>MOH</b>	Altura Media del Obstáculo ( <i>Mean Obstacle Height</i> )
<b>NAVSTAR</b>	Sistema de Navegación por Tiempo y Distancia ( <i>Navigation System with Timing and Ranging</i> )
<b>PRM</b>	Procesos de Remoción en Masa

---

<b>RADAR</b>	Detección y Medición de Distancias por Radio ( <i>Radio Detection and Ranging</i> )
<b>RES<sub>MDE</sub></b>	Resolución del Modelo Digital de Elevación
<b>RGB</b>	Rojo, Verde, Azul ( <i>Red, Green, Blue</i> )
<b>RTK</b>	Cinemático en Tiempo Real ( <i>Real Time Kinematic</i> )
<b>SAR</b>	Radar de Apertura Sintética ( <i>Synthetic Aperture Radar</i> )
<b>SAT<sub>RA</sub></b>	Umbral del Ángulo de Pendiente para la Zona de Desprendimiento de Caída de Rocas ( <i>Slope Angle Threshold for Rockfall Release Areas</i> )
<b>SEGOB</b>	Secretaría de Gobernación
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográfica
<b>SGM</b>	Servicio Geológico Mexicano
<b>TIN</b>	Red Irregular de Triángulos ( <i>Triangular Irregular Network</i> )
<b>TLS</b>	Escáner Láser Terrestre ( <i>Terrestrial Laser Scanner</i> )
<b>TRB</b>	Junta de Investigación de Transporte ( <i>Transportation Research Board</i> )
<b>UAV</b>	Vehículo Aéreo No Tripulado ( <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> )
<b>UMSNH</b>	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
<b>UNAM</b>	Universidad Nacional Autónoma de México
<b>UNAVCO</b>	Consortio NAVSTAR de la Universidad ( <i>University NAVSTAR Consortium</i> )
<b>UNESCO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura ( <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i> )
<b>USGS</b>	Servicio Geológico de los Estados Unidos ( <i>United States Geological Survey</i> )



---

# Terminología

---

A continuación, se definen algunos términos fundamentales para la comunicación y comprensión respecto a los procesos de remoción en masa (Crozier y Glade, 2005). La mayoría de las definiciones están de acuerdo con las propuestas por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, 1997) y han sido revisados por el Comité Técnico Conjunto de Deslizamientos y Taludes (Fell *et al.*, 2008).

**Desastre:** Una interrupción grave del funcionamiento de la sociedad, que causa pérdidas humanas, materiales o del medio ambiental, y que excede la capacidad de la sociedad afectada para hacer frente utilizando solo sus propios recursos. Se clasifican según su causa en naturales o antrópicos.

**Elementos en riesgo:** Las personas, bienes, edificios, infraestructura, actividades económicas, servicios públicos o cualquier otro valor definido expuesto a los peligros en un área determinada.

**Evento:** Un incidente o situación que ocurre en un lugar particular durante un intervalo de tiempo determinado.

**Exposición:** La duración o proporción de tiempo que las personas, bienes, edificios, infraestructura u otra entidad corre un riesgo. El capital fijo varía permanentemente la proporción y la intensidad de la exposición. Los problemas de comportamiento de rutina también hacen que la exposición varíe.

**Frecuencia:** Una medida de probabilidad expresada como el número de eventos que ocurren en un periodo dado. La unidad básica de tiempo utilizada en el análisis de frecuencia es el

año. Por ejemplo, una frecuencia de cinco eventos ( $n$ ) registrados en un período de 100 años ( $t$ ) también se puede expresar como una frecuencia promedio ( $T$ ) de un evento cada 20 años en promedio, denominada *período de retorno* o *intervalo de recurrencia*. El recíproco del período de retorno expresado en años proporciona la probabilidad anual. En este ejemplo,  $1/20$  produce una probabilidad anual de 0.05. En otras palabras, hay un 5% de *probabilidad de ocurrencia* en un año, en promedio.

**Mitigación:** Medidas a mediano y largo plazo tomadas antes de un desastre destinadas a disminuir o eliminar su impacto en la sociedad y el medio ambiente. Los métodos se dividen en estructural, semiestructurales y no estructurales.

**Peligro:** Una entidad física real – proceso o situación – potencialmente perjudicial que puede causar la pérdida de vidas, lesiones, daños a la propiedad, trastornos sociales o económicos, y la degradación ambiental.

**Peligrosidad:** Una condición amenazante expresada como la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período de tiempo específico y en un área determinada, para un fenómeno particular potencialmente dañino de una magnitud e intensidad dada.

**Período de retorno (intervalo de recurrencia):** Una estimación de la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado en un periodo dado. Véase *frecuencia*.

**Prevención:** Actividades diseñadas para proporcionar protección permanente contra los desastres, y para minimizar la pérdida de vidas y daños. Incluye ingeniería y otras medidas de protección física, y también medidas legislativas que controlan el uso del suelo, la planificación del territorio y el desarrollo urbano.

