

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO MULTITEMPORAL DE EVENTO
DE REMOCIÓN EN MASA, A PARTIR DE MODELOS DIGITALES GENERADOS
CON TECNOLOGÍA RPAS,- EN LA LADERA UBICADA EN BOGOTÁ, SAN
CRISTÓBAL SECTOR BOSQUE DE LOS ALPES**

LINA MARCELA DIAZ HERNANDEZ
ANGEL ACUÑA JOHN EDWARD



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Especialización en Diseño y Construcción de obras
de Infraestructura y Edificaciones
Facultad de Ingeniería civil
Universidad La Gran Colombia
Bogotá
2024

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO MULTITEMPORAL DE EVENTO
DE REMOCIÓN EN MASA, A PARTIR DE MODELOS DIGITALES GENERADOS
CON TECNOLOGÍA RPAS,- EN LA LADERA UBICADA EN BOGOTÁ, SAN
CRISTÓBAL SECTOR BOSQUE DE LOS ALPES**

LINA MARCELA DIAZ HERNANDEZ

JOHN EDWARD ANGEL ACUÑA

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de

Especialización en Diseño y Construcción de obras

de Infraestructura y Edificaciones

Ingeniera Sandra Sánchez Millán

Especialización en Diseño y Construcción de obras

de Infraestructura y Edificaciones

Facultad de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Universidad La Gran Colombia

Bogotá D.C

2024

Agradecimientos

Agradezco a mi esposa y mi hija quienes son mi motivación y apoyo incondicional, a mis padres, quienes ya no me acompañan, pero hicieron todo lo posible por darme las herramientas para avanzar en la vida, a mis hermanos que con su ejemplo han aportado a mi crecimiento personal y profesional.

JEAA

Agradezco primeramente a Dios por el gran milagro de la vida por demostrarme que él lo es todo en mi vida y que el cangrejo solo sería una piedra pasajera, agradezco a mi familia y a mis abuelos que fueron parte fundamental en este camino, por su amor, por su incondicionalidad y el apoyo en todo lo que la vida me brinda.

LDH

Agradecemos a los y las ingenieras que nos brindaron su apoyo y conocimiento para poder darle desarrollo a esta investigación, por cada aporte y la dedicación de tiempo a nuestro proyecto.

Tabla de contenido

RESUMEN	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2. ANTECEDENTES	15
3. OBJETIVOS	23
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	23
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
4. JUSTIFICACIÓN	24
5. HIPÓTESIS.....	26
6. MARCO CONCEPTUAL.....	27
6.1. <i>Tecnología Rpas</i>	27
6.2. <i>Modelos digitales de terreno:</i>	27
6.3. <i>Fotografías aéreas y ortofoto mosaico</i>	27
6.3.1. <i>Fotogrametría</i>	28
6.3.2. <i>Plan de vuelo</i>	28
6.3.3. <i>Movimiento en masa</i>	29
6.3.4. <i>Clasificación de Cruden & Varnes</i>	30
7. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE PROYECTO	34
8. METODOLOGÍA	35

8.1.	ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN.....	35
8.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	36
8.3.	FASES DE INVESTIGACIÓN	36
8.3.1.	<i>Fase 1</i>	36
8.3.2.	<i>Fase 2</i>	36
8.3.3.	<i>Fase 3</i>	37
9.	RESULTADOS	37
9.1.	FASE 1.....	37
9.1.2	<i>Imágenes del sitio de estudio</i>	37
9.1.3	<i>Suelo:</i>	43
9.1.4.	<i>Características geotécnicas de la ladera en estudio</i>	43
9.2.	FASE 2	51
9.2.1	<i>Trabajos de campo</i>	51
9.2.2.	<i>Resultados vuelo 1 (Marzo 16 De 2023)</i>	62
9.2.3.	<i>Resultados vuelo 2 (Junio 3 De 2023)</i>	64
9.3.	FASE 3.....	65
9.3.1	<i>Análisis inicial de procesos de remoción en masa</i>	66
9.3.2	<i>Análisis de la dinámica del comportamiento del terreno entre el vuelo 1 y vuelo 2</i>	69
9.3.2.1	<i>Superposición de superficies entre vuelo 1 y vuelo 2</i>	70
9.3.2.2	<i>Análisis de la dinámica del comportamiento del terreno a partir de las ortofotos generados obtenidas mediante los vuelos 1 y 2.</i>	74
9.3.3	<i>Ventajas y desventajas del uso de drones en el análisis de procesos de remoción en masa</i>	76
10.	CONCLUSIONES	79
11.	RECOMENDACIONES	80

TABLA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Esquema de volcamiento de bloques</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2 Deslizamientos rotacionales y traslacionales.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3 Ejemplos de flujos: Flujo lento de tierra, flujo de loes , Flujo de arena seca.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4 Flujos canalizados: Flujo canalizado, avalancha de detritos y torrente de bloques. ...</i>	<i>33</i>

TABLA DE IMAGENES

Imagen. 1 Ubicación Geográfica del proyecto.....	34
Imagen. 2 Visual en terreno de la localización del proyecto	35
Imagen. 3 Toma satelital año 2004	38
Imagen. 4 Toma satelital año 2009	39
Imagen. 5 Toma satelital año 2018	40
Imagen. 6 Toma satelital año 2020	41
Imagen. 7 Toma satelital año 2022	42
Imagen. 8 Toma captada con dron año 2022	42
Imagen. 9 Mapa de. Clasificación de zona sísmica de Bogotá	44
Imagen. 10 Clasificación de zonificación geotécnica de Bogotá.....	44
Imagen. 11 Mapa Geológico sector Barrios Nueva España y Los Alpes.	50
Imagen. 12 Georreferenciación del sitio del Proyecto.	51
Imagen. 13 Identificación de puntos de Control.	52
Imagen. 14 Posicionamiento de los vértices de Referencia	53
Imagen. 15 Georreferenciación de los Puntos de Control.....	54
Imagen. 16 Ubicación de los puntos de control sobre Ortofoto.....	57
Imagen. 17 Modelo Digital de Elevaciones	58
Imagen. 18 Clasificación nube de puntos densa	59

Imagen. 19	Nube de Puntos Clasificada con los Datos de terreno.....	60
Imagen. 20	Curvas de nivel modelo clasificado y no clasificado	61
Imagen. 21	Ortofoto mosaico	61
Imagen. 22	Modelo digital de elevaciones (MDE) vuelo 1	62
Imagen. 23	Orto foto mosaico y curvas de nivel vuelo 1	63
Imagen. 24	Modelo Digital de Elevación	64
Imagen. 25	Modelo Digital de Elevación	65
Imagen. 26	Modelo Digital de Elevación	67
Imagen. 27	Modelo Digital de Elevación, estado inicial del terreno	68
Imagen. 28	Perfil del terreno representando los tres modelos digitales de terreno (estado inicial, vuelo 1 y vuelo2)	69
Imagen. 29	Perfil del terreno representando los tres modelos digitales de terreno (estado inicial, vuelo 1 y vuelo2)	69
Imagen. 30	Superposición de superficies entre el vuelo 1 y vuelo2.	71
Imagen. 31	Generación de perfil comparación de superficies entre el vuelo 1 y vuelo2.....	72
Imagen. 32	Ampliación de imagen en zona de perfil identificada con posible desplazamiento	73
Imagen. 33	Ampliación de imagen en zona de perfil identificada con posible desplazamiento	74
Imagen. 34	Elementos en común ortofoto vuelo 1 y vuelo 2 respectivamente.....	75
Imagen. 35	Elementos en común ortofoto vuelo 1 y vuelo 2 respectivamente.....	76

TABLA DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de las zonas Geotécnicas	45
Tabla 2 Descripción de la zona de respuesta sísmica	46
Tabla 3 Coeficientes de Diseño para Espectro S	47
Tabla 4 Tabulación de puntos de Control con sus	55
Tabla 5 Ventajas y desventajas del uso de dron el análisis de procesos de remoción en masa	76

Resumen

El presente documento evidencia el análisis del comportamiento en procesos de remoción en masa presentados en un talud ubicado Barrio Los Alpes de la localidad de San Cristóbal, a partir de modelos digitales generados con tecnología RPAS y comparaciones con otros modelos e imágenes obtenidos en épocas diferentes. Lo anterior motivado por la necesidad de implementar metodologías que permitan obtener una serie de datos cuantitativos y cualitativamente importantes para realizar los análisis que permitan llegar a soluciones viables en los procesos de remoción en masa.

En cuanto a la recolección de información con vuelos no tripulados, inicialmente se instalaron unos puntos de control con coordenadas ajustadas al sistema de referencia Magna Sirgas con el fin de obtener información precisa, que se pudiese contrarrestar con cualquier otra información obtenida de fuentes oficiales; luego se programaron los vuelos con dron cubriendo el área de interés y los puntos de control instalados previamente, luego se procesaron las fotografías obtenidas en los vuelos mediante software especializado logrando la generación del modelo digital de terreno y el ortofoto mosaico.

Finalmente, con la información obtenida en los vuelos y la información secundaria se realiza el análisis a partir de las imágenes y los modelos digitales, donde se evidencia la dinámica y característica del movimiento de remoción en masa y a su vez se propone una solución a la problemática encontrada.

