

Seguimiento a la dinámica de los movimientos de remoción en masa con el uso de Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca.

Daniel Santiago Gutierrez Pacheco

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil, Universidad Antonio Nariño

Programa de Maestría en Geomática

Liliana Vanesa Celis Gil

Andrés Felipe Carvajal Vanegas

2021

Resumen

Los movimientos de remoción en masa son una problemática ambiental muy frecuente en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca, que en muchas ocasiones ha llegado a impedir el paso de la zona central con la zona oriental del país. Por esta razón se analizan tres movimientos de remoción en masa con imágenes aéreas (drones) en el municipio durante los meses de febrero, marzo y abril de 2021, el cual se desarrolló mediante un pre-muestreo para identificar las características del terreno con presencia de movimiento y posteriormente realizar un monitoreo de la generación de escarpas colapsadas, la evolución del perfil topográfico y cambio volumétrico. Se identifican que dos zonas presentan zonas inestables y zonas de concentración de material que próximamente pueden colapsar.

Palabras clave: Remoción en masa, monitoreo, drones, perfil topográfico, escarpas.

Abstract

Mass removal movements are a very frequent environmental problem in the town of Cáqueza, Cundinamarca, which on many occasions has prevented the passage from the central zone to the eastern zone of the country. That is why three mass removal movements are analyzed with aerial images (drones) in the township during the months of February, March, and April 2021, which was developed through a survey to identify the characteristics of the terrain with the presence of movement and subsequently monitor the generation of collapsed scarps, the evolution of the topographic profile and volumetric change. Two areas are identified as having unstable areas and areas of material concentration that may soon collapse.

Key words: Mass removal, monitoring, drones, topographic profile, scarps.

Contenido

Resumen	2
Abstract	3
Introducción	7
Preguntas de la Investigación.....	9
Marco Teórico.....	10
Movimientos de Remoción en Masa	10
Características de los Movimientos de Remoción de Masa	10
Tipos de movimientos de remoción en masa para Cruden y Varnes	11
Movimientos de Caída	11
Movimiento de Volcamiento	12
Movimientos de Deslizamiento	13
Movimiento de Flujo	14
Movimiento de Propagación Lateral.....	15
Dinámica de los Movimientos de Remoción en Masa	16
Detección de Movimientos de Remoción en Masa a Través de la Percepción	
Remota	17
Algoritmo Structure from Motion (SfM).....	19
Vehículos Pilotados Remotamente (RPA).....	19

	5
Ala Fija	19
Ala Rotatoria	20
Estado del Conocimiento.....	21
Objetivo General.....	23
Objetivos Específicos	23
Metodología.....	24
Área de Estudio.....	24
Características del Clima en Cáqueza, Cundinamarca.....	25
Características del Suelo de Cáqueza, Cundinamarca.....	26
Geomorfología de Cáqueza, Cundinamarca.....	27
Principales Usos del Suelo	29
Métodos y Materiales	30
Pre-Muestreo	33
Análisis de las Características del Suelo.....	35
Seguimiento a los Movimientos de Remisión en Masa	36
Resultados y discusión.....	38
Análisis de las Características del Terreno	38
MRM 1	39
MRM 2	40
MRM 3	41

Seguimiento a los Movimientos de Remoción en Masa	43
MRM 1	43
MRM 2	49
MRM 3	55
Síntesis de Resultados.....	61
Conclusiones	65
Referencias	66
Tablas.....	71
Figuras	72

Introducción

Los movimientos de remoción en masa son deslizamientos de material acelerado por la acción de la gravedad (Duque, 2017), estos eventos están relacionados con la geología, la topografía, hidrogeología, presencia de vegetación y lluvia a su vez que los factores climáticos acentúan la problemática (Chae et al., 2017).

En Colombia el Sistema de Información de Movimientos en Masa ofrece información sobre inventarios, catálogos y estudios realizados en los diferentes municipios que caracterizan los movimientos de remoción en masa. Sin embargo, la información sobre los deslizamientos de tierra carece de variables como es el volumen desplazado, la variación de pendiente en zonas con mayor ocurrencia de movimiento de taludes; por otro lado, los registros presentan frecuencias bajas en la toma de datos para identificar las zonas de con mayor incidencia a movimientos de remoción en masa, sin lo anterior, no se suministra material de soporte para generar alertas tempranas, evitar colapsos de conexiones terrestre, afectaciones a construcciones y lesiones a personas. Debido a esto, se ha podido evidenciar que sólo se ejecutan acciones cuando los incidentes se presentan (Chae et al., 2017).

Cáqueza, Cundinamarca, ubica al occidente de la capital de Colombia que conecta a Bogotá con Villavicencio, el municipio presenta geoformas con suelo de tipo limolita y shale, se presentan rocas no consolidadas y adicionalmente presenta pendientes bastante pronunciadas (cerca a 90°) lo cual representa una zona con alta amenaza a deslizamiento de tierra bastante complejas y muy recurrentes (Ruiz et al., 2013).

Existen diferentes inventarios almacenados en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), realizados por el Servicio Geológico Geográfico en el año 2012, donde se encuentran, también, diez inventarios de movimientos remoción donde el último fue publicado el 2015, por último se encuentra un catálogo con información movimientos de remoción de masa que presentan en la región, donde los reportes de eventos se realizan por parte de noticieros u otras instituciones y los datos que suministran son: fecha de reporte, altura, ubicación, importancia, entre otras, donde es claro que se encuentran reportados los eventos ya generados.

Los sistemas de percepción remota han sido una de las soluciones que han revolucionado el campo de la prevención de desastres debido a que presentan ventajas sobre sistemas convencionales, como son la captación de datos instantáneos con errores centimétricos y con capacidad de monitorear amplias zonas de incidencia de desastres a partir del uso de satélites para adquirir datos e imágenes para realizar los inventarios de deslizamientos de tierra (Delacourt et al., 2007), las estimaciones de volúmenes de deslizamiento de tierra desplazados (Turner et al., 2015).

Este trabajo busca realizar el monitoreo de remoción de masa con imágenes aéreas (drones) en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca, a partir del análisis de las características del terreno del municipio y el seguimiento de los movimientos de remoción de masa a partir de los perfiles topográficos de las áreas inestables,

La importancia de prevenir estos fenómenos está en conocer las zonas con mayor incidencia y poder informar de manera oportuna a las instituciones pertinentes y a la misma sociedad para prevenir que sea afectada, y más aún cuando una región ha

venido presentando la misma problemática, debido a las condiciones geológicas y climatológicas como es en el caso de Colombia (Campos et al, 2012).

Preguntas de la Investigación

¿Qué características presenta un terreno para realizar un seguimiento de remoción en masa?

¿Cómo identificar las zonas inestables de un área de estudio con alta incidencia de movimientos en masa?

¿Cómo es la dinámica de los perfiles topográficos de las zonas inestables identificadas como movimiento de remoción en masa?

¿Cómo realizar el seguimiento a una pendiente con alta incidencia a deslizamientos de tierra a partir de imágenes aéreas (drones)?

Marco Teórico

Movimientos de Remoción en Masa

Los movimientos de remoción en masa, según Duque (2017), son deslizamientos de roca y de materia no consolidada como la arena, arcilla y grava, acelerados por la acción de la gravedad los cuales se le relacionan factores detonantes del evento como la inclinación de la superficie y la concentración de agua, entre otros factores como son los climatológicos, tectónicos y el tipo de roca, en otras palabras, estos movimientos se presentan cuando el esfuerzo cortante (los cuales pueden ser producidos por sismos, variaciones morfológicas desfavorables, entre otros) superan a la resistencia al corte del suelo (saturación, meteorización, entre otros).

Características de los Movimientos de Remoción de Masa

Los factores que influyen en un movimiento de remoción de masa son: el material (relacionado con el tipo de suelo y la cobertura) la hidrogeología (referente con las infiltraciones, permeabilidad y profundidad del agua subterránea), la pendiente (relacionada con la geometría de la superficie), la morfología (determinada por la presencia de erosiones hídricas y fluviales) y otros factores externos (aquellos que se relacionan con fenómenos de pluviosidad, sismicidad y vulcanismo) (Sabogal, 2017).

Según Cerri, (1993) los movimientos de remoción en masa pueden clasificarse de acuerdo con los riesgos ambientales, sociales, tecnológicos y naturales (Tabla 1). Los movimientos de remoción de masa se encuentran clasificados según la naturaleza de su comportamiento en un riesgo natural, de medio físico, geológico y exógeno.

Tabla 1

Tabla de clasificación de Riesgos Ambientales.

Riesgos Ambientales	Sociales	Relativos al medio social, tales como, guerras, secuestros, robos, etc.		
	Tecnológicos	Relativos al los procesos productivos, tales como, fuga y contaminación, materiales explosivos, caída de aeronaves, etc.		
	Naturales	Medio Biológico	Asociado a Fauna	Enfermedades provocadas por virus y bacterias, plagas (roedores, saltamontes, etc), picadas de animales venenosos, etc.
			Asociada a la Flora	Enfermedades provocadas por hongos, plagas (hierbas dañinas), hierbas tóxicas y venenosas, etc.
		Medio Físico	Atmosféricos	Sequías, tifón, heladas y granizo.
			Hidrológicos	Inundaciones.
			Geológicos	Exógeno
Endógeno	Suelo expansivo, terremotos, actividades volcánicas y tsunamis.			

Nota: Clasificación realizada según Cerri (2001; 1993).

Los movimientos en masa también se clasifican según sus características físicas y cinemática; Cruden y Varnes (como se citó en Alcántara, 2000) desarrollaron una propuesta que se ha venido utilizando en los diferentes estudios referentes a esta problemática.

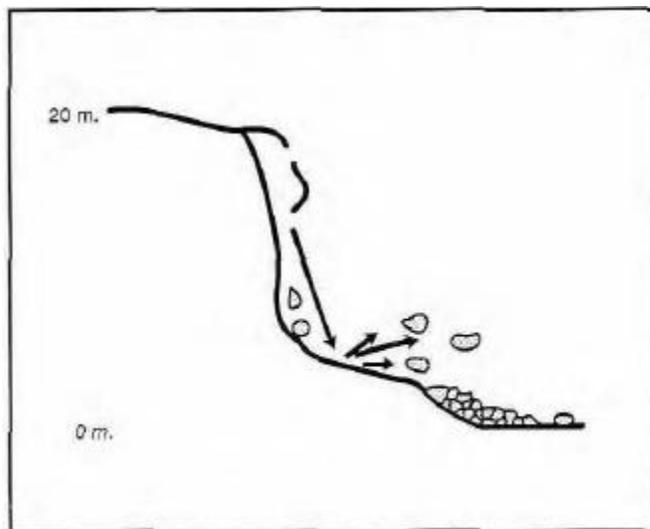
Tipos de movimientos de remoción en masa para Cruden y Varnes

Movimientos de Caída

Es el desprendimiento de masas de roca y/o suelo empinado que se desplaza a lo largo de una superficie cuesta abajo en caída libre, el material en el trayecto rebota o rueda a lo largo del movimiento. Este comportamiento tiene dos características básicas y es el desprendimiento de materia en la parte superior del relieve y cae de tal manera que el material rebota contra la superficie (Alcántara, 2000).

Figura 1

Imagen de un deslizamiento de caída



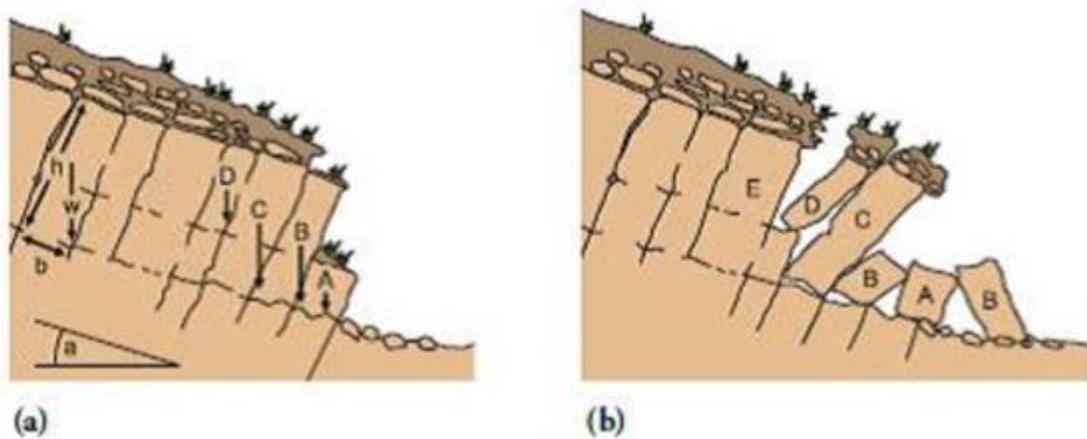
Nota: ilustración realizada por Cruden y Varnes (como se citó en Alcántara, 2000).

Movimiento de Volcamiento

Conocido por su característica de rotación de una masa de roca, suelos o detritos alrededor de un eje ubicado por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza en sentido de la inclinación de la pendiente, pero no implica colapso (Alcántara, 2000). Su comportamiento se describe gráficamente en la Figura 2.

Figura 2

Descripción gráfica de un movimiento de volcamiento



Nota: ilustración del movimiento de volcamiento tomada de Freitas & Waters (como se citó en Montero, 2017) Fuente: De 1973, en PMA-GCA 2007.

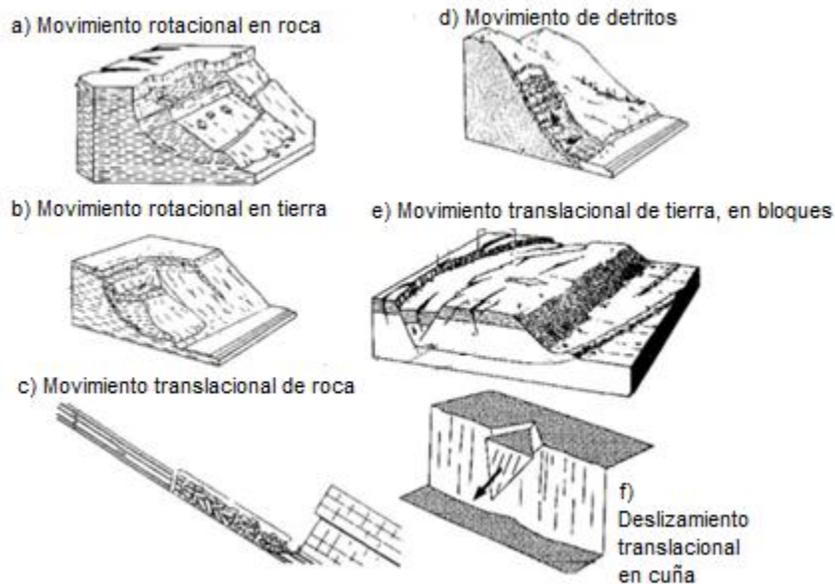
Movimientos de Deslizamiento

Movimiento de ladera debajo de masa de rocas de zonas relativamente delgadas bajo altos esfuerzos entre capas. Cruden y Varnes (1996) dividen el movimiento de deslizamiento en tres tipos: deslizamiento traslacional (se realiza el desprendimiento de una superficie plana (Figura 3.c, Figura 3.e y Figura 3.f) , deslizamiento rotacional (donde el material rota sobre una superficie generando escalonamientos (Figura 3.1 y Figura 3.b) y deslizamiento compuesto (conjuga los comportamientos rotacionales y traslacionales sobre una superficie, se caracteriza por generación de un escarpe con una pendiente bastante pronunciada que se suaviza en la profundidad hasta llegar a una superficie plana. Existe también otra categoría de movimientos de remoción de masa denominados movimientos de creep que presentan

un comportamiento similar a los movimientos de deslizamientos, pero a diferencia del segundo, los primeros se presentan a una velocidad de propagación altamente baja.