**Probabilidad de ocurrencia:** La inversa del periodo de retorno y puede ser expresada como probabilidad de ocurrencia anual ( $P_a$ ) o como probabilidad de ocurrencia a largo plazo ( $P_x$ ), donde  $x$  es un número de años dado. La siguiente expresión estadística convierte  $P_a$  en  $P_x$ :  $P_x = 1 - (1 - P_a)^x$ . Véase *frecuencia*.

**Probabilidad:** Una medida del grado de certeza, estimado por la relación de resultados específicos al número total de resultados posibles. Se expresa como un número entre 0 (imposibilidad) y 1 (certeza).

**Riesgo:** Una medida de la probabilidad y la pérdida de los elementos en riesgo, debido a un peligro particular para un área determinada y un período de referencia. Según los cálculos matemáticos, el riesgo es producto del peligro y la vulnerabilidad.

**Susceptibilidad:** Una evaluación cuantitativa o cualitativa de la clasificación, volumen y distribución espacial de un peligro – existente o potencial – en un área determinada. Puede incluir una descripción de la velocidad e intensidad del fenómeno. Se espera que un evento ocurra con mayor frecuencia en áreas más susceptibles, sin embargo, el análisis de susceptibilidad no considera explícitamente la ocurrencia temporal.

**Vulnerabilidad:** El grado esperado de pérdida de un elemento o conjunto de elementos en riesgo resultante de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada. Está directa pero inversamente relacionado con las cualidades elásticas del elemento en riesgo. Puede estar indirectamente relacionado con la pobreza, la falta de mitigación, la falta de poder político y la marginación, pero ninguno de estos factores puede predecirlo completamente. Se expresa en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total), referido como la relación de daño en casos de pérdida cuantificable.

**Zonificación:** La división de un área geográfica en sectores homogéneos y su clasificación de acuerdo a criterios particulares como el grado de susceptibilidad, peligrosidad o riesgo – existente o potencial – así como la aplicabilidad de ciertas regulaciones relacionadas con la peligrosidad.



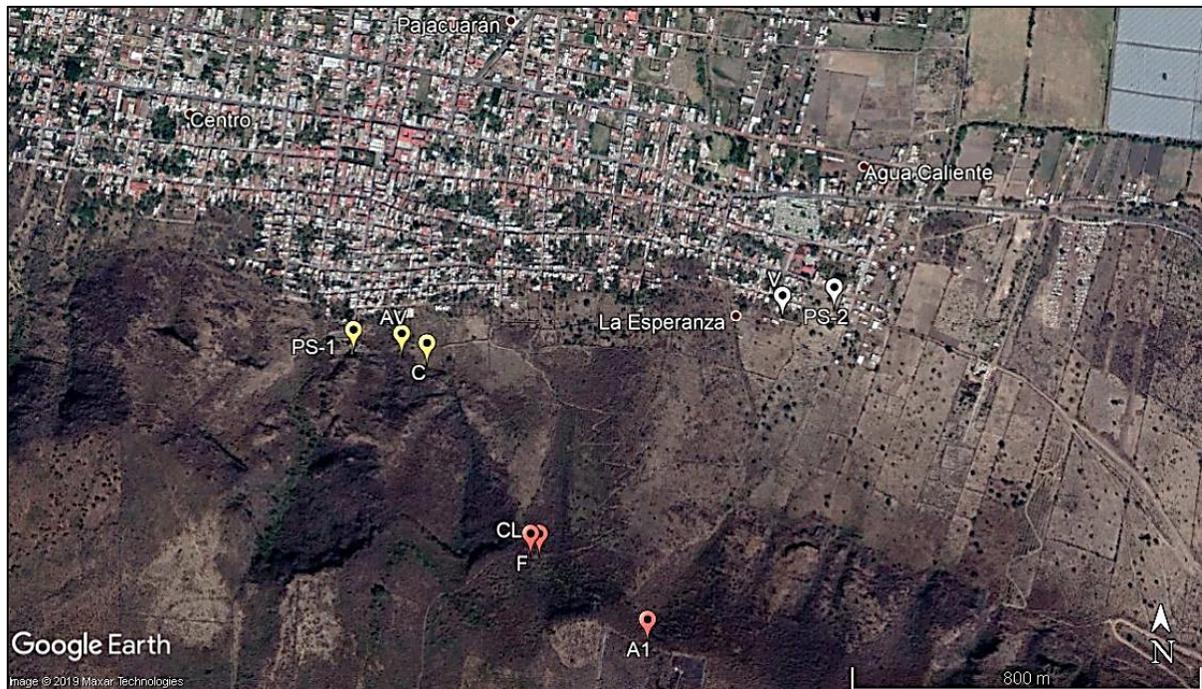
---

# Apéndice

---

El presente expone las especificaciones del trabajo de campo de la localidad y falla geológica de Pajacuarán, ampliando el contenido del capítulo 4, *Materiales y métodos*, y capítulo 5, *Área de estudio*. El apéndice proporciona detalles de la exploración geológica (Fig. 1) y levantamientos de la zona de estudio con vehículo aéreo no tripulado (UAV) y escáner láser terrestre (TLS).