PALABRAS CLAVE

- Vehículos aéreos no tripulados (Dron / RPAS)
- Ortofoto mosaica
- Magna Sirgas
- Remoción en masa

Abstract

This document will show the analysis of the dynamic behavior of the landslide presented in a slope located in Barrio Los Alpes in the town of San Cristobal, from digital models generated with RPAS technology and comparisons with other models and images obtained at different times. This was motivated by the need to implement methodologies that allow obtaining a series of quantitative and qualitatively important data to carry out the analyses that allow arriving at viable solutions in the processes of mass removal.

A compilation of information was carried out by means of unmanned flights and from secondary information obtained from platforms such as Google Earth and IDECA, additionally, information was obtained from projects carried out in the area, which was provided by the San Cristobal Mayor's Office.

Regarding the collection of information with unmanned flights, initially some control points were installed with coordinates adjusted to the Magna Sirgas reference system in order to obtain accurate information, which could be countered with any other information obtained from

official sources; then the drone flights were programmed covering the area of interest and the control points previously installed, then the photographs obtained in the flights were processed using specialized software achieving the generation of the digital terrain model and the mosaic orthophoto.

Finally, with the information obtained in the flights and the secondary information, the analysis is made from the images and the digital models, where the dynamics and characteristics of the landslide movement are evidenced and at the same time a solution to the problems found is proposed.

KEY WORDS

- Unmanned aerial vehicles (Dron / RPAS)
- Mosaic orthophoto
- Magna Sirgas
- Mass removal

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la problemática que genera la remoción en masa en la infraestructura de proyectos de ingeniería civil, se busca con este documento brindar una alternativa técnica que permita obtener una cantidad de datos (nube de puntos densa) con tecnología (RPAS) de tal forma que se permita realizar un análisis multitemporal de los datos y de esta forma caracterizar el comportamiento de eventos de remoción en masa, teniendo como caso de estudio la ladera mencionada en el título del documento, esta implementación tecnológica permitirá reducir los riesgos a la hora de obtener información en sitios inestables, garantizando a su vez la fidelidad en la obtención de un modelo digital que refleje las condiciones reales del terreno en estudio. Así mismo y mediante las imágenes obtenidas se puede caracterizar el área en estudio y las posibles zonas y o estructuras susceptibles de sufrir daños ante eventos de remoción en masa; de esta manera se aporta en el desarrollo de la ingeniería y la mitigación de pérdidas humanas y materiales.

Cuando se habla de análisis dinámico no se está haciendo referencia a los movimientos geomorfológicos y/o geológicos, si no que la propuesta se fundamenta en el análisis del comportamiento de los procesos de remoción en masa del talud en mención, donde se pueda comparar el registro de imágenes de años anteriores con imágenes recientes.

Fase 1. Realizar búsqueda de información del sitio de interés a través mediante la obtención de imágenes, datos de fuentes oficiales y realizar un análisis de la información encontrada.

Fase 2. Llevar a cabo la captura de información primaria, mediante vuelos no tripulados.

Fase 3. Analizar la información obtenida, mediante la comparación de superficies generadas por MDT y las ortofotos mosaicas resultantes de cada vuelo, con el fin de identificar la dinámica de la morfología que compone el sector en estudio.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia, debido a sus condiciones topográficas y geomorfológicas, en cada departamento dependiendo su ubicación geográfica, se evidencia la constante amenaza por eventos de remoción en masa. Actualmente se ha demostrado que con ayuda de la tecnología se han logrado generar avances significativos, que ayudan en determinados campos y aspectos como lo son: la precisión, alternativas técnicas de solución, tiempos, costos y planificación, entre otros. De allí parte el hecho de que la tecnología está dando una revolución en los métodos convencionales y, por tanto, se debe aprovechar el desarrollo tecnológico para implementar nuevas alternativas de desarrollo. Como ejemplo, el uso de drones que se está implementando en los procesos constructivos de la ingeniería civil y que viene revolucionando los procesos de construcción en la infraestructura vial, ayudando en las mejoras y eficiencias de costos, las mejoras en tiempos, seguridad de trabajadores en zonas de alto riesgo y proporcionan más detalle en el campo de la fotogrametría, así como analizar puntos de difícil acceso donde no se puede llegar por tierra. Teniendo en cuenta todas las aplicaciones que nos brinda esta tecnología como el desarrollo de los vuelos no tripulados, surge la idea y/o necesidad de implementarla en los problemas que genera la remoción en masa sobre la infraestructura de proyectos de ingeniería civil. Dado que la remoción en masa es una problemática que afecta a la comunidad en general, con pérdida de vidas, obstaculizando las vías de acceso, daños a edificaciones, destrucciones de tramos de tuberías,

canales de conducción de agua potable y esto conlleva a buscar alternativas de soluciones que ayuden a mitigar y a prevenir los procesos de remoción en masa, de una manera óptima y con mayor información. Por esta razón y por las utilidades que nos brinda la tecnología RPAS (vuelos no tripulados) se formula el cuestionamiento de ¿cómo realizar el análisis del comportamiento ante eventos de remoción en masa, a partir de modelos digitales generados con tecnología RPAS?

2. ANTECEDENTES

2.1. Antecedentes de la Zona de Estudio

Según el Alcalde Juan Carlos Triana, La Localidad de San Cristóbal presenta al menos “38 puntos [con alta probabilidad de procesos] de remoción en masa” (Ramírez, 2022, párr. 2), siendo el sitio de interés de este proyecto uno de ellos, según el documento de caracterización general de escenarios de riesgos, desarrollado por la alcaldía local de San Cristóbal, entre los años 2010 a 2013, esta localidad se vio afectada por varios procesos de remoción en masa, lo cuales tuvieron como detonante la fuerte ola invernal que afectó el territorio nacional en ese periodo.

2.2. Antecedentes del método.

En el año 2017, durante el IX Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables, E. Alonso, J. Corominas y M. Hurlimann, en su artículo titulado *Experiencias Con Drones Para El Estudio De Movimientos De Ladera* resaltan la importancia que ha cobrado la tecnología de los vehículos aéreos no tripulados (Ruiz, R., Corominas, J., & Hurlimann, M., 2017) debido a la densa y calidad de información que se puede obtener para el análisis y desarrollo de ingenierías relacionadas con el estudio de laderas y procesos de remoción en masa.

En el año 2021 la Revista de Ingenierías USBMed de la Universidad de San Buenaventura, publica el artículo titulado “Uso de drones y sensores remotos para el monitoreo de laderas: una revisión” donde concluyen que el uso de drones para tal fin, generan un gran rendimiento, optimizando tiempos, costos y aportando de gran manera en calidad y cantidad de información, en procesos de la ingeniería Civil, especialmente en labores tan sensibles como lo son la determinación del riesgo que produce una ladera.

En marzo de 2021, la revista informe de construcción 73 (561), expone un artículo titulado *Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformaciones de estructuras y terreno* en el cual resalta la importancia de la fotogrametría con drones, al valorar el salto cualitativo y sumamente cuantitativo que brinda esta tecnología, ya que es capaz de capturar una densidad de puntos masiva e importante para la generación de modelos y el análisis del mismo. Allí también se resaltan aspectos fundamentales a la hora de capturar imágenes, los cuales son la disposición, forma y tipología de los puntos de control (GCPs), la distancia y ángulo de incidencia de la toma de imágenes, la resolución y estabilización del sensor, la incidencia solar y la tipología de geoposicionamiento utilizada por el dron (Gómez, R. et al, 2021)

En la madrugada del domingo 21 de abril de 2019, las fuertes lluvias de la temporada invernal, impactaron directamente sobre el centro del departamento del Cauca, siendo el municipio de Rosas, uno de los más afectados. Esta situación provocó un deslizamiento de tierra en el sector de Portachuelo, en donde al menos 500 metros de banca quedaron destruidos.

Sin embargo, la fatalidad aumentó al conocerse que al menos 28 personas murieron, luego que el alud de tierra destruyera más de ocho viviendas, ya que fue difícil evacuar, teniendo en

cuenta que la emergencia se registró en la madrugada, además, esta es considerada como una zona de alto riesgo. (Infobae, 2023, párrafos 10 y 11)

“Los habitantes del municipio de Rosas, principalmente en su zona rural, reportaron anomalías en el terreno como grietas y desniveles en gran parte del territorio, realizando un llamado a las autoridades para la oportuna atención” (Infobae, 2023, párr.2). La comunidad del municipio de Rosas solicitó ayuda y atención por parte de las autoridades locales, pues en inmediaciones de la Institución Educativa Alfonso Córdoba se notaron varias grietas de importante diámetro. El principal llamado estaba enfocado en pedir la evacuación de las familias, pues el riesgo era inminente. “De igual forma, teniendo en cuenta la falla geológica de la zona, las aguas que surcan las principales veredas de Rosas, a través de las quebradas, se estaban filtrando y provocando el debilitamiento del terreno”. (Infobae, 2023, párr. 4)

Las lluvias provocaron un fuerte derrumbe este lunes festivo 9 de enero en jurisdicción del municipio de Rosas, Cauca. El movimiento de masa no solo afectó a más de 150 familias, afortunadamente sin víctimas mortales, sino que además tiene bloqueada la vía Panamericana, una carretera de orden nacional y continental.