Figura 3

Descripción gráfica de los deslizamientos



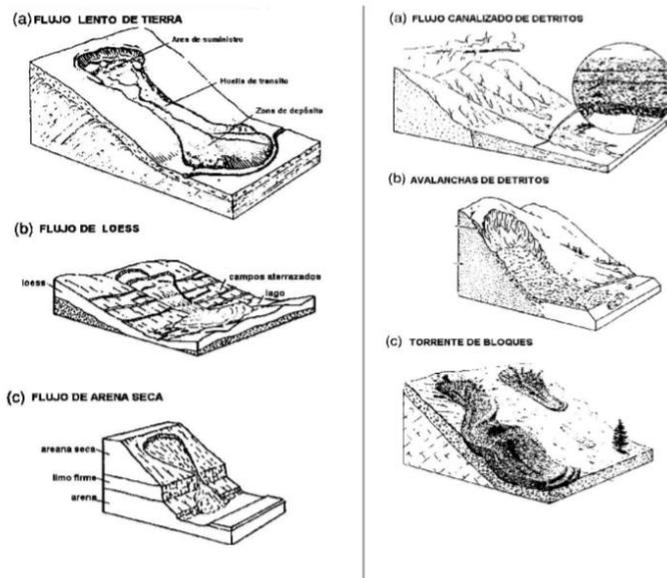
Fuente: Cruden & Varnes 1996.

Movimiento de Flujo

Movimiento de masas que se desplazan por medio de un estrechamiento y su movimiento es continuo como el de un líquido viscoso, generados a partir de una precipitación intensa en pendientes de más de 30 grados (Carlos-Velero et al., 2007).

Figura 4

Descripción gráfica de un movimiento de flujo



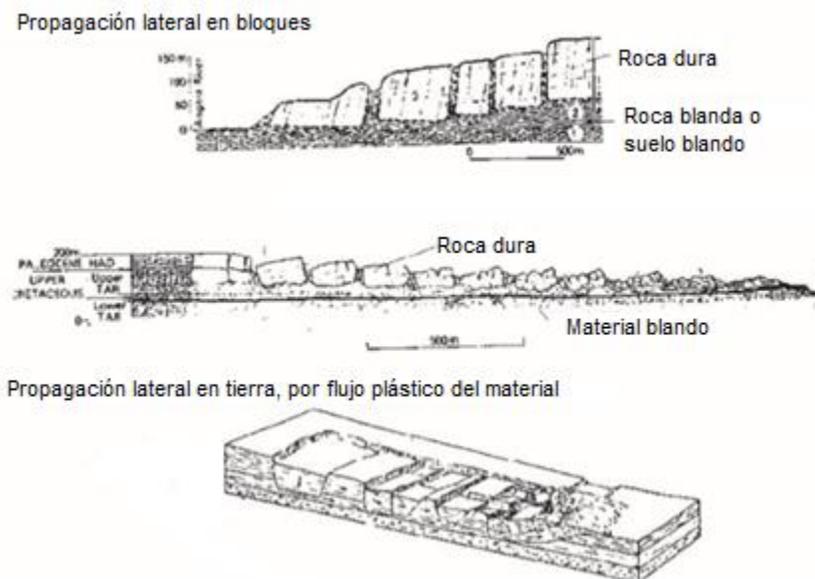
Fuente: Cruden & Varnes 1996.

Movimiento de Propagación Lateral

Se trata de hundimiento de parcelas de tierra a través de una superficie plana o con inclinación no pronunciada la cual desplaza masa de roca blanda y poco profunda, su formación se ilustra en la Figura 5 (Cruden y Varnes 1996).

Figura 5

Descripción gráfica de la propagación lateral



Fuente: Cruden & Varnes 1996.

Dinámica de los Movimientos de Remoción en Masa

Para el monitoreo de movimientos de remoción de masa se requiere de un seguimiento continuo de la zona de estudio a partir de la estimación del material desplazado, la topografía del terreno e identificar aquellas superficies fracturadas y colapsadas (Turner et al., 2015). La dinámica de un deslizamiento de tierra se ha analizado a partir de la medición de cambio, medición de desplazamiento de superficie y medición de desplazamiento subterráneo, siendo el último muy difícil de realizar ya que requiere de tecnologías como son los sistemas GPR para poder emitir ondas que penetren el suelo y de la misma manera se devuelvan al receptor. También se presentan otros análisis como es el monitoreo de activación, el cual mide el evento de

iniciación, atribuido a la precipitación, el cual consiste en realizar un seguimiento a la lluvia y establecer el umbral donde se activan los fenómenos de deslizamiento para posteriormente realizar un estudio de susceptibilidad y a partir de las limitaciones generar alertas tempranas. Como ejemplos se tiene (Hong et al.2006, 2006b, 2007; Hong y Adler, 2007; Kirschbaum et al., 2009 como se citó en Chae et al., 2017).

Detección de Movimientos de Remoción en Masa a Través de la Percepción

Remota

Se han realizado diferentes estudios de monitoreo de fenómenos medio ambientales a partir imágenes desde aeronaves y se georreferenciadas con puntos de control en tierra, esta técnica se empleó en la segunda guerra mundial y posteriormente, para 1970, fueron disponibles los satélites, para la toma de imágenes (Chae et al., 2017).

Se presentan ejemplos como es el caso del estudio hecho por Legorreta et al (2017), donde determinó el volumen de los deslizamientos de tierra mediante el área determinada por imágenes aéreas, también Harp (2002), determinó un inventario de deslizamientos provocados por el huracán Mitch en Honduras mediante fotos aéreas. Sampaio (2006) realizó un estudio del “modelo espacial dinámico aplicado al estudio de movimientos en masa en una región de la sierra paulista, a escala 1:10000” mediante el uso de imágenes satelitales.

Chae et al. (2017) mencionan que la percepción remota a partir de satélites presenta ventajas potenciales como son la capacidad de medir variables geofísicas del suelo a distancia y además permite evaluar, monitorear y dar alertas tempranas de la

amenaza de deslizamiento. Por otra parte, presenta limitaciones como son la falta de datos subterráneos, la menor frecuencia de adquisición de datos y la calidad de los datos debido a efectos atmosféricos.

Con el fin de ir mejorando la captación de datos y de no depender de condiciones externas como es la luz del sol, se generaron tecnologías de percepción remota activo, las cuales, a diferencia de las pasivas, emiten sus propias señales electromagnéticas y no depende de la energía que proviene del sol.

El monitoreo movimientos de remoción en masa se desarrolla a partir de sensores ópticos, térmicos, LIDAR y microondas y de observaciones multitemporales de imágenes, fotos y modelos digitales de terreno (DEM) para suministrar información de flujo, expansión del deslizamiento de tierra, velocidad del flujo y zonas de acumulación.

Según Chae (2017), “los desarrollos en la tecnología de RPA’s (aeronaves pilotadas a distancia) brindan oportunidades para el mapeo y monitoreo del medio ambiente en alta resolución” en zonas de difícil acceso lo cual es una ventaja que nos presenta la implementación de estos sistemas en el monitoreo de deslizamiento de tierra a partir de la geo codificación precisa de imágenes.

Para realizar el seguimiento de movimientos de remoción de masa se han desarrollado técnicas de procesamiento de imágenes fotogramétricas como es la *Structure from Motion* (SfM) para obtener modelos 3D de paisajes a partir de múltiples imágenes.

Algoritmo Structure from Motion (SfM)

El algoritmo SfM fue desarrollado según Snavely et al. (2008) para “reconstruir simultáneamente la estructura desconocida de la escena 3D” a partir de la información posición, orientación y longitud focal de etiquetas EXIF de las imágenes para realizar correspondencia de puntos de la escena.

Vehículos Pilotados Remotamente (RPA)

Los RPA son los vehículos aéreos remotamente pilotados a través de control remoto en tierra y que hace parte de los sistemas de percepción remota de tipo pasivo. Estos pequeños dispositivos se encuentran desde una gama de alta de soluciones especializadas, hasta las comercialmente listas a menor costo y son ideales cuando las coberturas de áreas, la experiencia de vuelo y el presupuesto son relativamente pequeños. Están en la capacidad de transportar entre su carga útil una batería, elementos de comunicación, navegación y diferentes tipos de sensores como cámaras de video, multiespectrales, térmicas, hiperespectrales, así como la detección de luz y rango (LIDAR), donde, a partir de los datos de nivel digital (ND) obtenidos, se pueden tener diferentes productos como ortofotos, mosaicos y modelos digitales de terreno a partir de procesamiento de las imágenes. Existen dos tipos de RPA dependiendo de la forma como este genere sustentación para mantenerse y desplazarse en el aire: de ala fija y ala rotatoria (Green et al., 2021).

Ala Fija

Para este tipo de modelos, la fuerza sustentación se origina sobre sus planos fijos que se encuentra unido a una estructura (fuselaje) debido a la geometría del perfil para que se genere una variación de velocidad sobre el plano superior (extradós) y el

plano inferior (intradós), como resultado se obtiene una diferencia de presión y por último una fuerza perpendicular a la cuerda media aerodinámica (longitud entre el borde de ataque y de salida como se muestra en la Figura 6). A diferencia de los vehículos aéreos de tipo ala rotatoria, los de ala fija son más silenciosos, más estables, con mayor autonomía de vuelo y menos consumo de energía, pero no tiene la capacidad realizar un vuelo estacionario, es decir, no puede mantenerse en un punto mientras se realiza la toma de datos (Green et al., 2021).

Figura 6

UAV de ala fija



Ala Rotatoria

Los vehículos aéreos de ala rotatoria (ver Figura 7) deben su sustentación a al movimiento rotatorio de sus hélices generando el mismo fenómeno de diferencia de velocidades entre el extradós y el intradós, permitiendo que el modelo se pueda mantener en un punto del espacio aéreo sin la necesidad de mantener un desplazamiento. En comparación con las aeronaves de ala fija, presenta múltiples desventajas como es la inestabilidad, el riesgo que presenta al depender del giro de

sus motores lo cual lo puede hacer caer más fácilmente, altas vibraciones y poca autonomía de vuelo y de carga útil (Green et al., 2021).

Figura 7

UAV de tipo ala rotatoria



Estado del Conocimiento.

La investigación realizada por Delacourt et al (2007) en el artículo señala que a partir de una revisión de técnicas de análisis de imágenes se emplea el seguimiento del deslizamiento superficial de los deslizamientos de tierra, además de evaluar el rendimiento de cada una de las plataformas donde se concluye que los datos tomados por satélites y aeronaves, su calidad depende de condiciones atmosféricas en contraste con los sensores en drones, radares y la tecnología LIDAR tienen ventaja por su alta adaptabilidad al medio, alta resolución y precisión de los datos.

Por otro lado Tuner et al. (2015) desarrollaron un algoritmo que permite realizar mapas para monitoreo de la dinámica de los movimientos en masa mediante un análisis multitemporal con aeronaves no tripuladas (UAV). Las tomas de imágenes fueron realizadas durante un periodo de tiempo de 4 años donde se hizo el

procesamiento de imágenes a través del algoritmo SfM (Structure from Motion) para obtener modelos digitales de terreno con una precisión de 4 cm en la horizontal y 3 cm en la vertical aproximadamente, entre otros datos que también se midieron fueron los cambios volumétricos (para lo cual determinaron que fue de 6630m^3) y el movimiento superficial (tendencia del deslizamiento) sin verificación en tierra.

El servicio geológico colombiano en el 2013 realizó un estudio en la región para determinar el nivel y zonas de amenaza por deslizamiento mediante el análisis estadístico bivariado (Ruiz et al., 2013, p. 48) el cual desarrollaron a partir de la recopilación de información exhaustiva de las actividades desarrolladas en la región y el histórico de deslizamientos de tierra, además de generar la cartografía básica y el modelo digital de terreno (DEM) y procesando la información a partir de un análisis bivariado para modelar la susceptibilidad de los movimientos en masa. El informe realizado por el servicio geológico colombiano sobre el estudio de amenazas de deslizamientos de tierra fue realizado en apoyo con el IGAC el cual suministró la información de cartografía con una resolución espacial es de 1:10.000, los datos que suministra la institución son actualizados y abarca la región entera, con el fin de realizar acciones de prevención, acción y control del riesgo.

Sabogal et al. (2017) realiza una caracterización de las variables que afectan la estabilidad de los taludes de la región de Cáqueza, Cundinamarca, e identificar aquellas zonas donde la presentación del evento afectará a poblaciones susceptibles y de mayor frecuencia de movimientos en masa y para adicionarlas el esquema de ordenamiento territorial del municipio.

Objetivo General

Analizar los movimientos de remoción en masa con imágenes aéreas (drones) en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca durante los meses de febrero, marzo y abril de 2021.

Objetivos Específicos

1. Identificar las características del terreno del municipio de Cáqueza, Cundinamarca.
2. Monitorear los movimientos de remoción de masa a partir de los perfiles topográficos de las áreas inestables del municipio de Cáqueza, Cundinamarca, entre los meses de febrero, marzo y abril de 2021.

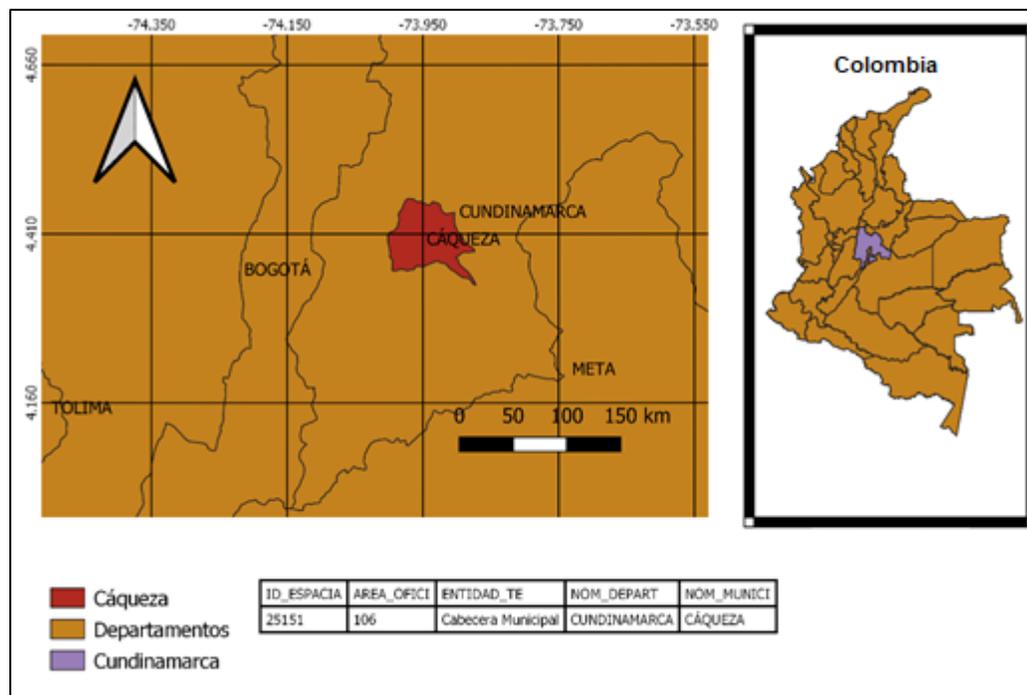
Metodología

Área de Estudio

Cáqueza fue fundada en 1600 y es uno departamentos que se encuentra en la provincia Oriente del departamento de Cundinamarca, entre los municipios de Ubaque, Chipaque, Une, Fosca, Quetame y Fómeque, el cual según el Servicio Geológico Colombiano presenta el mayor número de movimientos de masa en el oriente del departamento de Cundinamarca (*Sistema de Información de Movimientos en Masa*, 2020). La cabecera municipal de Cáqueza se encuentra a una altitud de 1746 con respecto al nivel del mar, cuenta con 20288 habitantes y tiene una extensión de área urbana de 38 km².