## APÉNDICE I. EXPLORACIÓN GEOLÓGICA



**Figura 1.** Fotografía satelital de la falla y mancha urbana de Pajacuarán, incluyendo localidades del municipio (puntos rojos) y sitios explorados en la ladera del cerro La Estrella (círculos amarillos), en la zona de desprenderimiento (círculos rojos), y en la zona de depósito de bloques (círculos blancos). Fuente: Google Earth, 2019.

<b>Datos generales del sitio</b>	
Fecha de la exploración	28 de septiembre de 2017
Nombre del sitio	Localidad de Pajacuarán en la ladera del cerro La Estrella
Brigada	Ing. Marlene Vargas Sánchez, Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal
Pendiente	Moderadamente inclinada (15-30°)
Posición fisiográfica	Al pie de ladera cóncava
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Litología	Andesita-basáltica
Edafología	Phaeozem
Uso de suelo y vegetación	Uso agrícola temporal y selva baja caducifolia
Clima	Templado subhúmedo
Condiciones meteorológicas	Parcialmente soleado, por el tarde

<b>Perfil de suelo I (PS-I)</b>	
Localización	A 100 m al sureste de la cabecera municipal de Pajacuarán, Michoacán
Coordenadas UTM	13 Q (754609.00 m E, 2225814.00 m N)
Altitud	1,580 m s.n.m.

### Descripción

El perfil de suelo tiene espesor de 1.20 m y se ubica en la zona de depósitos coluviales. Los fragmentos de rocas son subangulares de composición andesita-basáltica con diámetro de hasta 0.50 m, y están inmersos en una matriz de material arcilloso oscuro (Fig. 2). Esporádicamente, se encuentran bloques de roca mayores a 1.0 m de tipo brecha volcánica y escoria que corresponden a la litología del estrato superior. La litología muestra una intercalación de rocas de composición andesita-basáltica, brecha volcánica y escoria (Fig. 3). Las rocas se encuentran en una matriz invertida mezclada con material arcilloso. Es una matriz sin estructura con presencia de raíces, humedad, y arreglo heterogéneo sin estratos.



**Figura 2.** Material arcilloso oscuro



**Figura 3.** Fragmento de escoria

### Aparato volcánico antiguo (AV)

Localización	A 110 m al sureste de la cabecera municipal de Pajacuarán, Michoacán
Coordenadas UTM	13 Q (754721.00 m E, 2225807.00 m N)
Altitud	1,592 m s.n.m.

### Descripción

El aparato volcánico antiguo (Fig. 4-5) se compone de lava de composición andesita-basáltica, depósitos piroclásticos y ceniza cementada. La dirección de las discontinuidades es persistente.



Figura 4. Aparato volcánico antiguo



Figura 5. Flujos de lava y ceniza

### Cueva (C)

Localización	A 165 m al sureste de la cabecera municipal de Pajacuarán, Michoacán
Coordenadas UTM	13 Q (754780.00 m E, 2225786.00 m N)
Altitud	1,592 m s.n.m.

### Descripción

Se aprecian planos de estratificación y familias de discontinuidades persistentes (Fig. 6-7).

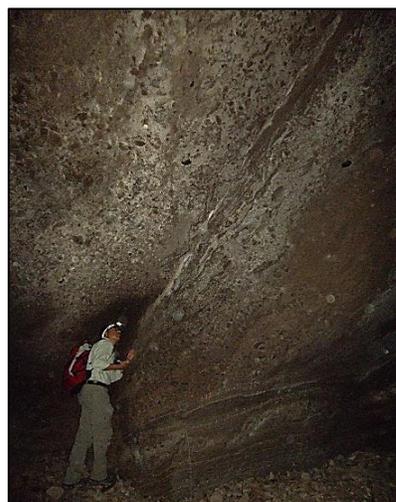


Figura 6. Persistencia de la discontinuidad



Figura 7. Planos de estratificación

Rumbo ( <i>strike</i> )	Inclinación ( <i>dip</i> )	Descripción
N 0	40 NE	Plano de estratificación
N 5 E	43 SE	Plano de estratificación
N 55 W	75 NE	Fractura, persistencia > 5 m
N 85 W	45 NE	Fractura, persistencia > 5 m
N 65 E	70 NE	Fractura
N 15 E	38 SE	Plano de estratificación
N 85 W	58 NE	Fractura

Fuente: tomadas por el Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal.

<b>Datos generales del sitio</b>	
Fecha de la exploración	29 de septiembre de 2017
Nombre del sitio	Localidad de Fray Domínguez en el cerro La Estrella
Brigada	Ing. Marlene Vargas Sánchez, Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal
Pendiente	Inclinación pronunciada (30-52°)
Posición fisiográfica	En la corona y lomo de ladera cóncava
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Litología	Andesita-basáltica
Edafología	Phaeozem
Uso de suelo y vegetación	Uso agrícola temporal y selva baja caducifolia
Clima	Templado subhúmedo
Condiciones meteorológicas	Parcialmente soleado, por la mañana y medio día

<b>Afloramiento (A1)</b>	
Localización	A 830 m al sureste de la cabecera municipal de Pajacuarán, Michoacán
Coordenadas UTM	13 Q (755300.00 m E, 2225162.00 m N)
Altitud	1,975 m s.n.m.