El Instituto Nacional de Vías (Invías) dio a conocer que el derrumbe ocurrido entre las veredas La Soledad, Párraga Viejo y Chontaduro provocó una afectación directa en la vía Panamericana. En ese sentido, declaró el cierre total de la carretera a la altura de la caída del alud de tierra. (Semana, 2023, párr. 8).

En las universidades e Instituciones de (Cantabria, Sevilla, Nacional de Colombia, IGAC y Los Andes) durante los últimos años, se ha vuelto habitual escuchar en conversaciones entre maestros y alumnos sobre métodos para generación de modelos digitales en diferentes campos de la ingeniería civil. Ejemplo de ello son los siguientes casos.

1. Cristina López-Sánchez, de la Universidad de Cantabria, quien ha desarrollado un método para generación de modelos digitales de puentes a partir de imágenes tomadas con RPAS.

El método desarrollado por Cristina López-Sánchez, de la Universidad de Cantabria, para la generación de modelos digitales de puentes a partir de imágenes tomadas con RPAS, también utiliza algoritmos de aprendizaje automático para identificar y clasificar las diferentes características del puente en las imágenes.

El método se basa en los siguientes pasos:

- Procesamiento de las imágenes: Las imágenes tomadas con el RPAS se procesan para eliminar el ruido y mejorar la calidad de la imagen.
- Extracción de características: Se extraen las características de las imágenes que son relevantes para la identificación y clasificación de las diferentes características del puente.

- Entrenamiento del modelo: Se entrena un modelo de aprendizaje automático con las características extraídas de las imágenes.
- Generación del modelo digital: El modelo de aprendizaje automático se utiliza para generar el modelo digital del puente.

El modelo de aprendizaje automático utilizado en este método es un clasificador de árboles de decisión. Este tipo de clasificador es adecuado para este tipo de problema porque es capaz de aprender relaciones complejas entre las características de las imágenes y las categorías de las características.

El método ha sido probado con éxito en un conjunto de datos de imágenes de puentes tomadas con RPAS. El método ha demostrado ser capaz de generar modelos digitales de puentes de alta precisión.

Los beneficios de este método incluyen:

- Reduce el tiempo y el costo de la generación de modelos digitales de puentes.
- Mejora la precisión de los modelos digitales de puentes.
- Permite la generación de modelos digitales de puentes en condiciones difíciles, como en zonas de difícil acceso o en presencia de condiciones climáticas adversas.
- Este método tiene el potencial de revolucionar la forma en que se generan los modelos digitales de puentes.

2. Miguel Ángel González Aguilera, de la Universidad de Sevilla, quien ha aplicado la tecnología RPAS para la monitorización de deslizamientos de tierras. Su trabajo se basa en el uso de imágenes y vídeos tomados con RPAS para detectar y analizar los cambios en la superficie del terreno.

3. González Aguilera ha desarrollado un método para la monitorización de deslizamientos de tierras que utiliza los siguientes pasos:

- Captura de imágenes y vídeos con RPAS: Las imágenes y vídeos se capturan con un RPAS equipado con una cámara de alta resolución.
- Procesamiento de las imágenes y vídeos: Las imágenes y vídeos se procesan para eliminar el ruido y mejorar la calidad de la imagen.
- Segmentación de la imagen: Se segmenta la imagen para identificar las diferentes zonas del terreno.
- Análisis de los cambios: Se analizan los cambios en la superficie del terreno entre imágenes consecutivas.

Este método ha sido probado con éxito en un conjunto de datos de imágenes y vídeos tomados con RPAS en zonas de deslizamientos de tierras. El método ha demostrado ser capaz de detectar cambios en la superficie del terreno de hasta 1 centímetro.

Los beneficios de este método incluyen:

- Permite la monitorización de deslizamientos de tierras en zonas de difícil acceso.
- Es más rentable que los métodos tradicionales de monitorización de deslizamientos de tierras.
- Proporciona información más detallada sobre la evolución de los deslizamientos de tierras.

El trabajo de González-Aguilera tiene el potencial de revolucionar la forma en que se monitorizan los deslizamientos de tierras. Su método podría utilizarse para mejorar la seguridad de las personas y las infraestructuras en zonas de riesgo de deslizamientos de tierras.

En un estudio publicado en la revista *Remote Sensing of Environment*, González-Aguilera y sus colaboradores utilizaron su método para monitorizar un deslizamiento de tierras en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. El estudio demostró que el método era capaz de detectar cambios en la superficie del deslizamiento de tierras con una precisión de hasta 95%.

El estudio también encontró que el método era capaz de detectar cambios en la superficie del deslizamiento de tierras antes de que se produjera un movimiento significativo del terreno. Esto podría ser utilizado para emitir alertas tempranas de deslizamientos de tierras, lo que permitiría tomar medidas para proteger a las personas y las infraestructuras.

El trabajo de González-Aguilera es un ejemplo de cómo la tecnología RPAS puede utilizarse para mejorar la seguridad y la sostenibilidad. Su método tiene el potencial de salvar vidas y proteger las infraestructuras en zonas de riesgo de deslizamientos de tierras.

4. Juan Carlos García-Perea, profesor de la Universidad Nacional de Colombia, ha publicado varios artículos sobre el uso de RPAS para la generación de modelos digitales del terreno. En su trabajo, García-Perea ha demostrado que los RPAS pueden ser una herramienta eficaz para la creación de modelos digitales de alta precisión, que pueden ser utilizados para una variedad de propósitos, como la planificación urbana, la gestión de desastres y la agricultura de precisión.
5. Camilo Echeverry, investigador del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, ha desarrollado un método para la generación de modelos digitales del terreno a partir de imágenes de RPAS. Este método, llamado Máquina de Aprendizaje para la Generación de Modelos Digitales del Terreno a partir de Imágenes de RPAS, utiliza algoritmos de aprendizaje automático para identificar y clasificar las diferentes características del terreno en las imágenes.
6. Juan Pablo García, ingeniero de la Universidad de los Andes, ha desarrollado una aplicación móvil para la generación de modelos digitales del terreno a partir de imágenes de RPAS. Esta aplicación, llamada TerrainMapper, permite a los usuarios capturar imágenes de RPAS con su teléfono celular y generar modelos digitales del terreno en minutos.

3. OBJETIVOS

3.1.OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento de procesos de remoción en masa del sitio inestable a partir modelos digitales e imágenes obtenidas con vuelos no tripulados y proponer una alternativa de solución ante la problemática encontrada en la Ladera Ubicada en el Sector de Bosque de los Alpes, Localidad de San Cristóbal Bogotá D.C.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el sitio de estudio de acuerdo con su geología, geomorfología, condiciones de uso de suelo y antecedentes de eventos de remoción en masa.
- Contrastar información preliminar y actual (imágenes, MDT) del talud en estudio y establecer su comportamiento.
- Generar un cuadro comparativo de las ventajas y desventajas del uso de vuelos no tripulados, para la evaluación de taludes y laderas.

4. JUSTIFICACIÓN

La presente propuesta se enfocará en la obtención de información mediante vuelos con Dron, con el fin de analizar el comportamiento de procesos que se observen de la zona que presenta la remoción en masa.

La gestión del riesgo por remoción en masa se establece como pilar fundamental en todas las obras de infraestructura; ya que en Colombia se presentan varias problemáticas debido a la remoción en masa, por consiguiente, es importante implementar una propuesta que permita al ingeniero civil desarrollar sus proyectos de una manera más óptima en lo posible, disminuyendo así la vulnerabilidad de la infraestructura frente a la amenaza por remoción en masa y prevención de los agentes detonantes con el fin de evitar sobre costos en un proyecto y posibles catástrofes , además de alargar los tiempos del proyecto. Se espera que al implementar esta propuesta en los proyectos de Ingeniería civil en especial los del sector de taludes, se disminuyan los escenarios de riesgo en la comunidad y la infraestructura.

En busca de una zona en la que pueda realizar el proyecto de grado y de acuerdo a los temas y zonas sugeridos por algunos docentes del área, se logró identificar que desde el año 2010 se vienen presentando olas invernales.