Figura 8

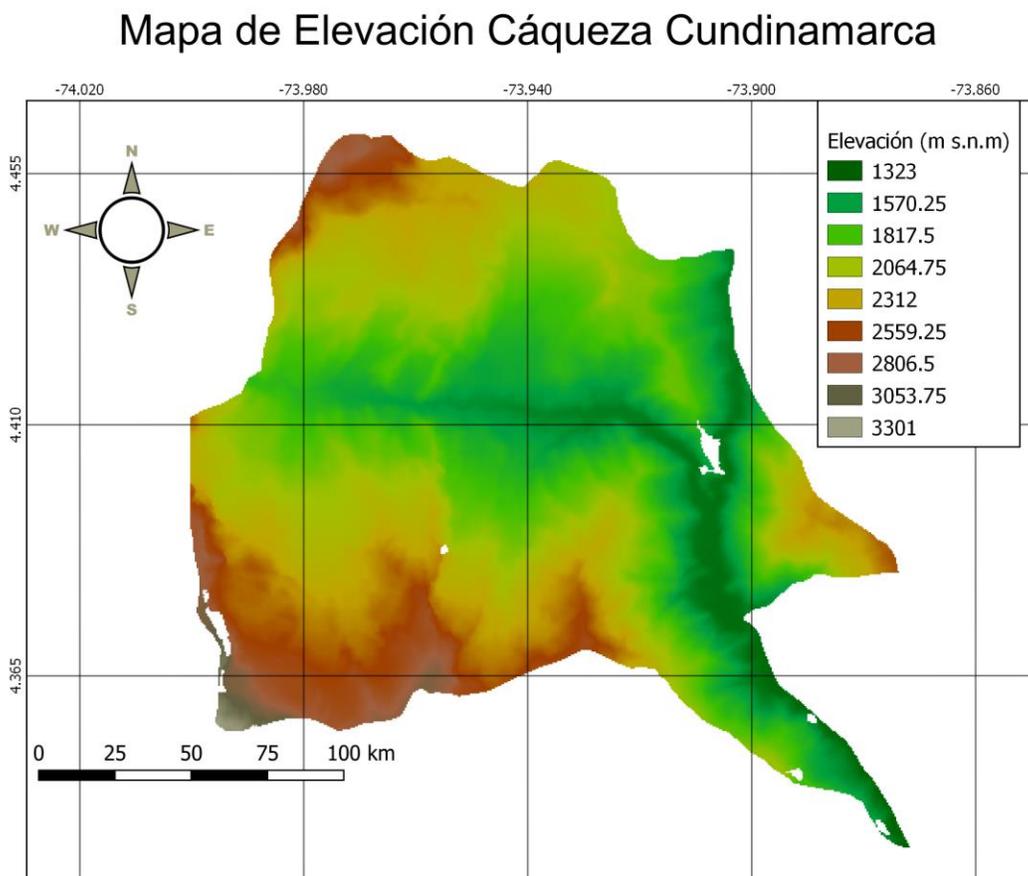
Ubicación geográfica de Cáqueza



El municipio se encuentra a una altitud entre los 1323 m y 3301 m sobre el nivel del mar (Figura 9).

Figura 9

Modelo digital de elevación del municipio de Cáqueza



Nota: Modelo digital de elevación en donde se extrae la información de altitud en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca. Tomado de: <https://earthexplorer.usgs.gov>.

Características del Clima en Cáqueza, Cundinamarca

En el municipio de Cáqueza se presenta una temperatura media de 12.8°C, donde los meses con más precipitación en el mes de mayo y julio y, por el contrario, el mes de enero es el más seco.

Tabla 2

Información climatológica promedio desde 1981 a 2010 de Cáqueza, Cundinamarca

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	5.3	5.0	8.4	9.0	29.7	22.8	08.1	7.5	3.1	8.0	4.4	1.9
# días con lluvia	3	5	9	14	17	18	19	17	13	12	10	16
# Días secos	28	23	22	16	14	12	12	14	17	19	20	25
Temperatura media (°C)	13.2	13.1	13.1	13.0	12.9	12.3	11.7	11.8	12.6	13.1	13.3	13.3

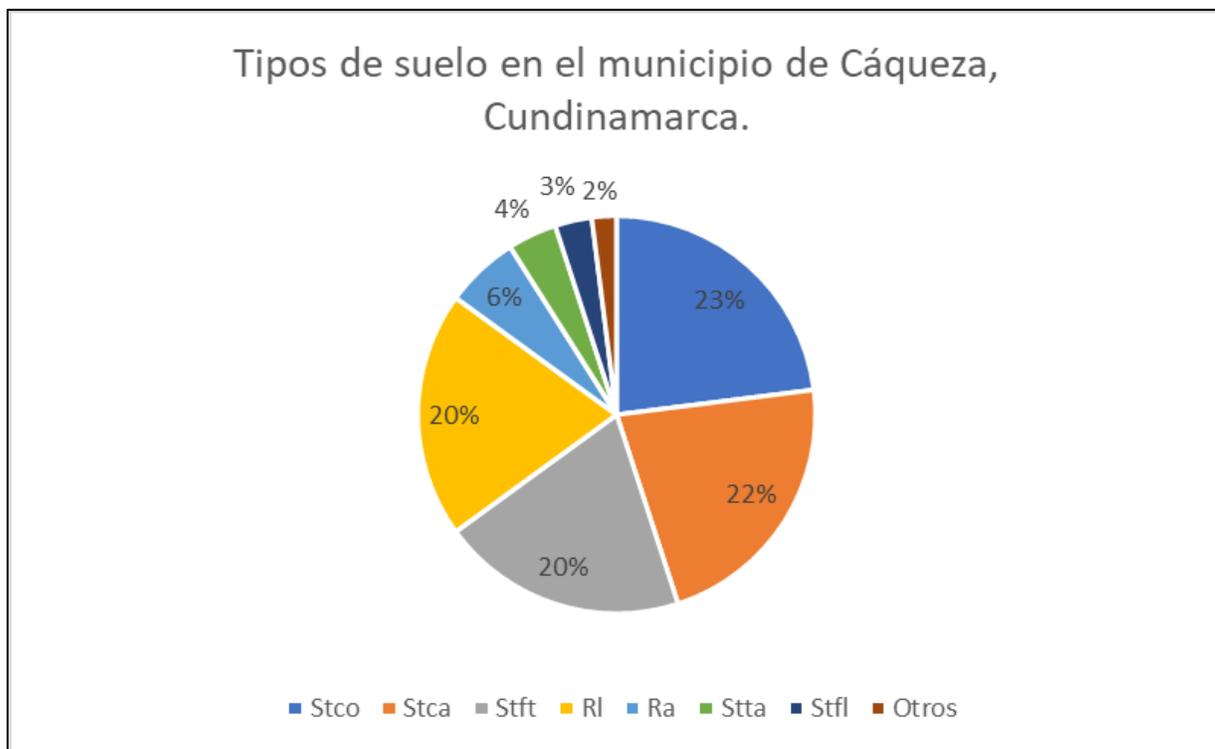
Nota: Se encuentra información sobre la variación de la temperatura, precipitación, días de lluvia, días secos en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca. Tomado de: IDEAM.

Características del Suelo de Cáqueza, Cundinamarca

La distribución de suelo en Cáqueza, en la cual se puede identificar que está compuesto de 23% suelo coluvial (Stco), 22% es suelo coluvial antiguo (Stca), 20% son suelos de flujos terrosos y detritos (Stft), 20% de rocas lutitas (RI), 6% de rocas areniscas (Ra), 4% son depósitos de talus (Stta), 3% de suelos de flujos de lodos (Stfl) y 2% de otros como se muestra en la Figura 10 (Sabogal, 2017).

Figura 10

Tipos de suelo en Cáqueza, Cundinamarca



Nota: Se encuentra información sobre la composición del suelo en el área de estudio. Tomado de (Sabogal, 2017, p. 42).

Geomorfología de Cáqueza, Cundinamarca

Gran parte de la región de la cordillera central está compuesta por basamento metamórfico del Paleozoico y regiones de rocas sedimentarias de épocas Mesozoicas y Cenozoicas. En la zona urbana se presentan capas de secuencia sedimentaria de la época cretácea y encima se encuentra recubierta de sedimentos recientes. Se presentan dos tipos de unidades litológicas las cuales son rocas sedimentarias y suelos transportados, los cuales se presentan formaciones de la época jurásica y dos de la época cretácica. Por último, se identifican las unidades geomorfológicas que se

encuentran en la Tabla 3. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

(Sabogal, 2017).

Tabla 3

Clasificación unidades geomorfológicas.

Origen Principal	Ejemplos de Geoformas con un origen específico
Fluvial Erosión Fluvial y Sedimentación.	Geoformas de acumulación y complejas: planicies aluviales, transicionales y erosionales, terrazas, abanicos, conos, cauces, activos, etc.
Lacustre Erosión lagunar y sedimentación.	Geoformas producto de niveles de agua alta (terrazas), fondos de lagos: llanuras lagunares, mareales, depósitos de evaporitas, etc.
Marino Erosión Marina y sedimentación.	Geoformas de ambientes de alta energía (materiales de grano grueso); de ambientes de baja energía (materiales de grano fino); y asociadas a complejos levantamientos: abanicos, abisales, turbitas, etc.
Volcánico Actividad volcánica.	Geoformas de conos, cráteres, escarpes volcánicos, flujos de lava y labradas en materiales piroclásticos.
Denudaciones Meteorización, transporte de masa, erosión linear.	Geoformas asociadas a desgaste, efectos litológicos no mayores. Geoformas influenciadas por la litología y erosión fluvial linear y asociadas con procesos denudativos efectivos: Movimientos de remoción en masa, colinas denudadas y residuales, laderas y escarpes denudados, etc.
Estructural Fallamiento	Geoformas asociadas con las capas de roca estratificadas o estructuralmente controladas, relacionadas con plegamientos, fallamiento y levantamiento: escarpes de falla, facetas, triangulares, ganchos de falla, cerros aislados, etc.
Estructural- Deudacional	Asociaciones denudaciones y estructurales: depresión estructural, laderas estructurales, etc.
Karstico Solución y redepositación.	Geoformas positivas (colinas), negativas(depresiones), estructurales y otras (complejos): cuevas, dolinas, lapietz, etc.
Eólico Erosión por el viento y Sedimentación.	Geoformas de acumulación (activas/no activas) y de deflación: dunas, médanos, etc.
Glacial Erosión y sedimentación.	Geoformas erosionales predominantemente de glaciación continentales, glaciación de montaña y acumulación: morrenas, kames, eskers, depósito fluvio glaciares, etc.

Antropogénico

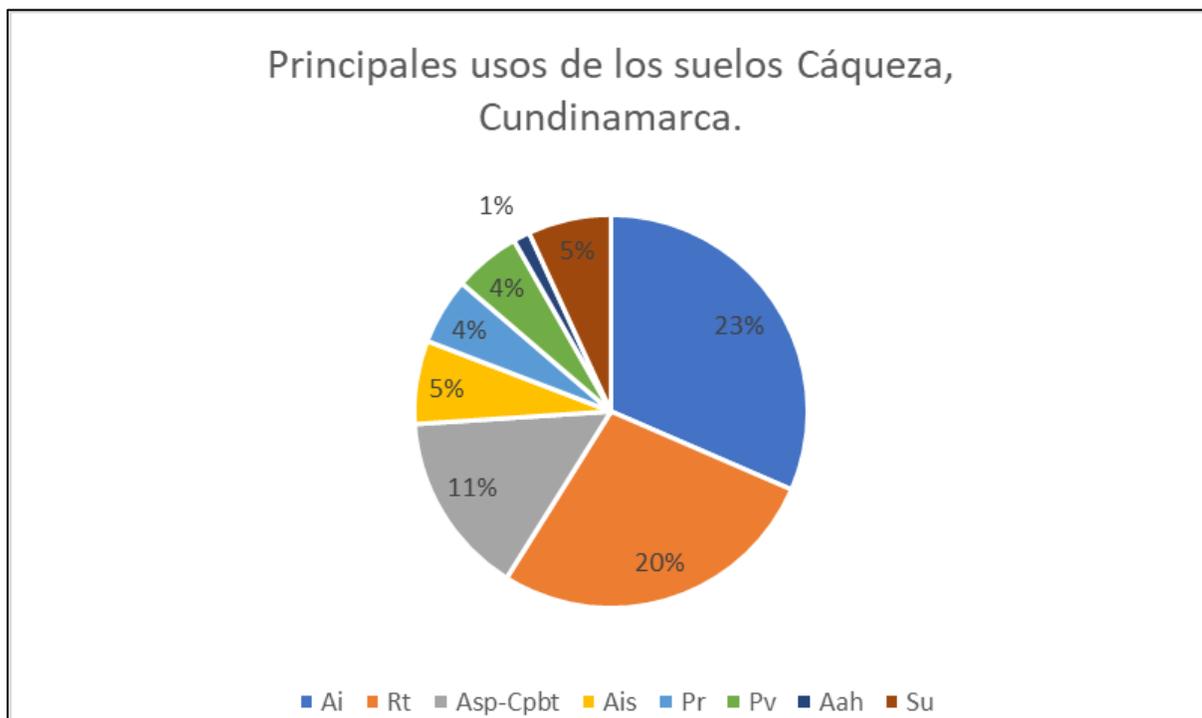
Aquellas formas del relieve que son el producto de modificaciones causadas por la intervención del hombre: ladera terrazada, cima explanada, llanos antrópicos, etc.

Principales Usos del Suelo

Los principales usos del suelo de la región analizada son utilizados de la siguiente manera: 23% para la agricultura intensa (Ai), 20% para rellenos de tierra (Rt), 11% de especias y pastos en áreas de bosques en transición (Asp-Cpbt), 5% para el asentamiento de infraestructura (Ais), 4% en protección (Pr), 4% usado para el pastoreo vacuno (Pv), 1% de áreas agrícolas heterogéneas (Aah) y el 5% está sin uso (Su) la cual se aprecia en la gráfica de distribuciones de la Figura 11 (Sabogal, 2017).

Figura 11

Principales usos de los suelos en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca



Nota: Se encuentra información sobre el uso del suelo en el área de estudio. Tomado de (Sabogal, 2017, p. 43).

Métodos y Materiales

Para la caracterización se aplicó la metodología que Rossi et al (2018) establece para estudios multitemporales, mapeo y caracterización de deslizamientos de tierra a partir de VANT's. Adicionalmente se analizó la dinámica de un deslizamiento de tierra como lo plantea Turner et al. (2015) a partir de la determinación del área y pendiente afectada por el desplazamiento y variación volumétrica.

Adicionalmente se tendrán en cuenta las variables de altura máxima y mínima, tipo de movimiento, área afectada (inicial), porcentaje de área de vegetación, zonas aledañas vulnerables, distancia entre cresta y valle, pendiente, variación volumétrica y variación del perfil topográfico (Tabla 4 Metodología establecida para abordar los objetivos.).

Tabla 4

Metodología establecida para abordar los objetivos.

Objetivos	Variables	Procedimiento
Analizar las características del terreno del municipio de Cáqueza, Cundinamarca.	Altitud máxima vs Altitud mínima	Pre-muestreo para identificar áreas con incidencias de movimientos de remoción de masa y calibración del drone.
	Tipo de deslizamiento	Preparación para toma de muestras en campo (Tener en cuenta los días de lluvias, condiciones atmosféricas, días óptimos para ir a campo en los meses).
	Área afectada (inicial)	Recolectar datos en campo y generar la nube de puntos (x, y, z).
	Porcentaje de área de vegetación	Generar modelo 3D
	Zonas aledañas vulnerables	Filtro de la vegetación. Descripción de los datos espaciales.
Realizar el seguimiento de los movimientos de remoción de masa a partir de los perfiles	Distancia entre la cresta y el valle	Se determina los perfiles topográficos a partir del modelo 3D, los cuales muestran información de altitud y

topográficos de las áreas inestables del municipio de Cáqueza, Cundinamarca, entre los meses febrero, marzo y abril.