<b>Descripción</b>
El escarpe no lo conforma un macizo rocoso, por lo que los materiales tienen un acomodo aleatorio y no presenta discontinuidades en su estructura. El escarpe está conformado por flujos de lava de composición andesita-basáltica y brecha volcánica. Los bloques de roca se observan susceptibles a desprendimiento por la erosión diferencial del estrato inferior y su posición en cantiléver. Las rocas en cantiléver son bloques macizos subangulares con diámetro entre 1 a 2 m, y bloques excepcionales de 4 m. Se perciben al menos cinco bloques aparentemente apunto de desprenderse. La arcilla roja corresponde al paleosuelo con líticos redondeados de 0.10 a 0.20 m.

Rumbo ( <i>strike</i> )	Inclinación ( <i>dip</i> )	Descripción
320		Inclinación de la ladera
330	78 SW	Fractura
102	70 NW	Fractura
315	19 SW	Contacto litológico
350	54 SW	Fractura

285	74 SW	Fractura
300	28 SW	Fractura
286	85 NE	Fractura
90	47 S	Fractura
60	90 E	Fractura
95	55 NW	Fractura
196	77 NE	Fractura
107	75 NE	Fractura
70	64 SE	Fractura
112	82 NE	Fractura
20	15 SW	Fractura
320	81 NE	Fractura
310	65 NE	Fractura
255	46 NW	Fractura
340	47 NE	Fractura

Fuente: tomadas por el Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal.

<b>Fracturas (F)</b>	
Localización	A 640 m al sureste de la cabecera municipal de Pajacuarán, Michoacán
Coordenadas UTM	13 Q (755028.00 m E, 2225353.00 m N)
Altitud	1,914 m s.n.m.

### Descripción

Las fracturas se encuentran en un afloramiento de flujos de lava. La roca es posiblemente una riolita por las curvas en el flujo (Fig. 8).



Figura 8. Flujo característico de la riolita

<b>Rumbo (strike)</b>	<b>Inclinación (dip)</b>	<b>Descripción</b>
116	66 NE	Fractura
118	30 NE	Fractura
119	81 NE	Fractura
124	90	Fractura
98	29 NE	Fractura
294	75 NE	Fractura

86	25 NW	Fractura
275	45 SE	Fractura
277	58 SW	Fractura
157	78 NE	Fractura
104	55 NE	Fractura
142	72 NE	Fractura
158	57 NE	Fractura
170	80 NE	Fractura
139	60 NE	Fractura
165	61 NE	Fractura
35	36 NW	Fractura
154	90	Fractura
56	33 NW	Fractura
144	66 NE	Fractura
30	31 NW	Fractura
43	20 NW	Fractura
0	79 W	Fractura
81	19 NW	Fractura
10	22 SE	Fractura
164	55 NE	Fractura
148	67 SW	Fractura
195	75 SE	Fractura

Fuente: tomadas por el Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal.

### Contacto litológico (CL)

Localización	A 640 m al sureste de la cabecera municipal de Pajacuarán, Michoacán
Coordenadas UTM	13 Q (755048.00 m E, 2225353.00 m N)
Altitud	1,908 m s.n.m.

### Descripción

Se aprecia el contacto litológico (Fig. 9) entre el paleosuelo y flujo de lava del afloramiento I (A1).



**Figura 9.** Contacto litológico

### Datos generales del sitio

Fecha de la exploración	08 de noviembre de 2017
Nombre del sitio	Localidad de Pajacuarán en la ladera del cerro La Estrella
Brigada	Ing. Marlene Vargas Sánchez, Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal
Pendiente	Moderadamente inclinada (15-30°)
Posición fisiográfica	Al pie de ladera cóncava
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Litología	Andesita-basáltica
Edafología	Phaeozem
Uso de suelo y vegetación	Uso agrícola temporal y selva baja caducifolia
Clima	Templado subhúmedo
Condiciones meteorológicas	Muy soleado, por la mañana y medio día

### Vivienda (V) afectada por caída de rocas

Localización	C. 5 de febrero a lado de 438, colonia La Esperanza
Coordenadas UTM	13 Q (755613.00 m E, 22259958.00 m N)
Altitud	1,510 m s.n.m.

### Descripción

Es una de cuatro viviendas dañadas por el evento de caída de rocas de noviembre de 2013 del bloque proveniente del afloramiento I (A1). La casa fue rehabilitada (Fig. 10), y el bloque triturado y removido de la zona. Según vecinos, el bloque se fragmentó en dos al impactar sobre la ladera. El bloque más grande dañó las cuatro viviendas y el segundo bloque cambió de dirección con rumbo hacia el nuevo Panteón Municipal. Los vecinos describen el bloque que causó afectaciones como una roca irregular de 2.5 a 3.0 metros de diámetro. Se observan árboles endémicos de tronco grueso y fibroso como mezquite, guamúchil y huisache (Fig. 11).



Figura 10. Vivienda afectada



Figura 11. Guamúchil, árbol endémico

<b>Perfil de suelo 2 (PS-2)</b>	
Localización	Colonia La Esperanza frente a escaneo 2 (E2)
Coordenadas UTM	13 Q (755726.00 m E, 2225934.00 m N)
Altitud	1,551 m s.n.m.