El motivo de esta investigación es reafirmar alternativas o técnicas que permitan prevenir y mitigar posibles problemas de remoción en masa que se puedan presentar en proyectos de Ingeniería civil con alta probabilidad de deslizamientos y problemas de estabilidad de los suelos, por tal razón se busca realizar un análisis del comportamiento de estos suelos ante procesos de remoción en masa que permita efectuar la comparación entre los hallazgos de años pasados, con

los hallazgos actuales. Y de esta manera realizar el análisis de la ladera antes, durante o después de que se presenten deslizamientos. En los procesos que representan posibles anomalías geológicas, los efectos de la evolución de un proceso geológico y/o geomorfológico a menudo se pueden lograr mediante la comparación de información previa y posterior al evento en el área de estudio. En resumen, la implementación de la temática que se presenta en este proyecto, busca aportar en los siguientes factores:

- Generar mayor Información importante que se encuentre en el entorno y/o procesos geomorfológicos que se puedan relacionar con la zona de estudio.
- Realizar la caracterización de una zona de estudio, a partir de imágenes y geoforma de la ladera o talud.
- Cubrir zonas de difícil acceso para toma de información

5. HIPÓTESIS

La información que nos brindan los vuelos con tecnología RPAS como alternativa a la topografía convencional, garantiza una mayor cobertura de área y la obtención de una cantidad de datos importante que permiten reflejar con gran precisión y fidelidad la morfología de un terreno; con la implementación de esta metodología se espera que con el adecuado procesamiento de los datos obtenidos, los tiempos en los trabajos de campo se reduzcan considerablemente y los resultados brinden mayor información (MDT, Ortofotos, nubes de puntos) para realizar los análisis requeridos.

6. MARCO CONCEPTUAL

6.1. Tecnología Rpas

El término RPAS se traduce como Remotely Piloted Aircraft System que se traduce como Sistema de Aeronaves tripuladas por control remoto. Por tanto, el significado de RPAS incluye tanto a la aeronave, como al enlace de comunicaciones y la estación en tierra desde donde se controla al dron. (Umiles, s.f. párr. 2)

6.2. Modelos digitales de terreno:

Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Terreno (MDT). Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipo.

Se denomina MDT al conjunto de capas (generalmente raster) que representan distintas características de la superficie terrestre derivadas de una capa de elevaciones a la que se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Aunque algunas definiciones incluyen dentro de los MDT prácticamente cualquier variable cuantitativa regionalizada, aquí se prefiere limitar el MDT al conjunto de capas derivadas del MDE. (Capítulo 7, 2006, pág. 1).

6.3. Fotografías aéreas y ortofoto mosaico

La fotografía aérea hace referencia a la proyección de un segmento de terreno desde un centro de proyección elevado presentando una escala decreciente y unos puntos

desplazados. Ahora bien, a partir de unión de un conjunto de fotografías aéreas, se generan los llamados ortofoto mosaicos, a partir de los cuales se pueden realizar medidas planimétricas como áreas, perímetros y longitudes.

La precisión de la información obtenida en la ortofoto mosaico, depende de la calidad en la implementación de los puntos de control y generación de los planes de vuelo.

6.3.1. Fotogrametría

A partir de la fotogrametría se obtienen dimensiones y posiciones de los objetos en el espacio, este proceso se logra interrelacionando dos o más fotografías aéreas junto con el modelo digital de terreno que representa el área de estudio. Esta metodología es aplicable en cualquier ámbito de la sociedad, sin embargo, donde realiza su mayor aporte es en la ortofotografía, arquitectura y la cartografía.

6.3.2. Plan de vuelo

Consiste en la planificación de la ruta a emplear durante el proceso de captura de fotos con el dron, la cual se puede realizar previamente conociendo el área a evaluar o en el sitio, generalmente el plan de vuelo se puede establecer a partir de vectores (kmz) dependiendo del tipo de dron o directamente se establece el área a cubrir y las pasadas necesarias para obtener el mejor registro fotográfico.

6.3.3. Movimiento en masa

“El término movimiento en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de masas de roca, detritos o tierras por efecto de la gravedad” (Cruden 1991 en PMA-GCA 2007, como se citó en Montero, 2017, p. 17).

Los movimientos en masa ocurren como deformaciones del terreno, movimientos de tipo viscoso y otros desplazamientos de masas en cualquier parte de la tierra. Han acarreado en los últimos 60 años, junto con la erosión, enormes costos sociales y económicos en Colombia. (Montero, 2017, p. 17).

Los movimientos de masa suceden cuando grandes cantidades de rocas, tierra o detritos (masa sólida descompuesta) (Suelo, roca, Sólida o combinada) bajan por una pendiente. “Los aludes de barro, también conocidos como flujos de lodo o deslizamientos de barro, son un tipo común de deslizamiento de tierra a gran velocidad que tiende a desplazarse formando canales”. (CDC, s.f., párr.1)

La clasificación de movimientos en masa es numerosa, según sus autores, escuelas, países de origen o el perfil profesional de quienes tratan el tema. La mayoría de los autores adoptan como criterios de clasificación los mecanismos de falla de los movimientos, los tipos de materiales involucrados, la actividad de los movimientos y su velocidad. Otros consideran factores tales como la edad, las formas de relieve (pendiente), su ubicación geográfica, el clima y la afectación de laderas, cauces o taludes construidos por el hombre. (Montero, 2017, pág. 21).

6.3.4. Clasificación de Cruden & Varnes

En este sistema de clasificación, desarrollado en 1996, se acoge en gran parte la clasificación de Varnes (1978), que propone los cinco tipos básicos de movimientos conocidos: caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral y flujo, y se complementa introduciendo una terminología que considera factores tales como actividad (estado, distribución, estilo), tasa de movimiento y contenido de agua; además, propone la combinación de nombres según el orden en que se presentan los movimientos; por ejemplo, caída de rocas-flujo de detritos.

A continuación, se describen los movimientos definidos en este sistema de clasificación y posteriormente se presenta la terminología asociada a las características de los tipos de movimientos. (Varnes, 1978, como se citó en Montero, 2017, p. 48)

6.1.7.1. Caída

Separación de una masa de roca o suelo desde un talud empinado, a lo largo de una superficie sobre la cual se puede presentar o no desplazamiento por cortante. Una vez ocurrido el desprendimiento, el material desciende a través del aire, principalmente en caída libre, rebotando o rodando (Cruden & Varnes 1996, pág. 53, como se citó en Montero, 2017, p. 48)).

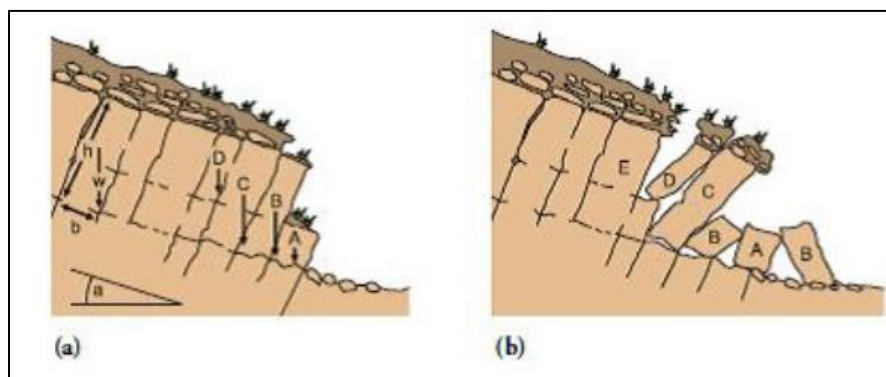
La caída es un tipo de movimiento muy rápido a extremadamente rápido.

6.1.7.2. Volcamiento

“Comprende la rotación hacia delante de una masa de roca o suelo en una ladera,

alrededor de un pivote o eje, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza” (Varnes 1978; Cruden & Varnes 1996, como se citó en Montero, 2017, p. 49) (Figura 1). Se consideran tres tipos:

Figura 1 Esquema de volcamiento de bloques

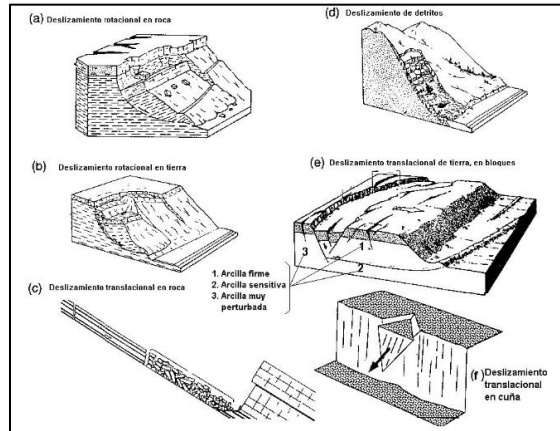


Nota: Detalle de deslizamiento tipo volcamiento en bloques tomado de Freitas & waters 1973, en PMA-GCA 2007

6.1.7.3. Deslizamiento

Cruden & Varnes (op. cit., 56 como se citó en Montero, 2017, p.51) definen este tipo de desplazamiento como un movimiento ladero abajo de una masa de suelo o roca, predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas relativamente delgadas sometidas a intensos esfuerzos de corte.