Perfil topográfico (Pendiente).

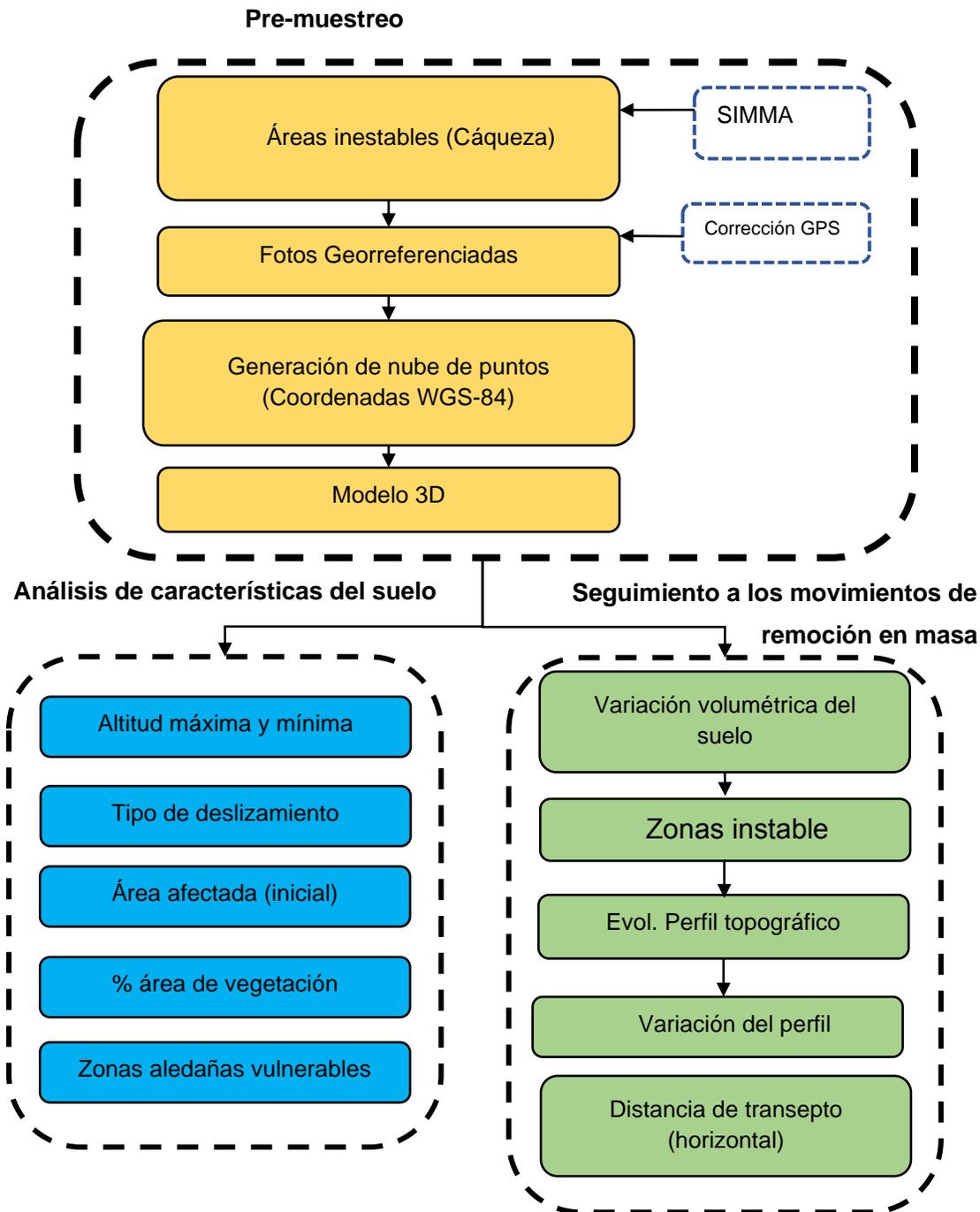
Variación volumétrica del suelo.

Variación del perfil topográfico (Desplazamiento, flujo y deposición).

distancia de cada punto del terreno tomado. A partir de varias tomas multitemporales se compara los diferentes perfiles topográficos sobre la misma sección de terreno y sobre la variación se determina las zonas de desplazamientos positivos, neutros y negativos que significarían la deposición, el flujo y el desplazamiento.

Figura 12

Diagrama de flujo de la metodología a aplicar



Pre-Muestreo

Para la primera etapa del proyecto, se realizó una búsqueda de las zonas donde se han presentado movimientos de remoción en masa recientemente, a partir de la revisión de la información de deslizamientos (tipo de movimiento en masa, ubicación y fecha del evento) del Servicio Geológico Colombiano (SGC) en su plataforma SIMMA (Figura 13), los cuales son el insumo para identificar las zonas con mayor incidencia a movimientos de masa. Estando en los puntos seleccionados se verificaba que si se presentaran rasgos de movimientos en masa como son suelos descubiertos, derrumbes de escarpes, material no consolidado de suelo depositado en las carreteras o la presencia de espejos de falla y fisuras superficiales.

Figura 13

Detalles de los movimientos de deslizamientos en tierra en la plataforma SIMMA.

DETALLES DE CATÁLOGO		Localización Geográfica	
Confiability	Certeza mes año	Evento:	
Fecha Evento:		Url Fecha Evento:	https://noticierodellano.com/derrum-de-grandes-proporciones-bloquearon-la-carretera-a-bogota/
Fecha Reporte:	30/06/2020	Diligenciamiento:	30/06/2020
Código:	41515	Importancia:	ALTA
Institución:	Servicio Geológico Colombiano	Encuestador:	Francisco Uribe Rojas
Fuente del Registro:	NOTILLANO	¿Proviene de infórmenos?:	No
Localización			
Departamento:	CUNDINAMARCA	Municipio:	CÁQUEZA
Vereda:	CÁQUEZA	Altura:	1631 m
Latitud:	4° 24' 50.4"	Longitud:	-73° 57' 36"
Sitio:	Cuerpo	Referentes Geográficos:	En jurisdicción de Caqueza sobre via 4006 en el km 25 + 700

Para establecer el día en el cual se realizarían los levantamientos, se realizaron monitores del tiempo a través de la aplicación *UAV forecast*, el cual permite conocer condiciones como la precipitaciones o ráfagas de vientos, siendo estas las que impiden el desarrollo de los vuelos con VAN'S.

Los levantamientos de datos en terreno se realizaron con UAV Mavic Pro de la casa fabricante DJI, es un cuadricóptero que cuenta con un peso no mayor a 250 gramos, adicionalmente viene equipada con una cámara de composición de colores RGB (en sus siglas en inglés Red, Green y Blue respectivamente); esta información se almacenó en tiempo real en una memoria interna y para visualizar al mismo tiempo la lo que la cámara estaba captando se utilizaron dispositivos móviles y las aplicaciones: DJI 4.0; así como un radio control para poder maniobrar el UAV. Este equipo operó a una distancia máxima de 1 km y una altura 120m, con una autonomía de vuelo de 30 minutos.

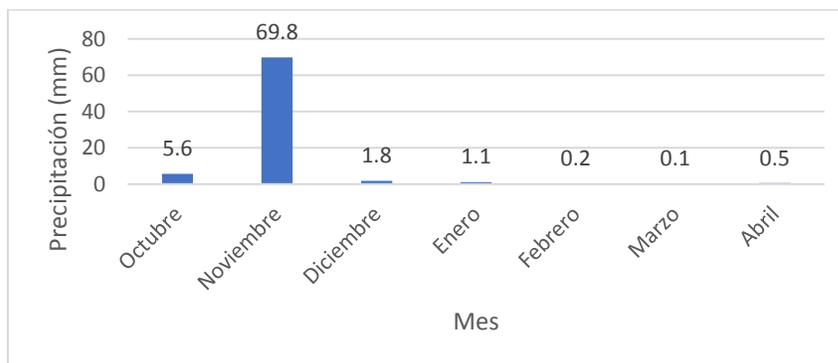
Para la toma de imágenes se hizo de tal manera que tomara diferentes ángulos del área de estudio, con el fin de suministrar la mayor información de la zona y que al momento de realizar el proceso en el programa de Pix4D en la computadora, tenga suficientes datos para para triangular puntos y corregirlos con unos puntos de control en tierra con el GPS del celular.

Para finalizar la etapa de pre-muestreo, se verificaron los resultados en el computador con el programa Pix4D, donde se ofrece la opción para construir el modelo digital de terreno (DEM), el ortomosaico y el modelo en 3D a partir de las imágenes tomadas, el cual se permite realizar ya que utiliza el algoritmo de SfM.

La caracterización de los movimientos seleccionados se realizó a partir de un pre-reconocimiento en campo para extraer las variables de estudio las cuales son: el área afectada por movimientos de remoción, el porcentaje de vegetación presente por área afectada, el número de puntos de control en tierra (GCP, por sus siglas en inglés: Ground Control Points) que permitan una georreferenciación con una raíz del error cuadrático medio (RMSE) menor a los 10 cm como lo muestra el autor, adicionalmente se realizó el seguimiento al comportamiento de las lluvias (Figura 14) antes y durante el periodo en el cual se realizaron las tomas de datos en campo ya que es el desatante más común de los movimientos en masa, lo cual se encuentra consignada la precipitación presente desde el mes de octubre de 2020 hasta el mes de abril 2021.

Figura 14

Precipitación en Cáqueza, Cundinamarca desde los meses de octubre de 2020 a abril 2021 Fuente: IDEAM



Análisis de las Características del Suelo

A partir de los resultados obtenidos en la fase pre-muestra se determinaron las variables para analizar las características del terreno donde se evidenciaron rasgos de movimientos. Primero se determinaron las construcciones aledañas que pueden sufrir

daños a causa de una activación de un movimiento en masa, como pueden ser carreteras, viviendas, sistemas de comunicación, etc.

A continuación, se determinó el área afectada en cada una de las zonas de deslizamientos según sus características geofísicas detectadas en la imagen de composición RGB, las cuales se delimitaron con un *shapfile* donde facilita conocer el valor del área, el cual se consigna en la tabla de atributos de este. De manera similar se determinó el área de las coberturas de vegetación de las zonas donde se presentan los movimientos y aplicando la Ecuación (1) se calculó el porcentaje de vegetación:

$$\% \text{ Vegetación} = \frac{\text{área de cobertura de vegetación}}{\text{área afectada por movimiento de remoción}} * 100\% \quad (1)$$

Para hallar los valores de altitud máxima y mínima del terreno estudiado se utilizó la herramienta de *Terrain Profile* (*plug-in* del programa ArcGis), donde a partir de un barrido identifica los datos de interés.

Para finalizar, la información de tipo de movimiento se consultó en la base de datos SIMMA, para realizar una descripción del movimiento según los parámetros que determinan los autores Cruden y Varnes (1996).

Seguimiento a los Movimientos de Remisión en Masa

Aplicando el método que establece Delacourt et al. (2007), Rossi et al. (2018) y Turner et al. (2015) se calculan las zonas que han presentado mayor variación volumétrica para cada una de las áreas de estudio, con la calculadora de mapas de ArcGIS aplicando la siguiente ecuación:

$$\Delta Volum = \text{Capa del último levantamiento} - \text{Capa del primer levantamiento} \quad (2)$$

Posteriormente, se identificaron las zonas inestables con la metodología aplicada por Rossi et al. (2018), el cual ubica escarpes colapsados, usando las capas de cambio volumétrico se encontraron ya que presentan una caída local mayor a tres metros.

Luego de identificar las zonas inestables, se procede a analizar el perfil topográfico y su evolución, en la cual Turner et al. (2015) menciona que se identifican 3 subzonas: desprendimiento, donde la pendiente sufre una caída local ya que sufre una pérdida de material, flujo o transporte, en la cual no se presentan variaciones en el perfil topográfico a lo largo del tiempo y depósito, en el que tenemos un aumento de la pendiente topográfica debido a la acumulación de material.

Por último, se calcula la cantidad de masa que se desplazó en la zona afectada, la cual permite conocer la magnitud del movimiento y lo cual permitiría determinar el riesgo que está representando para el municipio.

Resultados y discusión

Análisis de las Características del Terreno

Se incluyeron tres sitios ubicados en el municipio de Cáqueza, en zonas de influencia de la carretera que comunica del centro con el oriente del país.

Los datos tomados presentan una precisión geográfica entre 2.29 y 54.86 centímetros (Tabla 5). El sitio MRM 1 presentó mayor error de imprecisión (54.8 cm) debido a que presenta mayor extensión de área afectada analizada, a diferencia del MRM3 que presentó menos error de imprecisión (2.2 cm) debido a la cantidad de puntos de control en tierra utilizados para la georreferenciación respecto área. Siendo consistente con lo reportado por Rossi et al. (2018) que afirmó que las áreas con mayor punto de control permitieron obtener errores más pequeños; lo que implica que la densidad de puntos para georreferenciación es fundamental para mejorar la precisión de la información para el análisis. En la Figura 14 se muestra que el mes de noviembre de 2020 se presentaron lluvias de 69.8 mm, lo cual es un valor que no representó ser relevante para provocar un movimiento de remoción de masa según lo reportado por el SGC.

Tabla 5

Precisión de los datos.

Movimiento de remoción en masa	Fecha	GCPs	X Y RMSE (cm)
MRM 1		12	54.86
MRM 2	05-Feb	9	3.5
MRM3		12	2.29

MRM 1

La primera zona de estudio (Figura 15) se encuentra ubicada entre la entrada a cabecera municipal de Cáqueza, Cundinamarca y la variante Bogotá-Villavicencio en las coordenadas para el movimiento es $4^{\circ}24'449,977''$ Norte y $73^{\circ}57'33,769''$ Oeste. El movimiento fue registrado como un movimiento de remoción de masa de tipo deslizamiento según el SGC, ocurrido el día 30 de julio de 2020 y fue escenario de un bloqueo de paso vehicular. En la primera toma de datos del movimiento la zona abarca un área de $34799,15 \text{ m}^2$ con 15% (Tabla 6) de cobertura de vegetación y representa una gran amenaza por encontrarse al lado de la nueva vía al llano, también a casas rurales que se encuentran al oriente. La zona de estudio se encuentra entre 1742,38 m s. n. m. y 1496.9 m s. n. m., cuenta con pastos bajos y vegetación arbustivas y presenta una amplia superficie de falla caracterizadas por las estrías que se observan en las imágenes.

Figura 15

Imágenes del MRM 1 extraídas del modelo 3D



Tabla 6*Datos del área de estudio MRM 1*

Movimiento de remoción en masa	Fecha	Área afectada (m ²)	Área de vegetación (m ²)	Porcentaje de Vegetación (%)
MRM 1	05-Feb	34799.2	5117.2	15%

MRM 2

Para el segundo movimiento (Figura 16), se tomó una zona que se encuentra ubicada en las coordenadas 4°24'2.755 norte y 73°56'19.357" oeste, en la antigua vía de Bogotá-Villavicencio, en el momento conecta las viviendas rurales de Cáqueza con el casco urbana, aledaño al área afectada se encuentran varias viviendas rurales y una zona de pastoreo en la cima de la montaña. El deslizamiento cuenta con un área descubierta debido al movimiento de 1968 m², con 22% vegetación (Tabla 7). A diferencia de MRM 1, esta zona se encuentra en una montaña más pequeña donde el punto más alto está a 1706.55 m s. n. m. y el más bajo es de 1669.87 m s. n. m., donde se evidencian fallas en la superficie como es el colapso de taludes y también remoción de material en la zona baja donde colinda con la carretera con retroexcavadoras.