### Descripción

El perfil de suelo (Fig. 12) tiene espesor mayor a 5.0 m y se ubica en la zona de depósitos coluviales. Se distinguen fragmentos subangulares de flujos de lava de composición andesita-basáltica de diámetros entre 0.10 y 1 m inmersos en una matriz de arcilla oscura, con bloques esporádicos mayores a 2 m de brecha volcánica y escoria que corresponden a la litología de la corona de la ladera (Fig. 13). La matriz en la que se encuentran los fragmentos de roca es de tipo limo-arcillosa, es húmeda y sin estructura ni estratos aparentes. Es posible que el depósito corresponda a un flujo de detritos u otro proceso de remoción en masa.



**Figura 12.** Perfil de suelo

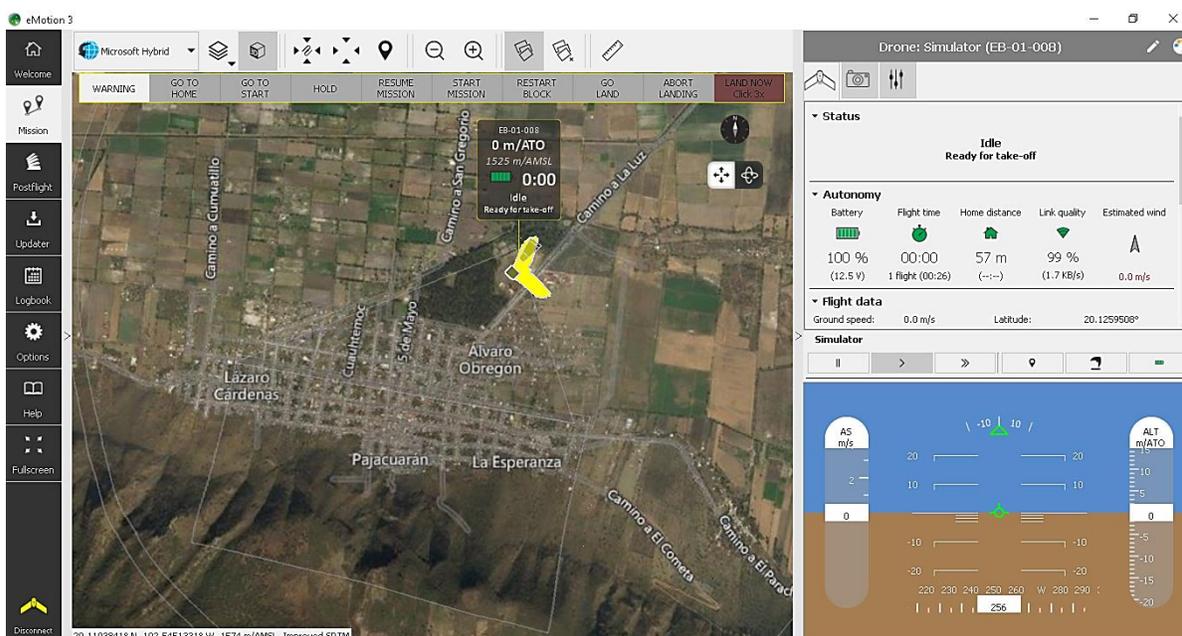


**Figura 13.** Fragmentos de roca

## APÉNDICE 2. VUELOS CON *EBEE SENSEFLY*

Se llevaron a cabo seis vuelos por medio del dron de ala fija *eBee* para cubrir la zona de estudio, la cual incluye una porción la falla geológica y la mancha urbana de la localidad de Pajacuarán (Fig. 4.1). El software de planificación y control, *eMotion*, permite interactuar con el UAV durante el vuelo autónomo (Fig. 14).

<b>Datos del equipo</b>	
Descripción	Captura de imágenes aéreas mediante vuelos con dron de ala fija
Modelo del dron	<i>eBee SenseFly</i>
Peso al despegar	0.69 kg
Cobertura espacial	Hasta 12 km <sup>2</sup>
Resolución espacial	Hasta 1.5 cm
Conexión por radio	2.4 GHz
Alcance del modem USB	Hasta 3 km
Cámara digital	<i>Sony Cyber-shot WX RGB</i> de 18.2 MP



**Figura 14.** Interfaz gráfica de usuario de eMotion al ejecutar el vuelo del dron eBee. Fuente: captura de pantalla de senseFly, 2014,

<b>Datos generales del sitio</b>	
Nombre del sitio	COBAEM plantel Pajacuarán
Brigada	Ing. Marlene Vargas Sánchez, Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal
Coordenadas UTM	13 Q (755424.44 m E, 2227275.20 m N)
Altitud	1,525 m s.n.m.
Pendiente	Inclinación muy baja (0-5°)
Posición fisiográfica	Al pie de ladera cóncava sobre planicie lacustre
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Litología	Depósitos coluviales de composición andesita-basáltica
Edafología	Vertisol
Uso de suelo y vegetación	Zona urbana, uso agrícola de riego y pastizal inducido
Clima	Semicálido subhúmedo