Figura 2 Deslizamientos rotacionales y traslacionales



Nota: Detalle de deslizamiento tipo rotacional y traslacional tomado de Cruden & Varnes 1996

Existen dos tipos de deslizamientos:

- “Deslizamiento Rotacional: (Hundimientos). Son los desplazamientos de suelos o rocas blandas a lo largo de una depresión del terreno”. (UNGRD, 2024, párr.7)
- “Deslizamiento Traslacional: Consiste en movimientos de capas delgadas de suelo o rocas a lo largo de superficies con poca inclinación”. (UNGRD, 2024, párr.7)

6.1.7.4. Flujos:

Según Cruden & Varnes, (1978) el término flujo se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de corte efímeras y estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada de asemeje a la de un líquido viscoso. (como se citó en Montero, 2017, p.53)

En la figura 3 se muestran ejemplos de flujos:

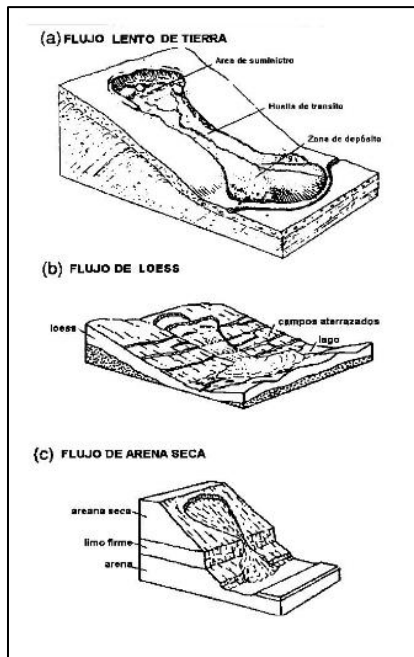
- a. Flujo Lento de Tierras

- b. Flujo De Loess
- c. Flujo Seco De Arena

Y en la Figura 4 se muestran ejemplos de Flujos canalizados:

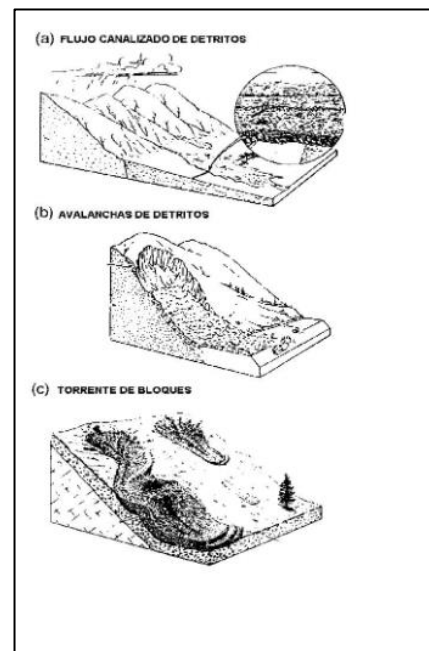
- a. De Detritus
- b. Avalancha De Detritos
- c. Torrente De Bloques

Figura 3 Ejemplos de flujos: Flujo lento de tierra, flujo de loes , Flujo de arena seca.



Nota: Cruden & Varnes 1996.

Figura 4 Flujos canalizados: Flujo canalizado, avalancha de detritos y torrente de bloques.



Nota: Cruden & Varnes 1996.

7. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE PROYECTO

La zona de estudio se encuentra localizada en la localidad de San Cristóbal (04) se localiza en la parte sur oriental de Bogotá colindando al norte con las localidades de Santa Fe, al sur con la localidad de Usme, al occidente con las localidades de Antonio Nariño, Rafael Uribe Uribe y al oriente con el municipio de Ubaque. Tiene una extensión total de 4.910 hectáreas (ha), 1.680 ha están clasificadas como suelo urbano que equivalen al 34,21% y 3.230 ha han sido definidas como suelo rural, cifra que corresponde al 65,79% del total de la superficie de la localidad. (Trujillo, 2013, pág. 6) San Cristóbal presenta una superficie de 1.680 ha en suelo urbano.

La ladera mencionada en el actual documento se encuentra ubicada la ciudad de Bogotá, en el Sector Bosque de los Alpes en la Calle 37B sur con Carrera 11 a Este Localidad de San Cristóbal, como se indica en la siguiente (Imagen. 1.)

Imagen. 1 Ubicación Geográfica del proyecto



Nota: Esta imagen hace referencia a la localización Geográfica del proyecto; El proyecto se encuentra localizado en la Ciudad de Bogotá D.C. en la Localidad de San Cristóbal, Barrio Bosque los Alpes. imágenes Tomadas de Google Earth.

Imagen. 2 Visual en terreno de la localización del proyecto



Nota: Se evidencia visual del lugar y entorno del área del proyecto, Imagen Propia tomada con Dron

8. METODOLOGÍA

8.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene un enfoque cualitativo y cuantitativo debido a que a partir de la información obtenida tanto secundaria (imágenes satelitales) como primaria (modelos digitales y ortofotos mediante vuelos con dron), se podrá caracterizar la morfología del terreno en estudio mediante las imágenes y cuantificar los posibles movimientos a partir de los modelos digitales (área, volumen, diferencias de nivel).

8.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación que se llevó a cabo se basa en el estudio de caso, mediante la búsqueda de información del sitio de interés y la obtención de imágenes y modelos digitales de manera directa utilizando la tecnología RPAS con puntos de control, a partir de todos los datos colectados, se realiza un análisis multitemporal de la morfología del deslizamiento del deslizamiento en estudio y se logra determinar la dinámica del terreno en estudio a través del tiempo.

8.3. FASES DE INVESTIGACIÓN

8.3.1. Fase 1

La parte inicial de los proyectos de ingenierías a nivel conceptual, básica o de detalle, requieren la búsqueda de información secundaria, que permita correlacionar todos los datos encontrados durante dicha búsqueda con los datos obtenidos de manera directa en los trabajos de campo.

Para el desarrollo del presente proyecto, se realiza la búsqueda de imágenes satelitales mediante herramientas digitales (Google Earth, Geoportal IGAC, Mapas Bogotá) e información geomorfológica del sector (IDIGER, Alcaldía), de tal manera que se pueda hacer una caracterización inicial del sitio de trabajo.

8.3.2. Fase 2

Mediante los trabajos de campo, se pretende tener información directa de la zona de estudio, a partir de mínimo 2 vuelos con Dron los cuales deben quedar georreferenciados con puntos de control debidamente instalados y bajo el sistema de coordenadas establecido por el

IGAC, con el fin de tener datos amigables y homogéneos con cualquier otra información con la que se deseen cruzar contrastar.

8.3.3. Fase 3

Se analiza toda la información obtenida, de tal manera que se logra caracterizar el sitio inestable correlacionando toda la información obtenida y así mismo se puede inferir de una manera cualitativa y cuantitativa la dinámica del comportamiento morfológico de la ladera partiendo desde su estado inicial hasta su estado actual.

9. RESULTADOS

9.1. FASE 1

Una vez realizada la consulta en las diferentes entidades y mediante herramientas digitales, se encuentra la siguiente información:

9.1.2 *Imágenes del sitio de estudio*

En la localidad de San Cristóbal se desarrollan diferentes usos del suelo: residencial y comercial, principalmente. En la Reserva Forestal Nacional Protectora Bosque Oriental de Bogotá, declarada mediante Resolución 76 de 1977 por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, “está prohibida la construcción de viviendas o la ampliación de las existentes y el desarrollo de actividades mineras, industriales que impliquen, en forma definitiva, el cambio en el uso del suelo y por lo tanto de su vocación forestal” (Resolución 1141 de 2006 de la CAR) ; no obstante, se evidencia ocupación indebida de predios y el uso del suelo. (CLGR-CC, 2017, pág. 5)

Localidad San Cristóbal Consejo Local de gestión del riesgo y cambio climático
caracterización general de escenarios de riesgo.

Imagen. 3 Toma satelital año 2004



Nota: Imagen tomada de Google Earth en una secuencia de tiempo del año 2004.

Como se evidencia en la anterior imagen, para el año 2004 la zona en estudio presenta una vía en material granular con poca intervención en infraestructura, adicionalmente se evidencia una población asentada en los alrededores, el sitio donde se presenta el movimiento en masa se encuentra con cobertura vegetal y sin índices de intervención.

Continuando con la búsqueda de información, se logra obtener una imagen que data del año 2009 y en la cual se aprecia que en la parte alta de la ladera en estudio se evidencian rastros de lo que fuese un deslizamiento que va hasta la vía que separa este sector y la zona de estudio, así mismo se observa que existe una densa vegetación arbórea en el sector del deslizamiento en

estudio y no se asoma indicadores de movimiento en masa en dicho sector. En cuanto a la infraestructura se denota que no hay cambios significativos desde el año 2004 al año 2009.

Imagen. 4 Toma satelital año 2009



Nota: Imagen tomada de Google Earth en una secuencia de tiempo del año 2009. De acuerdo al análisis de las imágenes tomadas mediante Mapas Bogotá referentes a los años 2004 y 2009.

En el seguimiento cronológico de imágenes no se observan cambios significativos hasta el año 2018, donde en la parte sur del sitio en estudio siendo la parte alta de la ladera, se ha presentado un movimiento masa y esta par de la ladera se encuentra estabilizada con anclajes en un área importante, así mismo se puede observar una deforestación importante del sitio en estudio y la intervención antrópica a través de la construcción de un skate park en el costado este y construcción de edificaciones en el costado norte de la zona de interés del presente proyecto.

Imagen. 5 Toma satelital año 2018



Nota: Imagen tomada de Google Earth en una secuencia de tiempo y data del año 2018, evidenciando la dinámica del comportamiento geomorfológico del sitio.