Figura 16

Imágenes del MRM 2 extraídas del modelo 3D

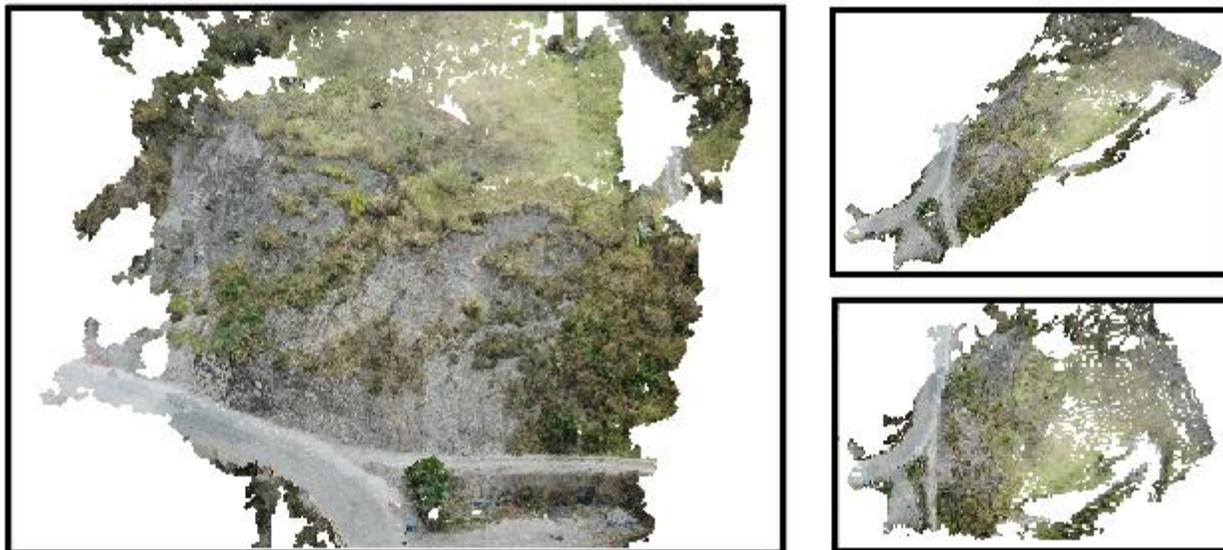


Tabla 7

Datos del área de estudio MRM 2

Movimiento de remoción en masa	Fecha	Área afectada (m ²)	Área de vegetación (m ²)	Porcentaje de Vegetación (%)
MRM2	05-Feb	1943.5	433.7	22%

MRM 3

El último movimiento de remoción de masa seleccionado (Figura 17) se encuentra ubicada en las coordenadas 4°23'01.3" norte y 73°54'43.3" oriente, sobre la vía antigua de Bogotá a Villavicencio y se encuentra aledaña al río Negro, no presenta construcciones, ni edificaciones ni viviendas cerca que puedan ser afectadas ante la activación del deslizamiento. El movimiento es un deslizamiento de tierra el cual se presenta en gran parte de él cerca de la carretera como se evidencia en la gráfica a

continuación y cuenta con un área descubierta de 3518,3 m² y 60% (Tabla 8) de cobertura de vegetación presente en la zona, el sitio cuenta con el punto alto a 1527.58 m s. n. m. y el punto más bajo a 1478.77 m s. n. m. La zona de estudio cuenta con unas canaletas que sirven como sistema de drenaje para disminuir la saturación de agua subterránea.

Figura 17

Imágenes del MRM 1 extraídas del modelo 3D

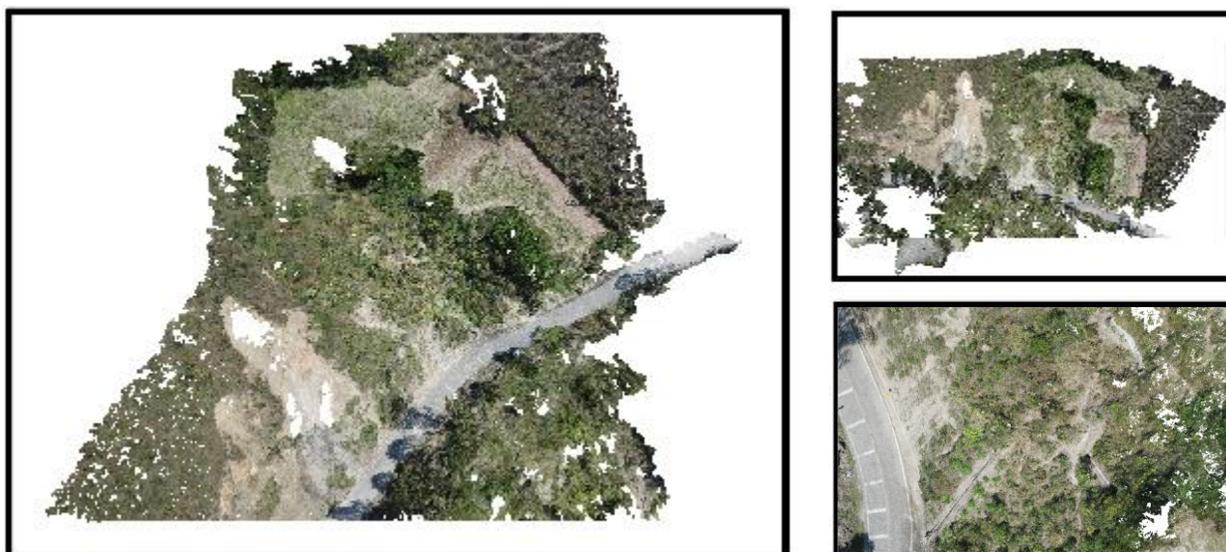


Tabla 8

Datos del área de estudio MRM 3

Movimiento de remoción en masa	Fecha	Área afectada (m ²)	Área de vegetación (m ²)	Porcentaje de Vegetación (%)
MRM 3	05-Feb	3518.3	2111.1	60%

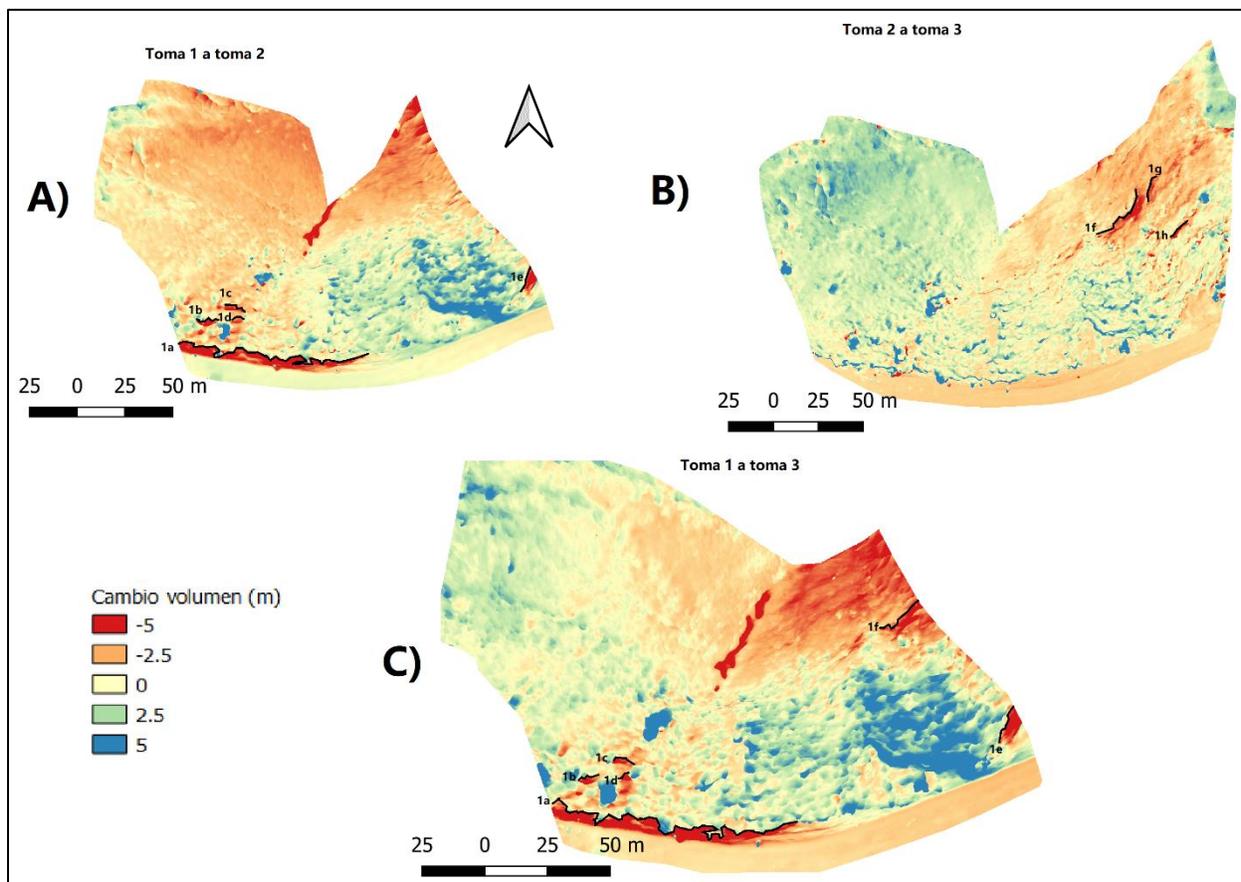
Seguimiento a los Movimientos de Remoción en Masa

MRM 1

Zonas inestables. La toma 1 (5 de febrero) es la información de referencia para identificar los cambios que se producen en el área de interés a partir de la comparación de DEM. De la toma 1 a la toma 2 (22 de marzo) colapsaron cuatro escarpas al suroriente de Figura 18.A (1a, 1b, 1c y 1d) y una al oriente (1e) los cuales se encuentran muy cercanos a la carretera. Entre la toma 2 y toma 3 (22 de abril) se visualizan tres escarpas nuevas ubicadas en la parte nororiental del área de estudio (Figura 18.B) y a diferencia, estos últimos se presentaron en la zona alta de la montaña (1f, 1g y 1h). Por último, se presenta en la Figura 18; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** C seis de las ocho escarpas identificadas entre las tomas, ya que, para el último sobre vuelo, no se extrajeron los datos de la zona donde colapsaron los escarpes 1g y 1h.

Figura 18

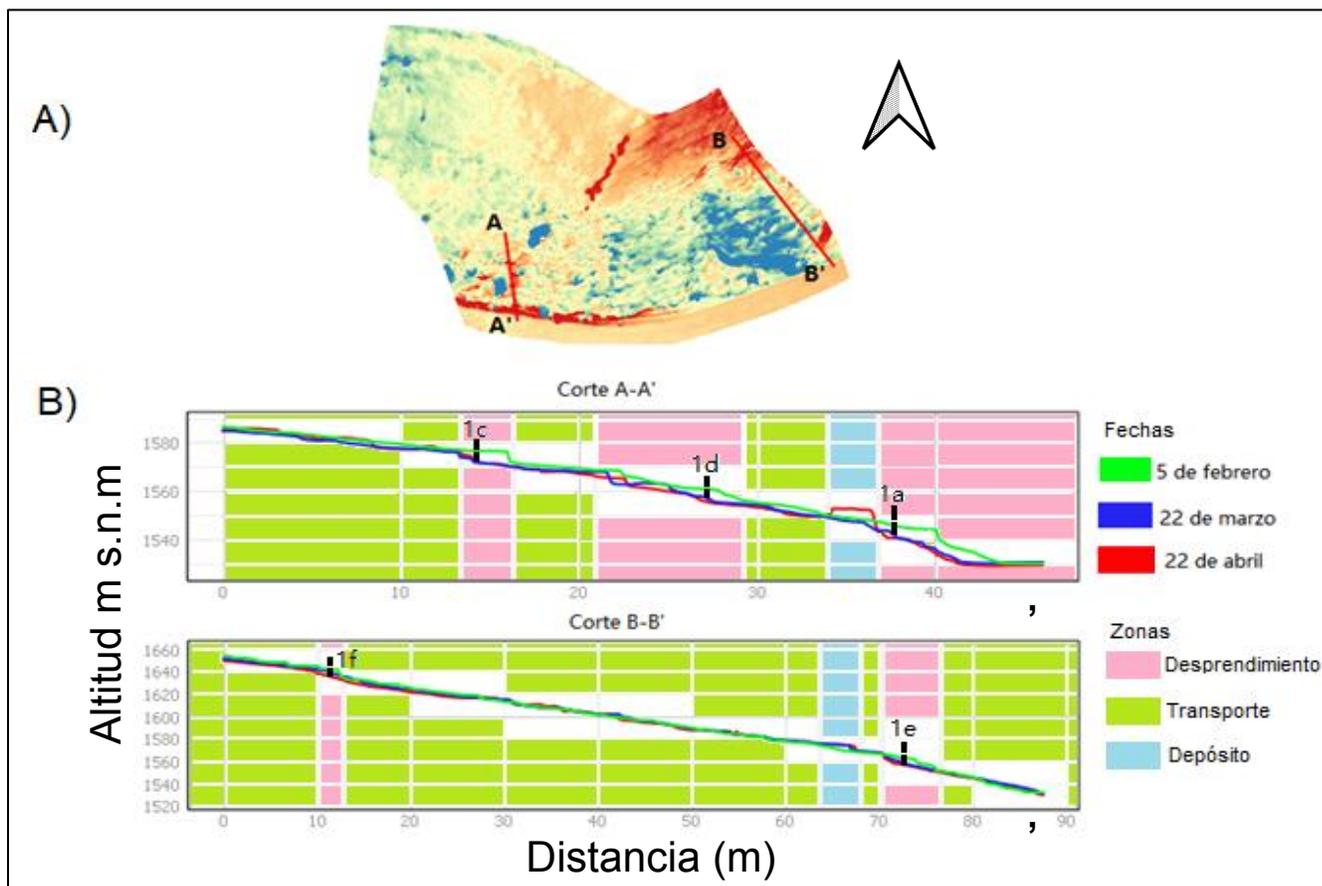
Cambio volumétrico entre las diferentes tomas realizadas en el MRM 1



Evolución perfil topográfico. La primera zona inestable identificada se muestra en la Figura 19.B como donde a partir del corte hecho A-A' se evidenciaron los primeros desprendimientos desde el perfil de referencia (5 de febrero) con el segundo perfil (22 de marzo), a una distancia desde A de 14 m, 23 m, 27 m y a 37 m, pero sin generación de depósitos. Para la tercera toma se encontró un desprendimiento adicional en la zona intermedia a 23 m y 25 m y la generación del depósito de material inmediatamente al lado cuesta arriba del desprendimiento de escarpa "1a" a una distancia de 35 m de A. Para el corte B-B', entre la primera toma y segunda se encontró un depósito a 65 m de B y una zona de desprendimiento en la parte baja a 71 m.