<b>Vuelos 1-2</b>	
Fecha del vuelo	Martes, 7 de noviembre de 2017
Hora del vuelo	12:00 a 13:15 horas
Duración de baterías	30 y 35 minutos para cada vuelo, respectivamente
Condiciones meteorológicas	Soleado, viento de 1 a 3 m/s

**Descripción**

Operaciones realizadas a través del software eMotion antes del vuelo:

*Conect/ Start/ Load flight/ Load mision/ OS: (ubicación de archivo)/ Load file*

1. Se carga el plan de vuelo, la misión y el archivo de localización
2. Se asigna dirección y velocidad del viento, y donde va a aterrizar el dron
3. Se le coloca la batería al dron para hacer conexión con el programa (Fig. 15-17)

Operaciones realizadas a través del software eMotion después del vuelo:

*Flight log manager (descarga de imágenes del vuelo)/ Locate flight logs/ Import images/ SD card: (ubicación de tarjeta SD)/ Se conecta cámara y laptop al dron/ Image matching summary*



**Figura 15.** Cuerpo central eBee, batería y cámara



**Figura 16.** Modem USB eBee



**Figura 17.** Cargador y batería eBee

**Vuelos 3-4**

Fecha del vuelo	Miércoles, 8 de noviembre de 2017
Hora del vuelo	8:20 a 9:00 horas y 14:00 a 12:25 horas
Duración de baterías	15 y 20 minutos, y 25 minutos para cada vuelo, respectivamente
Condiciones meteorológicas	Soleado, viento fuerte de > 10 m/s

**Descripción**

Durante el vuelo 3 la velocidad del viento a una altitud superior a 500 m/ATO era mayor a 10 m/s, por lo que el consumo de la batería fue demasiado rápido y el vuelo requirió las dos baterías. Se regresó en la tarde a realizar el vuelo 4.

<b>Vuelos 5-6</b>	
Fecha del vuelo	Jueves, 9 de noviembre de 2017
Hora del vuelo	11:30 a 13:20 horas
Duración de baterías	20 y 25 minutos, y 15 minutos para cada vuelo, respectivamente
Condiciones meteorológicas	Soleado, viento < 5 m/s

<b>Descripción</b>
Durante el vuelo 5 la primera batería rindió 18 minutos, mientras que la segunda rindió 24 minutos. En el vuelo 6 la batería rindió sólo 12 minutos.

### **APÉNDICE 3. ESCANEOS CON RIEGL VZ-1000**

Se realizaron seis escaneos en distintas estaciones de la localidad de Pajacuarán (Fig. 4.1). Se buscó que estas proporcionarán una visibilidad óptima del escarpe de la falla y mancha urbana de Pajacuarán. Los puntos deben ser accesibles y, de preferencia, estar ubicados en lugares públicos y permanentes, de tal manera que sean confiables para futuros escaneos.

<b>Datos del equipo</b>	
Descripción	Registro de nube de puntos con escáner láser terrestre
Modelo del escáner	RIEGL VZ-1000
Rango de medición	Hasta 1,400 m
Tasa de medición	Hasta 122,000 puntos/seg
Campo de visión	100° vertical y 360° horizontal
Exactitud	8 mm
Precisión	5 mm
Cámara digital	Nikon D800 de 36.3 MP

<b>Parámetros del escaneo</b>	
Tasa de frecuencia	70 kHz
Tasa de medición	Hasta 29,000 puntos/seg
Rango de medición	De 700 a 1,400 m
Rango mínimo	2.5 m
Divergencia del láser	0.3 m rad

<b>Datos generales del sitio</b>	
Nombre del sitio	Localidad de Pajacuarán, municipio de Pajacuarán, Michoacán
Brigada	Ing. Marlene Vargas Sánchez, Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal
Litología	Andesita-basáltica
Edafología	Phaeozem
Uso de suelo y vegetación	Zona urbana, uso agrícola de riego y pastizal inducido
Clima	Semicálido subhúmedo

<b>Escaneo I (E1)</b>	
Fecha del escaneo	Martes, 7 de noviembre de 2017
Hora del escaneo	16:30 horas
Objetivo del escaneo	Afloramiento I (A1)
Nombre del sitio	Nuevo Panteón Municipal de Pajacuarán
Coordenadas UTM	13 Q (756204.00 m E, 2225841.00 m N)
Altitud	1,530 m s.n.m.
Pendiente	Inclinación baja (5-15°)
Posición fisiográfica	Al pie de ladera cóncava sobre zona de depósitos coluviales
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Condiciones meteorológicas	Muy soleado
Referencia	Roca inmersa en el suelo junto a árbol

### Descripción

Instrucciones generales:

1. Se monta el TLS al tripie, colocando cámara, antena y batería
2. Se centra el tripie manualmente con plomada láser
3. TLS se nivela automáticamente con sensores
4. Se vincula TLS con software *RiSCAN PRO* mediante laptop y modem
5. TLS determina su posición con satélites GPS (**Fig. 18-19**)

Operaciones realizadas a través del software *RiSCAN PRO*:

*Save project/ General:* (nombre y ubicación de carpeta)/ *Instrument:* Serie S9090788/ *Camera:* Nikon 800/ *Coordinate system:* UTM 13/ Se conecta TLS al modem