Hacia el año 2019 y 2020 se empieza a evidenciar la intervención para la construcción de la vía que se encuentra justo en la parte alta del sitio en estudio (ver imagen 6), aún no se aprecia algún tipo de señal respecto al deslizamiento que se encuentra en estudio.

Imagen. 6 Toma satelital año 2020



Nota: Imagen tomada de Google Earth en una secuencia de tiempo del año 2020.

Para el año 2022 se encuentra terminada la construcción de la vía y tiempo después durante ese mismo año se presenta el deslizamiento en el sitio de estudio, generando un desconfinamiento de la parte norte de la vía y deformando parte del andén peatonal que se construyó en este sector (Imagen 7 y 8).

Imagen. 7 Toma satelital año 2022



Nota: Imagen tomada de Google Earth en una secuencia de tiempo del año 2022.

Imagen. 8 Toma captada con dron año 2022



Nota: Imagen tomada con dron luego de presentarse el deslizamiento en el año 2022.

9.1.3 Suelo:

E.S.E. San Cristóbal. (2011)

Las condiciones naturales de los suelos y la erosión ocasionada como consecuencia de actividades de explotación y asentamientos; la presión sobre las fuentes hídricas por procesos de urbanización y asentamientos, la carencia o insuficiencia de redes de alcantarillado han producido una alteración generalizada de los suelos principalmente, que ocasiona riesgos de deslizamientos, incendios e inundaciones. (E.S.E. San Cristóbal, 2011 como se citó en CLGR-CC., 2017, pág. 10)

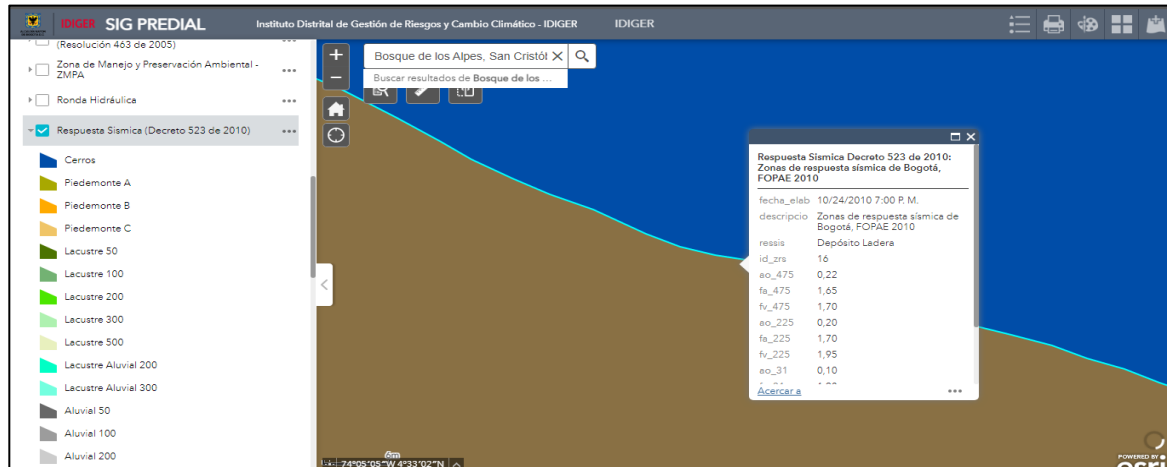
9.1.4. Características geotécnicas de la ladera en estudio

9.1.4.1 Zonificación Sísmica:

Basados en la sismicidad del área del proyecto y de acuerdo con el estudio de amenaza sísmica y a la Norma A-2-1 del NSR-10, el sitio donde se encuentra el proyecto corresponde a la zona de riesgo sísmico intermedia del mapa de amenaza sísmica.

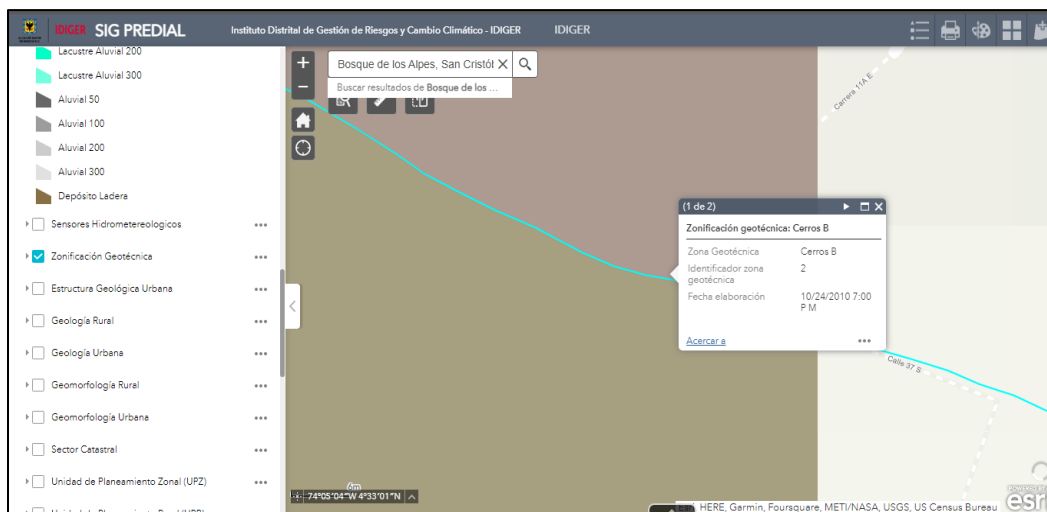
De acuerdo con los resultados obtenidos de los trabajos de investigación del subsuelo y con lo establecido en el (Decreto No. 523 2010), y los Mapas de la (Imagen 9) “DEPOSITOS Y CERROS”, e (Imagen 9) “Zonas de respuesta sísmica”, por el cual “. Se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C.”, se pudo determinar que el perfil del subsuelo corresponde al tipo de suelo “DEPOSITO DE LADERA Y CERROS B”, que, para efectos sísmicos locales, le corresponde los siguientes valores de diseño según la Tabla No. 2 – COEFICIENTES.

Imagen. 9 Mapa de Clasificación de zona sísmica de Bogotá



Nota: Clasificación de Respuesta Sísmica del suelo de acuerdo al Decreto 523 de 2010, tomado de SIG PREDIAL IDIGER

Imagen. 10 Clasificación de zonificación geotécnica de Bogotá



Nota: Clasificación de Zonificación Geotécnica del suelo de acuerdo con el Decreto 523 de 2010, tomado de SIG PREDIAL IDIGER

Tabla 1 Descripción de las zonas Geotécnicas

NOMBRE	DEPOSITOS	CERROS B
GEOTECNIA 1997	SUELO LADERA	ROCA ARENISCA
GEOLOGÍA	DEPOSITOS DE LADERA	FORMACIONES DE ARENISCAS
GEOMORFOLOGÍA	CERROS	CERROS DE ALTA PEDIENTE
COMPOSICIÓN PRINCIPAL	GRAVAS ARENO ARCILLOSAS COMPACTAS	ARENISCAS DURAS
NOMBRE	DEPOSITOS	CERROS B
COMPORTAMIENTO GEOLÓGICO	SUELOS DE MEDIANA CAPACIDAD PORTANTE SUSCEPTIBLES A PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	ROCAS COMPETENTES Y RESISTENTES A LA METEORIZACIÓN, EVENTUALES PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN EXCAVACION A CICLO ABIERTO, PRINCIPALMENTE CUANDO ESTEN FRACTURADAS O

		CON INTERCALACIONES DE ARCILLOLITAS BLANDAS
--	--	---

Nota: Esta tabla muestra la descripción de la zona Geotécnica a la que pertenece el proyecto en mención, de acuerdo al Decreto 523 de 2010.

Tabla 2 Descripción de la zona de respuesta sísmica

ZONA	DEPOSITO DE LADERA	CERRO
ESPESOR DEL DEPÓSITO (m)	6 – 25	--
PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO (s)	< 0,3	< 0,3
DESCRIP. GEOTECNICA GENERAL	DEPOSITOS DE LADERA CON ESPESORES SUPERIORES A 6 m DE COMPOSICIÓN VARIABLE	ROCAS SEDIMENTARIAS Y DEPOSITOS DE LADERA CON ESPESORES INFERIORES A 6 m

ZONA	DEPÓSITO DE LADERA	CERRO
VELOCIDAD ONDA PROMEDIO 50 m Vs (m/s)	VARIABLE SEGÚN DESPÓSITO	➤ 750
HUMEDAD PROMEDIO 50 m Hn (%)	VARIABLE SEGÚN DESPÓSITO	< 10

Nota: Esta tabla muestra la descripción de la zona de Respuesta Sísmica a la que pertenece el proyecto en mención, de acuerdo al Decreto 523 de 2010.

Tabla 3 Coeficientes de Diseño para Espectro S

ZONA	Fa	Fv	Tc	Tl	Ao
DEPOSITO DE LADERA	1,65	1,70	0,66	3,0	0.22
CERROS	1,35	1,30	0,62	3.0	0,18

Nota: Esta tabla muestra los coeficientes de diseño para el proyecto en mención.