Figura 19

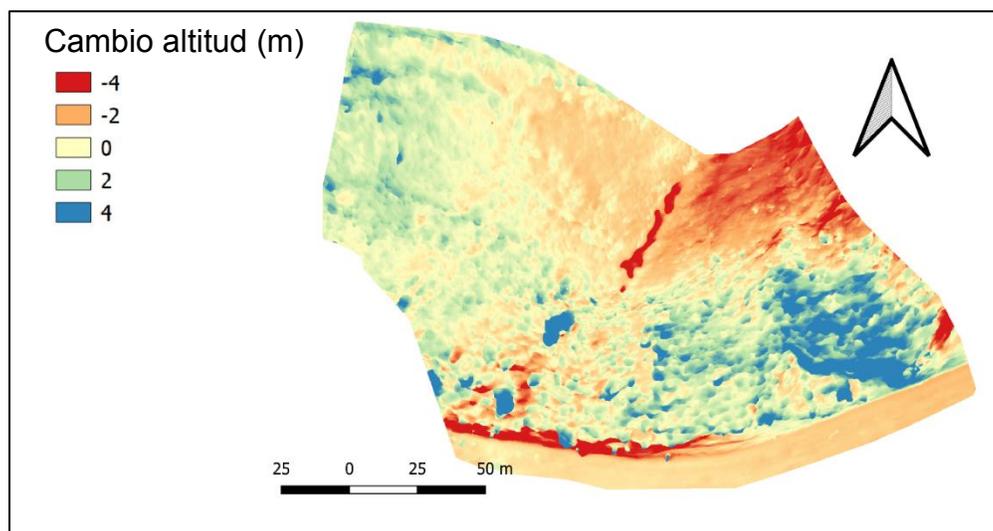
Imágenes de a) ubicación de los cortes sobre el área de estudio MRM 1 y b) perfiles topográficos



Cambio en el DEM. El cambio volumétrico del MRM 1 presentado en la Figura 20 muestra que se generan áreas de desprendimiento en la parte norte-oriental las cuales son zonas altas del y también se presentan pérdidas de material en zonas bajas como son la zona suroccidente y oriental cercanas a la carretera. Los depósitos que se muestran en la gráfica a continuación lo cual muestran una gran cantidad de material concentrado en el centro y oriente del área de estudio, aunque se presenta una dificultad de clasificarlos como depósito y el volumen debido al proceso crecimiento forestal. La zona occidente no presentó un cambio representativo de volumen, lo cual lo clasifica como una zona estable.

Figura 20

Cambio en el DEM del MRM 1



En la Tabla 9 se encuentra la variación de material perdido/ganado entre las tres tomas, se encuentra que para la segunda toma se genera un cambio de volumen negativo de 12773.52 m^3 , es decir, donde se han producido más pérdidas de material de 23513.98 m^3 , lo cual se pudo haber salido del área de estudio para alrededores

como es la carretera que se encuentra en la parte baja. Para la tercera toma se evidenció que hubo un aumento de material de 16656.96 m³ donde se generó un desprendimiento de material de 14082,85 m³ lo cual es menor que lo que se desprendió en la segunda toma. Realizando una comparación entre el cambio volumétrico entre el la toma 1 hasta la toma 3 se evidencia que el cambio volumétrico es de 3883.44 m³ lo cual indica una variación positiva y que adicionalmente el dato presentado es el total de cambio que ha sufrido la zona.

Lo mismo ocurre para el caso de la remoción de masa al calcular el cambio que se genera desde la primera toma hasta la segunda, donde sufre una remoción de material total de 37.596.83 m³. Cabe resaltar que en el intervalo de tiempo donde se genera mayor cambio volumétrico es desde el mes de marzo al mes de abril pero donde se genera mayor remoción de tierra fue entre el mes de febrero al mes de marzo.

Tabla 9

Datos de a) cambio volumétrico de la zona de estudio y b) volumen de material removido en el movimiento MRM 1

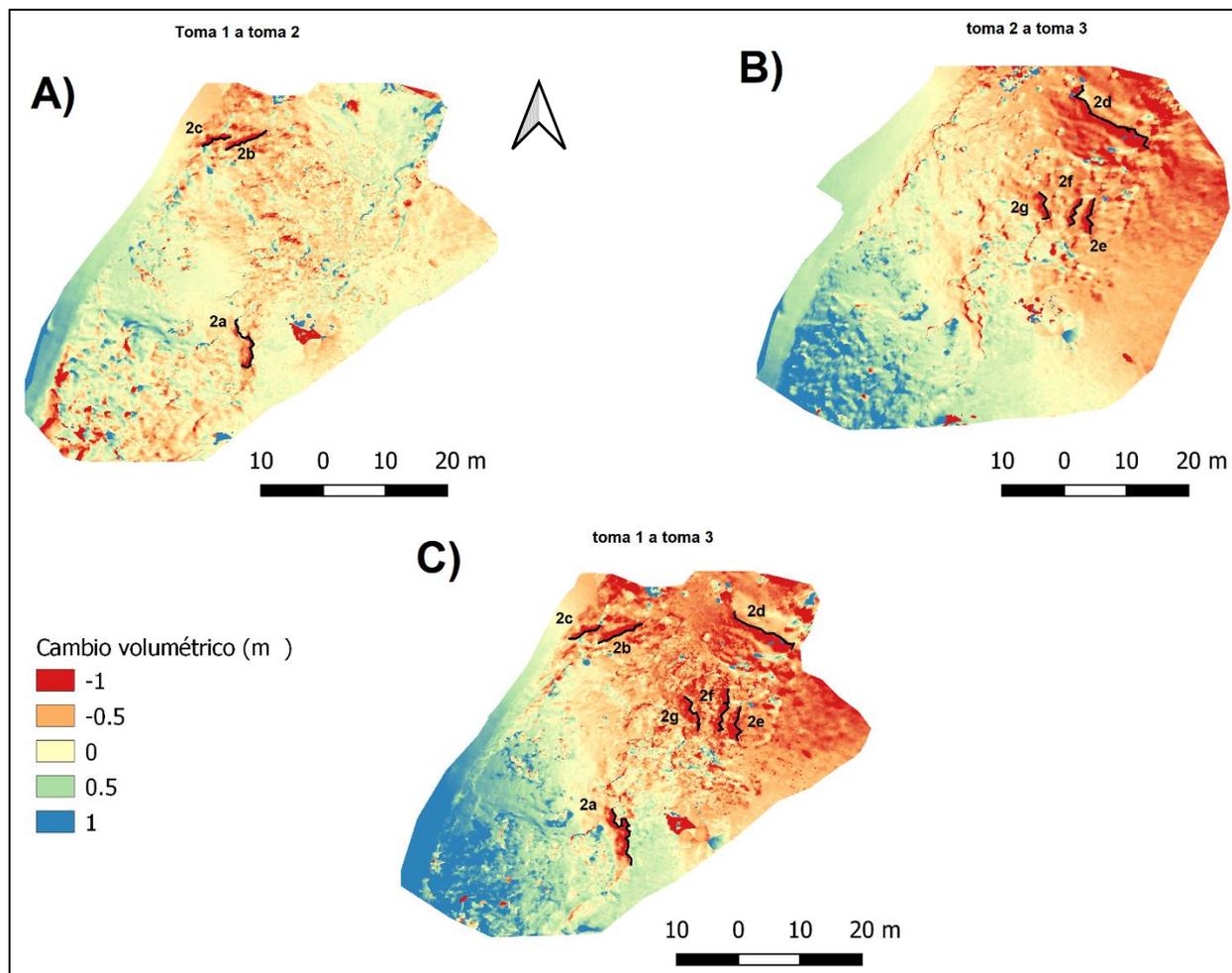
Levantamiento	Cambio de volumétrico (m ³)	Remoción de material (m ³)
1-2	-12,773.52	23,513.98
2-3	16,656.96	14,082.85
1-3	3,883.44	37,596.83

MRM 2

Zonas inestables. Para el movimiento MRM 2 se presentó el mismo número de escarpes generados en el área de estudio MRM 1. Los escarpes se concentran en la parte norte de la zona de estudio ya que solo uno se presenta en el centro del área de estudio, también se observó que la mayoría de los escarpes aparecen en la parte superior de la montaña. En la Figura 21.A **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** donde se presenta el cambio volumétrico entre el 5 de febrero y 22 de marzo y se presentan tres escarpes, uno ubicado en la parte central, y los otros dos en la parte norte cerca de la carretera de acceso al municipio. En la Figura 21.B **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se distinguen cuatro nuevos escarpes, todos concentrados en la zona norte más arriba de la carretera.

Figura 21

Cambio volumétrico entre las diferentes tomas realizadas en el MRM 2

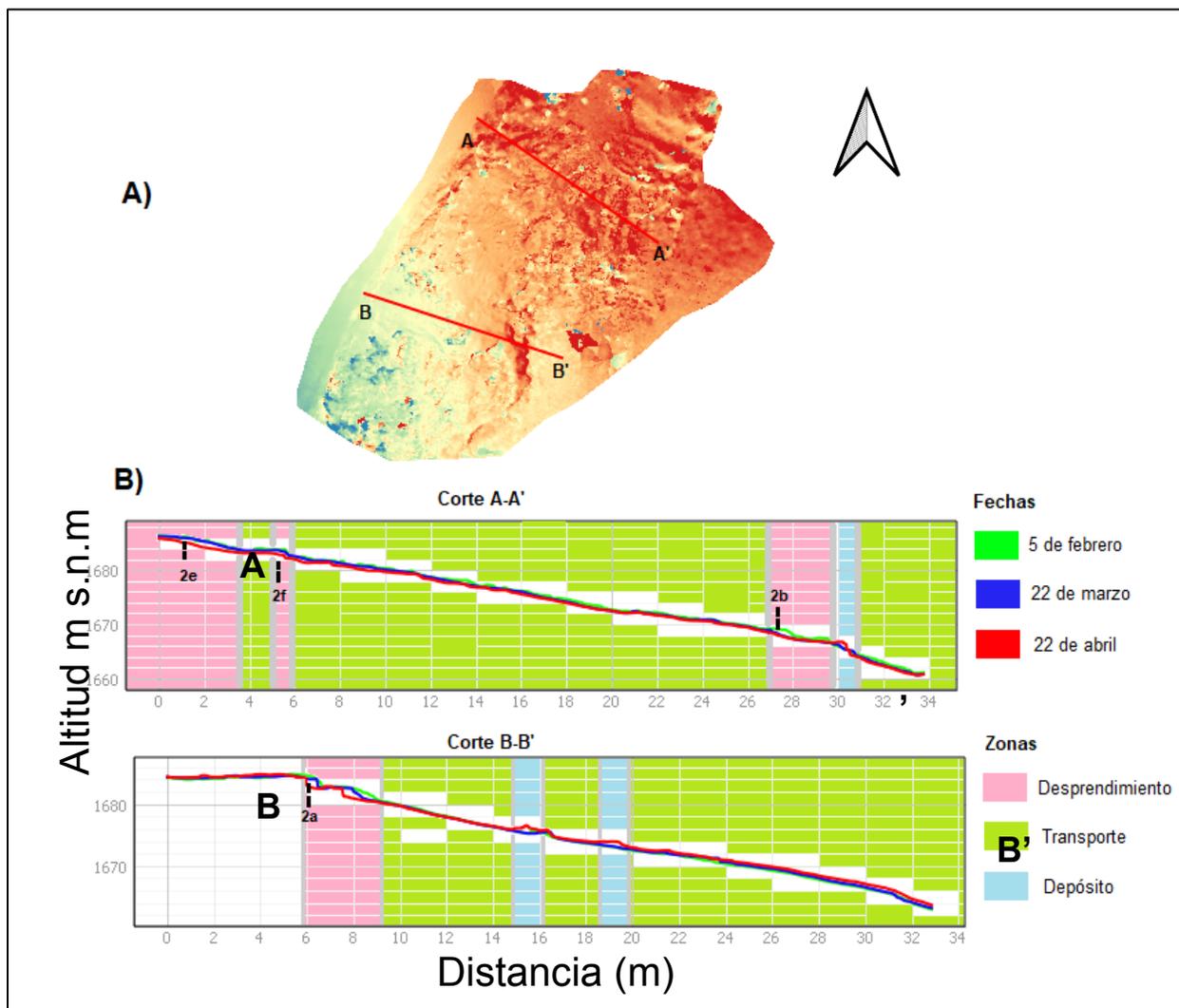


Seguimiento a perfil topográfico. Para el caso del MRM 2, se obtuvieron dos perfiles transversales sobre las áreas inestables identificadas (Figura 22.A). En el corte A-A' (Figura 22.B), para la segunda toma con respecto a la primera solo se encontró un desprendimiento de material a una distancia de 27 m con respecto al punto A. Para la tercera toma con respecto a la segunda se evidencio el desprendimiento de material a 1 y 5 m, ambos ubicados en la zona alta de la pendiente y también se formó un depósito en la zona baja a 30 m con respecto a A. Total se formaron tres zonas de desprendimiento, tres zonas de flujo y un depósito.

Para el caso en el corte B-B' (Figura 22.B) en la segunda toma se encontró un desprendimiento a 8m con respecto a B, que posteriormente se fue desprendiendo mucho más material, hasta que en la toma tres se encontraba ubicada desde los 7 m con respecto a B. En la tercera toma se genera un desprendimiento adicional a 6m y dos depósitos a 15 m y a 19 m con respecto al punto B. Al final se formaron dos zonas de depósito, una zona de de desprendimiento y tres zonas de flujo.

Figura 22

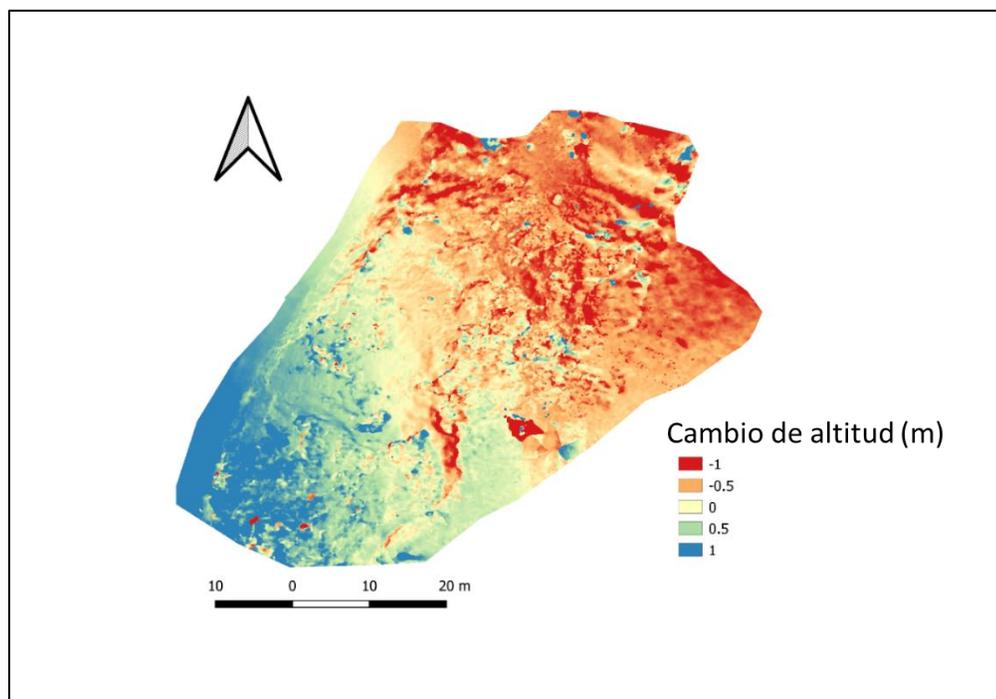
Imágenes de a) ubicación de los cortes sobre el área de estudio MRM 2 y b) perfiles topográficos



Cambio en el DEM. En el MRM 2 es notable que la zona de pérdida de material se encuentra en la parte norte y cercana al centro, con profundidades de hasta 1 metro. El material tiene una zona de transporte en la parte central de la imagen y los depósitos se evidencian en la parte occidental y unas concentraciones de masa en la zona norte. Se deduce que el material tiende a concentrarse en la parte suroccidental donde se encuentra una vía secundaria a casas aledañas ya que a pesar de que en esta zona se presenten desfases de datos por crecimiento de vegetación, en la carretera se pueden despreciar ya que sobre esta no se tiene forestado.

Figura 23

Cambio DEM en el MRM 2



En la Tabla 10 se consigna la cantidad de material que perdió/ganó la zona de estudio MRM 2. Se encontró que en la segunda toma se generó un cambio volumétrico de tierra de -67.8 m^3 , el valor negativo se debe a que se genera una pérdida de material,

con un desprendimiento de material de 217.16 m³. En la tercera toma, con respecto a la segunda, se evidencia un cambio volumétrico negativo de 120.78 m³, donde se presenta una remoción de masa también mayor de 538.56 m³. El cambio volumétrico total se encuentra al comparar la primera y tercera toma, dando como resultado un cambio de 188.58 m³ de pérdida de material comparado con el que se puede concentrar en el área de estudio. Se muestra un total de 755.72 m³ de desprendimiento de material el cual se perdido.