*Project manager/ Project/ Scans/ Scan position:* Panteón

*New scan position/ Scan configuration (f,s):* Datos del escaneo: Resolución angular general del panorama 0.030°, frecuencia 70 KHz, medición de 40 millones de puntos

*New scan/* Después del escaneo panorámico se selecciona la zona de interés y se realiza escaneo fino a mayor resolución angular 0.010° del afloramiento I (A1)



**Figura 18.** Ubicación del escaneo I (E1)



**Figura 19.** Referencia del escaneo I (E1)

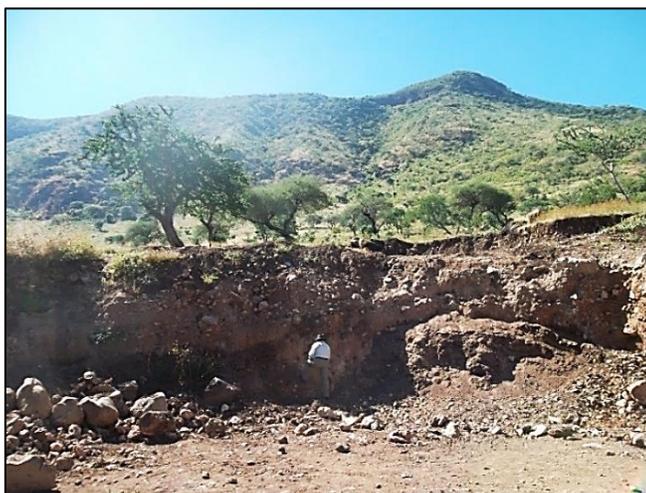
<b>Escaneo 2 (E2)</b>	
Fecha del escaneo	Miércoles, 8 de noviembre de 2017
Hora del escaneo	12:00 horas
Objetivo del escaneo	Afloramiento I (A1) y perfil de suelo 2 (PS-2)
Nombre del sitio	Colonia La Esperanza frente a perfil de suelo 2 (PS-2)
Coordenadas UTM	13 Q (755726.00 m E, 2225934.00 m N)
Altitud	1,551 m s.n.m.
Pendiente	Moderadamente inclinada (15-30°)
Posición fisiográfica	Al pie de ladera cóncava sobre zona de tránsito y depósito de bloques
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Condiciones meteorológicas	Muy soleado
Referencia	Dala de desplante junto a castillo de tabique rojo

### Descripción

Operaciones realizadas a través del software *RiSCAN PRO*:

*New project/ New scan position/ Scan configuration (f,s)/* Datos del escaneo: Resolución general del panorama 0.030°, frecuencia 70 kHz/ Termina escaneo y sobre el mismo archivo se realiza escaneo fina (**Fig. 20-21**)

*New scan/* Se modifica la resolución angular a 0.010° para escaneo fino del afloramiento I (A1) y perfil de suelo 2 (PS-2)

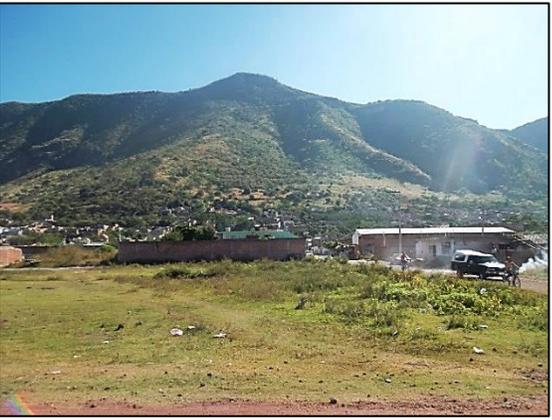


**Figura 20.** Referencia del escaneo 2 (E2)

**Figura 21.** Objetivos del escaneo, A1 y PS-2

<b>Datos generales del sitio</b>	
Nombre del sitio	Localidad de Pajacuarán, municipio de Pajacuarán, Michoacán
Brigada	Ing. Marlene Vargas Sánchez, Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal
Litología	Depósitos coluviales de composición andesita-basáltica
Edafología	Vertisol
Uso de suelo y vegetación	Zona urbana, uso agrícola de riego y pastizal inducido
Clima	Semicálido subhúmedo

<b>Escaneo 3 (E3)</b>	
Fecha del escaneo	Miércoles, 8 de noviembre de 2017
Hora del escaneo	15:00 horas
Objetivo del escaneo	Afloramientos 1 y 2 (A1-A2)
Nombre del sitio	C. Santa Cecilia esquina con C. Luis Mora Tovar
Coordenadas UTM	13 Q (755279.78 m E, 2226657.21 m N)
Altitud	1,530 m s.n.m.
Pendiente	Inclinación muy baja (0-5°)
Posición fisiográfica	Al pie de ladera cóncava sobre planicie lacustre
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Condiciones meteorológicas	Muy soleado
Referencia	Junta de la banqueta frente a casa pintada de color naranja