Donde:

Fa= Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos.

Fv=Coeficiente de ampliación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios.

Tc=Periodo Corto.

TL=Periodo Largo.

Ao= Aceleración Horizontal Pico efectiva del terreno e Superficie (g).

9.1.4.2. Geología y Geomorfología:

El registro sedimentario presente en la zona de Estudio se encuentra asociado a la evolución tectónica de la cordillera oriental.

A principios del cretácico se depositaron secuencias espesas de sedimentos marinos en una cuenca extensional tipo *sin rift*, en la cual la sedimentación se encontraba controlada por las fallas normales. A finales del cretáceo e inicios del Paleoceno, como consecuencia de la primera fase de deformación y exhumación de la C.O se detuvo la sedimentación marina para dar paso al depósito de unidades continentales en ambientes fluviales de ríos trezados y meandriformes. Durante el Mioceno se produjo la última fase de levantamiento de la cordillera oriental, en este lapso se produjo la sedimentación de unidades en cuencas tipo intracordilleranas (Montoya y Reyes, 2005).

9.1.4.3 Estratigrafía

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas presentes en el área de estudio. Estas descripciones se efectúan con base en la información secundaria (Geología de la Sabana de Bogotá, INGEOMINAS. 2005).

- **Formación Bogotá**

Hubach en 1931 denominó como Formación Bogotá a la secuencia

(...) constituida por tres segmentos, el inferior es arenoso y arcilloso e incluía el horizonte de cacho en la parte basal; el segmento medio constituido por arcillolitas abigarradas entre las cuales se intercalan algunos bancos gruesos de areniscas y areniscas arcillosas y en el conjunto superior, formado por bancos de areniscas de grano grueso, fiabiles que alternan con arcillolitas abigarradas. (CAR, 2019, pág. 10)

Julivert (1963), determina como localidad tipo de la Formación Bogotá la sección ubicada en la Quebrada Zo Grande (flanco occidental del sinclinal de Usme), la cual suprayace a la Formación Cacho e infrayace a la formación regadera.

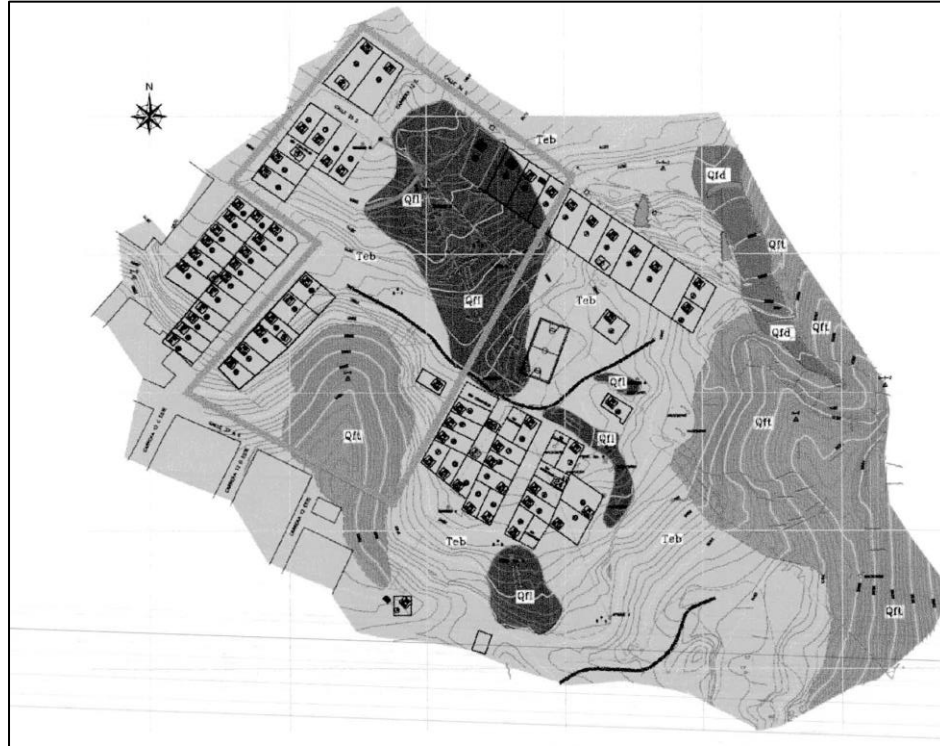
- **Deposito Cuaternario de origen fluvio torrencial Qft**

Esta unidad se encuentra cartografiada en el mapa geológico levantado por el consorcio CIVILES LTDA E HIDROCONSULTA LTDA en 1999.

Según estos autores estos depósitos corresponden a fragmentos subangulares y subredondeados de areniscas cuarzosas de color gris clara de tamaños variables entre guijos y bloques embebidos dentro de una matriz limo-arcillosa de color gris claro a amarillo. El espesor máximo para esta unidad es cercano a los 18 metros.

La unidad es altamente permeable y constituye un acuífero libre, que durante épocas de sequía alimenta a pequeños pozos de la parte alta y media de la zona habitada.

Imagen. 11 Mapa Geológico sector Barrios Nueva España y Los Alpes.



Nota: Mapa geológico de los sectores Barrio nueva España y Los Alpes, pertenecientes a la localidad de San Cristobal, Mapa tomado de Modificado de consorcio Civiles Ltda e Hidroconsulta Ltda.

9.2. FASE 2

9.2.1 Trabajos de campo

9.2.1.1. Instalación De Puntos De Control

Antes de iniciar las actividades de campo, se realiza la planeación de los vuelos, determinando el área que se desea cubrir, esta planeación generalmente se realiza mediante la herramienta Google Earth, la cual permite generar un polígono que puede ser exportado en KML y de esta manera puede ser navegando en campo sirviendo como orientación para el desarrollo de los trabajos y los vuelos a realizar; para la elaboración del proyecto en cuestión, se reconsidera un polígono con un área aproximada de 5300 m² (ver Imagen 12).

Imagen. 12 Georreferenciación del sitio del Proyecto.



Nota: Esta imagen hace referencia a la localización Geográfica del proyecto; El proyecto se encuentra localizado en la Ciudad de Bogotá D.C. en la Localidad de San Cristóbal, Barrio Bosque los Alpes. imágenes Tomadas de Google Earth.

Una vez establecido el plan de vuelo, se procede con la instalación de los puntos de control; para la materialización de estos puntos de control se debe tener en cuenta que estos deben ser visibles desde la altura a la que se desea realizar el vuelo, para el caso de estudio los vuelos se realizaron a una altura de 20 m a 30 m, teniendo en cuenta que el punto de inicio de los vuelos se encontraba en la parte alta de la ladera de estudios. Para este proyecto se usaron como puntos de control los vértices de algunas señales de tránsito horizontales y adicionalmente se instalaron algunos puntos en zonas de concreto que permitían realizar marcas con pintura, los cuales permiten obtener una visual óptima desde la altura a la que se encuentre el Dron.

Imagen. 13 *Identificación de puntos de Control.*



Nota: Identificación y materialización en campo de la tomade Puntos de control, Fuente Propia.

Con los puntos materializados, se procede con la respectiva georreferenciación, la cual consiste en otorgar coordenadas X y Y altura sobre el nivel del mar a partir de vértices con

coordenadas conocidas que se encuentren ligadas al sistema de referencia Magna Sirgas el cual es el que se adopta en Colombia por parte del ente encargado (IGAC).

Para las actividades del presente proyecto se optó por el posicionamiento satelital de un vértice al cual se le otorgarían coordenadas mediante un postproceso utilizando la base de rastreo permanente del IGAC (BOGA) y la altura se obtiene mediante el modelo matemático sugerido también por el IGAC el cual se puede implementar a través de la herramienta Magna Sirgas 5,0.

Imagen. 14 Posicionamiento de los vértices de Referencia



Nota: Posicionamiento de los vértices de referencia para la georreferenciación del Proyecto, Fuente Propia.

Con base en el vértice establecido como base para la georreferenciación de los puntos de control, se implementó la metodología RTK para otorgar coordenadas y

elevaciones a cada uno de estos puntos, este procedimiento se realiza posicionando el ROVER por un determinado tiempo (1min) en cada vértice.

Imagen. 15 Georreferenciación de los Puntos de Control



Nota: Georreferenciación (mediante sistema de RTK).

Para el primer vuelo el día 16 de marzo de 2023 se instalaron los puntos de control, seguidamente se llevó a cabo el primer vuelo con el Dron Mavic Mini SE, este vuelo se realizó a una altura promedio de 28 m y se tomaron 261 imágenes alineadas cubriendo el área de interés del proyecto. El día 4 de junio de 2023 se llevó a cabo la segunda campaña de toma de información con el dron Mavic mini SE, para este vuelo también se estableció una altura promedio de 28 m y se tomaron cerca 250 fotos alineadas a 90°.

9.2.1.2 Procesamiento De Información

El procesamiento de la información consiste en el cálculo de coordenadas de la base y los puntos de control y el procesamiento fotogramétrico de las fotos obtenidas en los vuelos, con el fin de obtener el ortofotomosaico y el MDT a partir del cual se realizarán los análisis respectivos.