Tabla 10

Datos de a) cambio volumétrico de la zona de estudio y b) volumen de material removido en el MRM 2

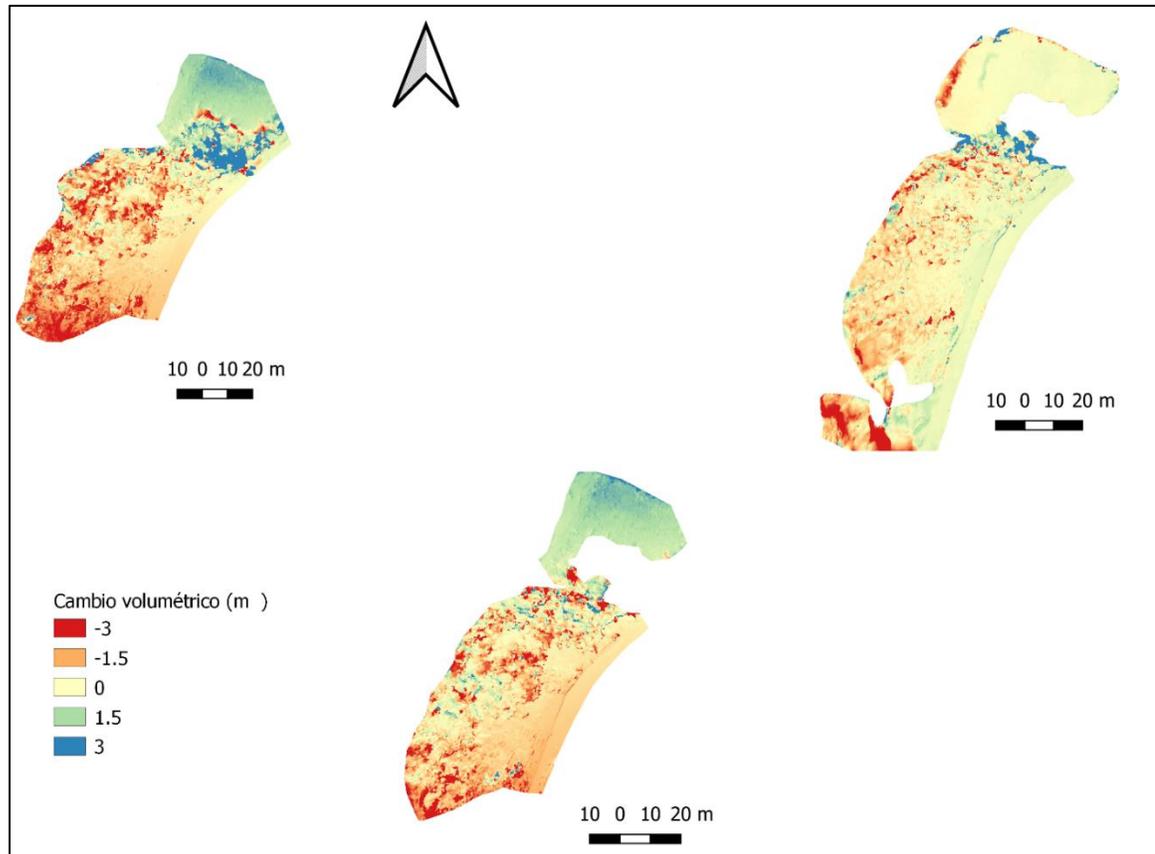
Levantamiento	Cambio de volumétrico (m ³)	Remoción de material (m ³)
1-2	-67.80	217.16
2-3	-120.78	538.56
1-3	-188.58	755.72

MRM 3

Zonas inestables. Por último, se observó que en la zona de estudio MRM 3 (Figura 24) **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, debido al ruido que registran los datos por la vegetación presente, no se puede determinar las escarpas generadas en ubicaciones altas y lo que impide identificar las áreas inestables en la totalidad de la imagen. Por lo tanto, solo se pudo realizar la tarea para la zona norte y la zona central baja aledaña a la carretera. Limitado a realizar la búsqueda en solo dos áreas, se encuentra que no presentan escarpas, esto pudo haberse dado ya que durante el pre-muestreo se identificaron diferentes canaletas como sistemas de drenaje instalados para disminuir la generación de deslizamientos, el cual se puede ver que lo consigue ya que evita la saturación de agua.

Figura 24

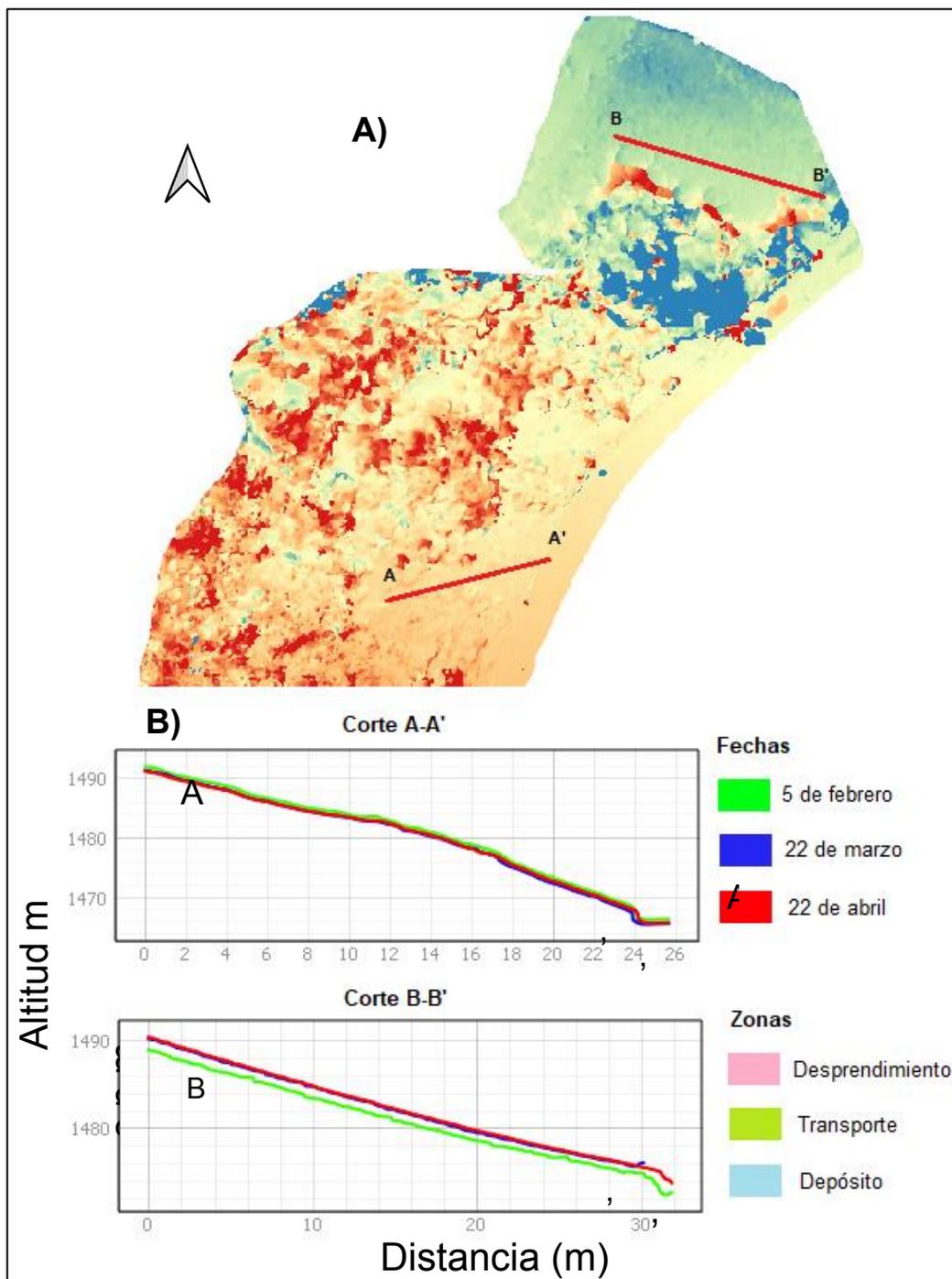
Cambio volumétrico entre las diferentes tomas realizadas en el MRM 3



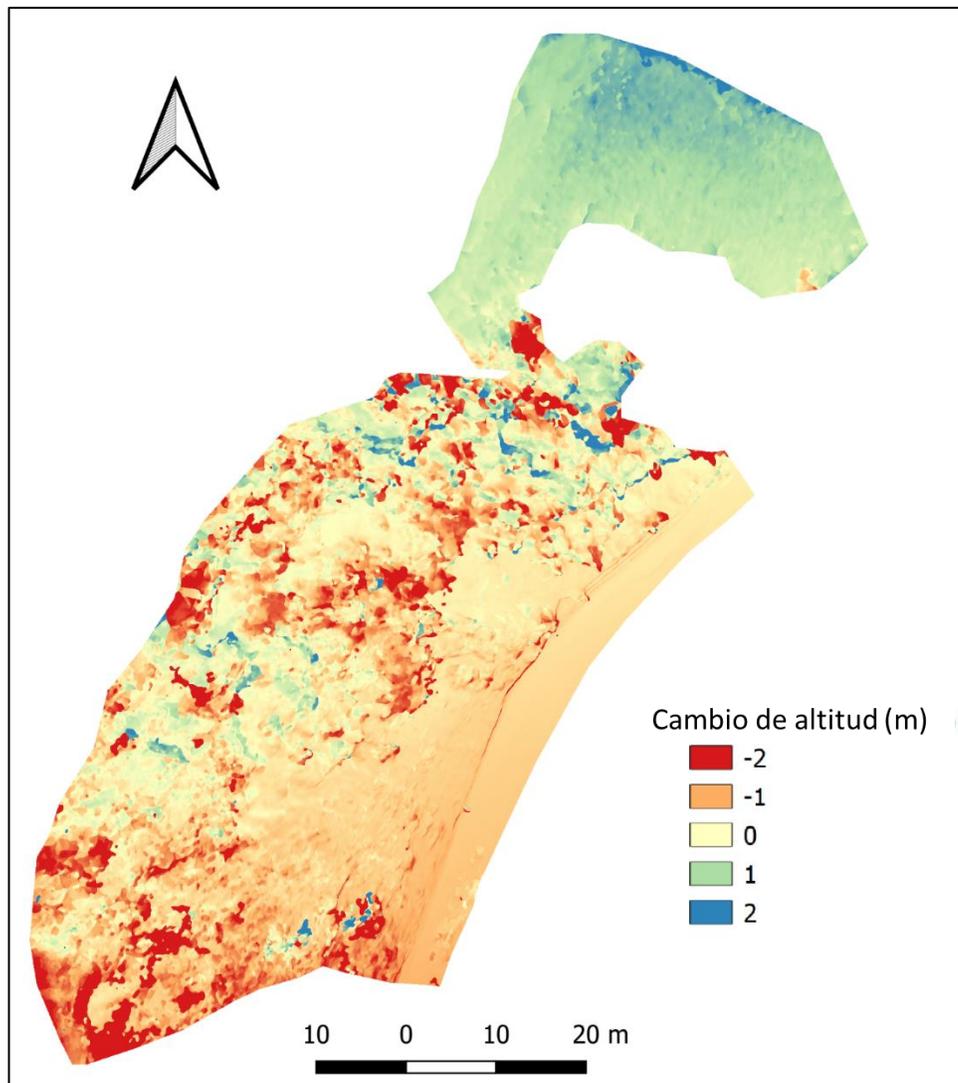
Evolución perfil topográfico. Como ya se había establecido en los resultados anteriores para la misma área de estudio, no se presentan zonas inestables, donde se han realizados los transeptos sobre los datos de terrenos que no presentaron ruido (Figura 25.A), áreas que no presentan cambios en los perfiles topográficos, aunque se evidencia un desfase de elevación en los datos que se encuentran al norte de la imagen de pre-muestreo (5 de febrero) menor a 5 metros.

Figura 25

Imágenes de a) ubicación de los cortes sobre el área de estudio MRM 1 y b) perfiles topográficos



Cambio en el DEM. Por último, en el MRM 3, el cambio volumétrico que presentan las dos zonas donde no hay vegetación y en los cuales se han desarrollado todos los análisis de seguimiento, se puede evidencia que la zona central ha sufrido pequeños desprendimientos (menores que 1 metro) de manera uniforme (Figura 26). Luego, la segunda zona ubicada al norte, debido al desfase por los datos no se puede definir si es un área de desprendimiento, transporte o depósito, pero si es notable que de ser alguno no ha sufrido cambios relevantes debido a que no presenta escarpes.

Figura 26*Cambio DEM en el MRM 2*

Los datos de cambio volumétrico y de remoción de masa se encuentran en la Tabla 11. En la segunda toma se evidencia un cambio volumétrico negativo con respecto a la toma uno de 2288.4 m^3 y un desprendimiento y remoción de material en el mismo intervalo de tiempo de 363.83 m^3 . En el caso de la toma tres con la toma dos se ve una reducción de volumen de 167.52 m^3 con una remoción de material de 365.08

m³. El total de la variación de volumen entre febrero a abril es de 2455.92 m³ y material removido es de 728.91 m³.

Tabla 11

Datos de a) cambio volumétrico de la zona de estudio y b) volumen de material removido en el MRM 2

Levantamiento	Cambio de volumétrico (m ³)	Remoción de material (m ³)
1-2	-2,288.40	363.83
2-3	-167.52	365.08
1-3	-2,455.92	728.91

Síntesis de Resultados

En los resultados hallados se identificaron dos zonas de inestables se identificaron a partir de la generación de escarpas colapsadas, método utilizado por Tuner et al. (2015) y el cual el MRM 1 y dos en el MRM 2 donde se encontró que para ambas presentaban siete escarpas colapsadas y aunque la MRM 3 no se visualizaban escarpes colapsados, se permitió hacer el seguimiento de los perfiles sobre áreas descubiertas y sin vegetación para verificar desde ese si no presentaba alguna variación en su geoforma.

En las regiones donde el perfil topográfico ha presentado cambios positivos, es decir, la sección de la pendiente donde se evidencia aumento de material con respecto al perfil de referencia, son consideradas zonas de depósito. Aquellas donde se han presentado cambios negativos, es decir, secciones de la pendiente donde se muestra una disminución de material, son consideradas las zonas de desprendimiento respectivamente. Por último, las secciones de la pendiente donde no se generaron cambios significativos de material, son consideradas zonas de flujo (Rossi et al., 2018).

En el seguimiento, el único caso donde no se evidenciaron generaciones de zonas de desprendimiento y depósito fue para el MRM 3, en la evolución de los cortes del MRM 1 se puede encontró que los depósitos se generaban a continuación (cuesta abajo) de una zona de flujo. Entre los cortes realizados para esta área de estudio, el corte A-A' presentó más zonas de desprendimiento (tres) que el corte B-B' (dos) que fue el corte más largo realizado sobre la imagen. Para el caso de MRM 2, el corte que presentó mayor número de zonas de desprendimiento fue el corte A-A' con tres zonas y un depósito.

Las zonas que se obtuvieron de depósito, según Lucieer et al. (2015), son las zonas más vulnerables al colapso y generación de desprendimientos y por ende a movimientos de remoción de masa, explica el autor que se debe al aumento de la pendiente local y por consiguiente una concentración de tensiones hasta una cantidad de tensión límite donde se genera la ruptura.