<b>Descripción</b>
<p>Operaciones realizadas a través del software <i>RiSCAN PRO</i>:  <i>New project/ New scan position/ Scan configuration (f,s)</i>/ Datos del escaneo: Resolución general del panorama 0.030°, frecuencia 70 kHz (Fig. 22-23)  <i>New scan/</i> Se modifica la resolución angular a 0.010° para escaneo fino del afloramiento 1 (A1) y afloramiento 2 (A2)</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>
<p><b>Figura 22.</b> Referencia del escaneo 3 (E3)</p>
<p><b>Figura 23.</b> Objetivos del escaneo, A1 y A2</p>

<b>Datos generales del sitio</b>	
Nombre del sitio	Localidad de Pajacuarán, municipio de Pajacuarán, Michoacán
Brigada	Ing. Marlene Vargas Sánchez, Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal
Litología	Andesita-basáltica
Edafología	Phaeozem
Uso de suelo y vegetación	Uso agrícola temporal y selva baja caducifolia
Clima	Templado subhúmedo

<b>Escaneo 4 (E4)</b>	
Fecha del escaneo	Jueves, 9 de noviembre de 2017
Hora del escaneo	8:00 horas
Objetivo del escaneo	Afloramientos 3 y 4 (A3-A4)
Nombre del sitio	Cerro de "La Cruz"
Coordenadas UTM	13 Q (754456.00 m E, 2225794.00 m N)
Altitud	1,592 m s.n.m.
Pendiente	Inclinación alta (30-45°)
Posición fisiográfica	En el lomo de ladera cóncava sobre zona de tránsito de bloques
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Condiciones meteorológicas	Muy soleado
Referencia	Roca con pintura rosa inmersa en el suelo

### Descripción

Operaciones realizadas a través del software *RiSCAN PRO*:

*New project/ New scan position/ Scan configuration (f,s)/* Datos del escaneo: Resolución general del panorama 0.030°, frecuencia 70 kHz (Fig. 24-25)

*New scan/* Se modifica la resolución angular a 0.010° para escaneo fino del afloramiento 3 (A3) y afloramiento 4 (A4)



**Figura 24.** Referencia del escaneo 4 (E4)



**Figura 25.** Objetivos del escaneo, A3 y A4

<b>Escaneo 5 (E5)</b>	
Fecha del escaneo	Jueves, 9 de noviembre de 2017
Hora del escaneo	9:00 horas
Objetivo del escaneo	Mancha urbana de Pajacuarán
Nombre del sitio	Cerro de "La Cruz"
Coordenadas UTM	13 Q (754456.27 m E, 2225846.63 m N)
Altitud	1,585 m s.n.m.
Pendiente	Inclinación alta (30-45°)
Posición fisiográfica	En el lomo de ladera cóncava sobre zona de tránsito de bloques
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Condiciones meteorológicas	Muy soleado
Referencia	Bloque grande de brecha volcánica inmersa en el suelo

### Descripción

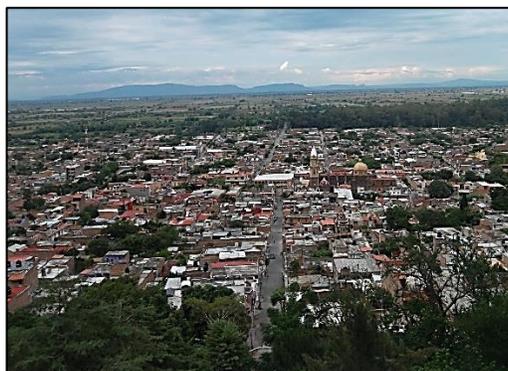
Operaciones realizadas a través del software *RiSCAN PRO*:

*New project/ New scan position/ Scan configuration (f,s)/* Datos del escaneo: Resolución general del panorama 0.030°, frecuencia 70 kHz (Fig. 26-27)

*New scan/* Se modifica la resolución angular a 0.010° para escaneo fino de la mancha urbana



**Figura 26.** Referencia del escaneo 5 (E5)



**Figura 27.** Objetivo del escaneo, mancha urbana

<b>Escaneo 6 (E6)</b>	
Fecha del escaneo	Jueves, 9 de noviembre de 2017
Hora del escaneo	14:00 horas
Objetivo del escaneo	Afloramientos 1 y 2 (A1-A2)
Nombre del sitio	C. 20 de noviembre
Coordenadas UTM	13 Q (754948.57 m E, 2225931.58 m N)
Altitud	1,565 m s.n.m.
Pendiente	Moderadamente inclinada (15-30°)
Posición fisiográfica	Al pie de ladera cóncava sobre zona de tránsito y depósito de bloques
Formas del terreno	Escarpe de falla geológica, planicie lacustre, cerros, lago Chapala
Condiciones meteorológicas	Muy soleado
Referencia	A 1.80 m de armado de castillo en esquina superior de construcción (roca porosa inmersa en concreto)

**Descripción**

Operaciones realizadas a través del software *RiSCAN PRO*:

*New project/ New scan position/ Scan configuration (f,s)/* Datos del escaneo: Resolución general del panorama  $0.030^\circ$ , frecuencia 70 kHz (**Fig. 28**)

*New scan/* Se modifica la resolución angular a  $0.010^\circ$  para escaneo fino del afloramiento 1 (A1) y afloramiento 2 (A2)



**Figura 28.** Referencia del escaneo 6 (E6)