Por último, se encontró la magnitud de la variación de volumen del terreno que tiene cada una de las áreas estudiadas, siendo el MRM 1 quien presenta un cambio volumétrico mayor positivo, es decir, se concentró mayor cantidad de masa de material de la que ya se encontraba en la zona originalmente; siendo este cambio de 3883.44 m³, esto se puede estar presentando ya que esta ubicación es la que presenta mayor área estudiada.

Por otro lado, se tiene que el que presenta mayor cambio volumétrico negativo, es decir, donde el material que se encontraba allí presente se fue perdiendo en el paso del tiempo que se realizaron las tres tomas, es el MRM 3 donde se presentó un cambio volumétrico de 2455.92, aunque este dato se puede estar presentando por un desfase de toma de datos como se muestra en la Figura 24.B corte B-B'.

La variación volumétrica no tiene valores cercanos a cero, es decir, no hay una conservación de masa en la zona, esto se puede estar presentando porque el material se está desplazando a regiones aledañas a la de estudio o viceversa. Según Turner et al. (2015) también se debe a un error en los datos y desalineamientos en los DEM y cambios ambientales.

Los resultados obtenidos en el proyecto presentan ventajas sobre las técnicas in situ de deslizamientos de tierra ya que solo se limita a un área de monitoreo ya que se

deben instalar herramientas como pluviómetros para monitorear la precipitación que es el desencadenante más común (Aleotti, 2004; Brunetti et al., 2010; Caine, 1980; Guzzetti et al., 2008; Martelloni et al., 2012; Wieczorek & Glade, 1996).

Para los estudios más avanzados donde no solo se monitorea la precipitación sino también donde se realizan seguimientos al desplazamiento superficial y cambio de pendiente (Chelli et al., 2006; Konak et al., 2004), se presentan inconvenientes porque se debe estar en contacto directo con el área de estudio y produce interferencias con el sistema y el objeto en estudio.

Las técnicas de teledetección son utilizadas al 85% en el seguimiento, mapeo y detección de movimientos de deslizamientos de tierra, los cuales son técnicas flexibles ya que permiten la combinación entre técnicas (Tofani et al., 2013) aunque presentan un límite en cuanto la obtención de datos subterráneos y la baja frecuencia de adquisición de datos e interferencia de la atmósfera.

Estudios de movimientos de remoción en masa con imágenes satelitales permiten conocer la precipitación de la zona y determinar umbrales de riesgos de deslizamientos proporcionando datos de muy alta definición, pero se limita en cuanto la dificultad de hacer un seguimiento cuando los eventos se producen de manera aleatoria y determinar parámetros de cambio volumétrico (Chae et al., 2017).

El método aplicado durante la investigación se puede complementar con demás técnicas como la propuesta por Lu et al. (2011) el cual consiste en identificar y mapear rápidamente los deslizamientos de tierra a partir de imágenes satelitales de alta resolución espacial (imágenes multiespectrales cercanas a 2m y pancromáticas cercanas a 0.31 m) ya que adicionalmente se permitiría calcular la velocidad de

deslizamiento y cantidad de cambio volumétrico, pero no para la fotogrametría basada en SfM ya que la metodología es muy eficiente en áreas pequeñas.

Uso de sensores activos presentan problemas cuando la geomorfología no es apta para la toma de datos como son las pendientes muy pronunciadas y post-procesamiento muy complejo y que no hacen viable hacer un estudio multitemporal (Chae et al., 2017).

Conclusiones

Características como la geomorfología del terreno y la amenaza que representa para una población permiten establecer si un área requiere de un seguimiento a la dinámica de un movimiento de remoción de masa identificado.

Las zonas inestables en un área donde tiene una alta incidencia a deslizamientos se pueden identificar a partir de la ubicación de desprendimientos de escarpas el cual puede ser proporcionado con imágenes aéreas de los drones, también identificando aquellas zonas donde se han generado cambios volumétricos positivos con pendientes muy pronunciadas, para la investigación se lograron identificar dos zonas inestables en el MRM 1 y dos en el MRM 2, de lo contrario, no se presentaron zonas inestables en el MRM 3.

El perfil topográfico de una zona inestable se aprecia la evolución del movimiento, cumpliendo esta un ciclo en donde el material que se comienza a acumular (depósito) generando un aumento tensiones internas y crecimiento en la pendiente, presentará posteriormente un colapso que lo convertirá en una zona de desprendimiento de material.

A partir de los drones se pueden realizar inspecciones visuales de la inestabilidad del terreno y la evolución topográfica del mismo, en cuanto al cálculo volumétrico puede que los datos que se obtengan presenten errores por la precisión de los datos.

Referencias

- Campos et al, A. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Banco.
- Guidicini, G., & Nieble, C. M. (1984). Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Edgard Blücher, 194.
- Harp et al, E. (2002). Inventario digital de deslizamientos de tierra y los depósitos provocados por éstos que causó el paso del huracán Mitch en Honduras. U.S Geological Survey.
- Harp et al., E. (2002). Inventario digital de deslizamientos de tierra y los depósitos provocados por éstos que causó el paso del huracán Mitch en Honduras. Science for Changing the World.
- Jensen, J. (2015). Introductory Digital Image Processing. Pearson Series in Geographic Information Science.
- Lagorreta et al, G. (2017). Estimación del volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geoformas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. Investigaciones Geográficas.
- Legorreta et al, G. (2017). Estimación del volumen de los depósitos asociados. Investigaciones Geográficas UNAM.
- Perea, L., Pedroza, K., Ardila, J., Sarmiento, H., Conde, M., Sosa, M., . . . Córdoba, C. (2019). Contraloría General de la República. Obtenido de Contraloría General de la República: https://www.contraloria.gov.co/contraloria/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/boletines-de-prensa-2019/-/asset_publisher/9IOzepbPkrRW/

content/deslizamientos-y-cierres-en-puntos-criticos-de-via-bogota-villavicencio-no-fueron-incluidos-en-el-nuevo-contrato-

- Sampaio, E. (2006). Modelagem Espacial Dinâmica Aplicada ao Estudo. Rio Claro, São Paulo, Brasil. Sistema de Información de Movimientos en Masa. (2020). Reporte de Registros de Inventarios Encontrados. Servicio Geológico Colombiano.
- Lucieer, A., Jong, S. M., & Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion(SfM)and image correlationof multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, 38, 97 –116.
- De Dios, J. R. M., Merino, L., Caballero, F., & Ollero, A. (2011). Automatic forest-fire measuring using ground stations and unmanned aerial systems. *Sensors*, 11, 6328 –6353.
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., & Lejeune, P. (2013). A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial systemimagery.*Forests*,4,922–944.
- Michez, A., Piégay, H., Lisein, J. (2016). Classification of riparian forest species and health condition using multi-temporal and hyperspatial imagery from unmanned aerial syste. Springer, 188-146, DOI 10.1007/s10661-015-4996-2.
- Alcántara, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definicion, clasificaciones y terminologia. *Investigaciones Geogrdficas, Bolefin del Instituto de Geografia, UNAM*, 41.
- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73, 247–265.

- Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., & Guzzetti, F. (2010). Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 447–458.
- Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler Series A: Physical Geography Annaler Series*, 62, 23–27.
- Carlos-Velero, V., Garcia-Palomino, A., López-Miguel, C., & Gavilán-García, A. (2007). Geología y procesos de remoción en masa asociados a un domo volcánico tipo coulée: Cerro El Tenayo, Tlalnepantla, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(2), 183–201.
- Cerri, L. (2001). *Subsídios para a seleção de alternativas de medidas de prevenção de acidentes geológicos*. Rio Claro S.N.
- Cerri, L. E., & Zuquette, L. (1993). *Riscos geológicos associados a escorregamentos uma proposta para prevenção de acidentes*. Rio Claro S.N.
- Chae, B., Park, H., Catani, F., Simoni, A., & Berti, M. (2017). Landslide prediction, monitoring and early warning: A concise review of state-of-the-art. *Geosciences Journal*, 21(6), 1033–1070. <http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0034-4>
- Chelli, A., Mandrone, G., & Truffelli, G. (2006). Field investigations and monitoring as tools for modelling the Rossena castle landslide (Northern Appennines, Italy). *Landslides*, 3, 252–259.
- Delacourt, C., Allemand, P., Berthier, E., Raucoles, D., Casson, B., Grandjean, P., Pambrun, C., & Varel, E. (2007). Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: A review. *Bulletin de la Société géologique de France*, 178(2), 90–100. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.178.2.89>
- Green, D., Gregory, B., & Karachok, A. (2021). *Unmanned Aerial Remote Sensing UAS for Environmental Applications*. Taylor & Francis Group.

- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, 5, 3–17.
- Konak, G., Onur, A. H., Karakus, D., Köse, H., Koca, Y., & Yenice, H. (2004). Slope stability analysis and slide monitoring by inclinometers readings: Part 2. *Mining Technology*, 113, 171–180.
- Lu, P., Stumpf, A., Kerle, N., & Casagli, N. (2011). Object-oriented change detection for landslide rapid mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8, 685–696.
- Martelloni, M., Segoni, S., Fanti, R., & Catani, F. (2012). Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. *Landslides*, 9, 485–495.
- Montero, J. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Servicio Geológico Colombiano.
- Rossi, G., Tanter, L., Tofani, V., Vannocci, P., Moretti, S., & Casagli, N. (2018). Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization. *ICL/IPL Activities*, 1045/1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0>
- Ruiz, G., Alvarado, C., & Paredes, O. (2013). *Zonificación de amenaza por movimientos de masa en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca*. (Convenio Específico Interadministrativo No. 039 de 2010). Servicio Geológico Colombiano. <http://recordcenter.sgc.gov.co/b7/21003001024681/documento/pdf/2105246811101000.pdf>
- Sabogal, C. (2017). *Caracterización de Variables Relacionadas con la Inestabilidad del Suelo: Caso De Estudio, Cáqueza – Cundinamarca* [Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16368/SABOGALURREGOCARLOS FELIPE 2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Sistema de Información de Movimientos en Masa*. (2020). [Http://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/].

- Snavey, N., M. Seitz, S., & Szeliski, R. (2008). Modeling the World from Internet Photo Collections. *Springer Science*, 80, 189–210. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- Tofani, V., Raspini, F., Catani, F., & Casagli, N. (2013). Persistent Scatterer Interferometry (PSI) technique for landslide characterization and monitoring. *Remote Sensing*, 5, 1045–1065.
- Turner, D., Lucieer, A., & de Jong, S. (2015). Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7, 1736–1757. <https://doi.org/10.3390/rs70201736>
- Wieczorek, G. F., & Glade, T. (1996). Landslide triggering mechanism. In: Turner, A.K. and Schuster, R.L. (eds.). *Landslides Investigation and Mitigation, Special report. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington*, 247, 76–89.

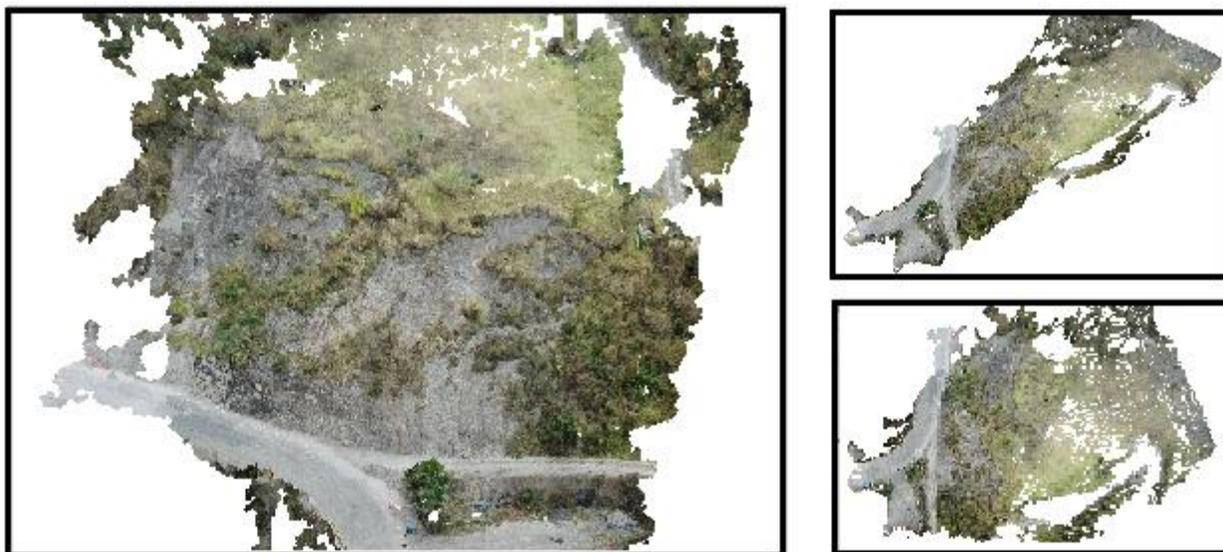
Tablas

Tabla 1 Tabla de clasificación de Riesgos Ambientales.	11
Tabla 2 Información climatológica promedio desde 1981 a 2010 de Cáqueza, Cundinamarca.....	26
Tabla 3 Clasificación unidades geomorfológicas.	28
Tabla 4 Metodología establecida para abordar los objetivos.	30
Tabla 5. Precisión de los datos.	38
Tabla 6 Datos del área de estudio MRM 1	40
Tabla 7 Datos del área de estudio MRM 2.....	41
Tabla 8 Datos del área de estudio MRM 3.....	42
Tabla 9 Datos de a) cambio volumétrico de la zona de estudio y b) volumen de material removido en el movimiento MRM 1	48
Tabla 10 <i>Datos de a) cambio volumétrico de la zona de estudio y b) volumen de material removido en el MRM 2</i>	54
Tabla 11 Datos de a) cambio volumétrico de la zona de estudio y b) volumen de material removido en el MRM 2	60

Figuras

Figura 1 Imagen de un deslizamiento de caída	12
Figura 2 Descripción gráfica de un movimiento de volcamiento	13
Figura 3 Descripción gráfica de los deslizamientos	14
Figura 4 Descripción gráfica de un movimiento de flujo	15
Figura 5 Descripción gráfica de la propagación lateral	16
Figura 6 UAV de ala fija	20
Figura 7 UAV de tipo ala rotatoria.....	21
Figura 8 Ubicación geográfica de Cáqueza	24
Figura 9 Modelo digital de elevación del municipio de Cáqueza	25
Figura 10 Tipos de suelo en Cáqueza, Cundinamarca.....	27
Figura 11 Principales usos de los suelos en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca.....	29
Figura 12 Diagrama de flujo de la metodología a aplicar.....	32
Figura 13 Detalles de los movimientos de deslizamientos en tierra en la plataforma SIMMA.....	33
Figura 14 Precipitación en Cáqueza, Cundinamarca desde los meses de octubre de 2020 a abril 2021 Fuente: IDEAM	35
Figura 15 Imágenes del MRM 1 extraídas del modelo 3D	39

Figura 16 Imágenes del MRM 2 extraídas del modelo 3D



.....	41
Figura 17 Imágenes del MRM 1 extraídas del modelo 3D	42
Figura 18 Cambio volumétrico entre las diferentes tomas realizadas en el MRM 1	44
Figura 19 Imágenes de a) ubicación de los cortes sobre el área de estudio MRM 1 y b) perfiles topográficos	46
Figura 20 Cambio en el DEM del MRM 1	47
Figura 21 Cambio volumétrico entre las diferentes tomas realizadas en el MRM 2	50
Figura 22 Imágenes de a) ubicación de los cortes sobre el área de estudio MRM 2 y b) perfiles topográficos	52
Figura 23 Cambio DEM en el MRM 2	53
Figura 24 Cambio volumétrico entre las diferentes tomas realizadas en el MRM 3	56

Figura 25 Imágenes de a) ubicación de los cortes sobre el área de estudio MRM 1 y b) perfiles topográficos	57
Figura 26 Cambio DEM en el MRM 2	59