9.2.1.2.1 Cálculo De Coordenadas De Los Vértices

Los datos tomados con los equipos de navegación satelital doble frecuencia y datos adicionales necesarios para la corrección de la información (rinex bases de rastreo, efemérides precisas) se ingresan en software adecuado para el postproceso de información satelital (Trimble Business), mediante este software se obtienen las coordenadas del punto base en época actual y se realiza el respectivo traslado a época de referencia 2018,0, dando cumplimiento a la premisa de establecer coordenadas al proyecto que permitan interactuar con cualquier información geodésica realizada en el mismo sector y bajo el mismo datum de referencia. Teniendo en cuenta que los puntos de control cuentan con información obtenida en tiempo real con las coordenadas navegadas el día del posicionamiento, se lleva a cabo el respectivo ajuste de las coordenadas de cada uno de los puntos obteniendo un listado final de coordenadas y cota.

Tabla 4 Tabulación de puntos de Control con sus componentes X,Y, Z

PUNTO	ESTE	NORTE	COTA
PC1	994972,942	999301,143	2876,449
PC2	994984,590	999288,632	2874,948
PC3	995005,500	999259,217	2871,614
PC4	995008,064	999246,273	2871,080
PC5	994999,464	999296,865	2871,953
PC6	995007,893	999297,467	2868,150

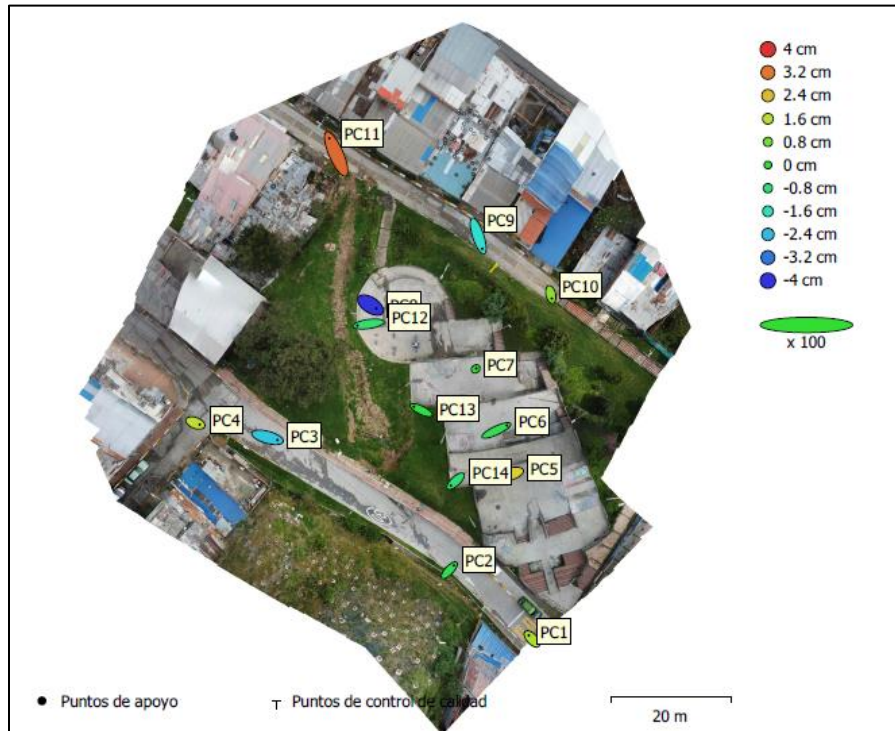
PUNTO	ESTE	NORTE	COTA
PC7	995017,412	999292,388	2865,131
PC8	995027,368	999275,693	2861,068
PC9	995037,385	999293,390	2859,043
PC10	995029,054	999304,971	2861,837
PC11	995055.677	999267.914	2855.087
PC12	995024.55	999272.612	2862.757
PC13	995011.04	999282.023	2867.972
PC14	994997.921	999288.157	2871.967

Nota: Tabulación de puntos de Control obtenidos en campo, identificados con sus componentes X,Y, Z.

9.2.1.2.2 Procesamiento De Los Vuelos

Para el procesamiento de las fotografías obtenidas en los vuelos, se usó el software Agisoft MetaShape en versión Demo, mediante este software se logra realizar la calibración de cada una de las cámaras o fotos obtenidas y la orientación de estas con base en los puntos de control que también se ingresan al software.

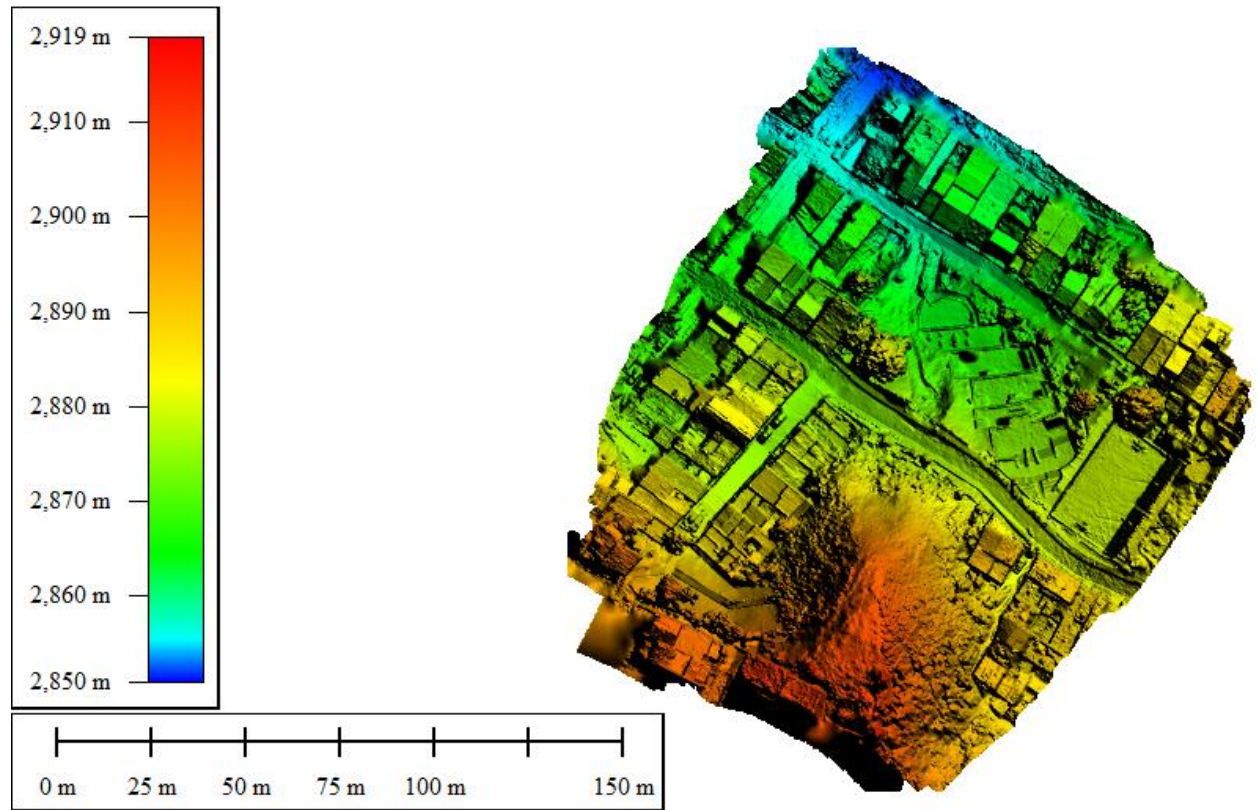
Imagen. 16 Ubicación de los puntos de control sobre Ortofoto



Nota: Nube de puntos densa ajustada con los puntos de control.

Como se observa en la imagen anterior los puntos de control cubren la totalidad del área y permiten un alineamiento pleno de cada una de las cámaras o fotos generadas en el vuelo. Una vez se realiza la calibración y ajuste con los puntos de control, se obtiene el modelo digital de elevaciones el cual se presenta en la siguiente Imagen 17.

Imagen. 17 Modelo Digital de Elevaciones



Nota: Modelo Digital de elevaciones, obtenido a partir de la información procesada con el software (Agisoft Metashape).

Como se observa en la anterior imagen, el modelo digital de elevaciones o superficie, considera las elevaciones de todos los elementos que existen en el área de estudio, por tanto, para obtener un modelo digital que contenga únicamente la información del terreno (obviando construcciones hechas por el hombre, árboles y demás elementos por encima del suelo), se debe realizar una clasificación de la nube de puntos, con el fin de filtrar la información exclusiva del terreno para generar el MDT.

En la siguiente imagen, se aprecia como el software luego de introducir unos parámetros aleatorios, clasifica la información dejando únicamente lo concerniente al terreno.

*Imagen. 18 Clasificación nube de puntos densa
(solo terreno)*

Clasificar nube de puntos

Clases

Desde: Cualquier clase

A: Terreno + Puntos bajos

Conservar puntos de terreno existentes

Parámetros

Ángulo máximo (deg): 45.0

Distancia máxima (m): 0.5

Ángulo máximo de pendiente del terreno (deg): 45.0

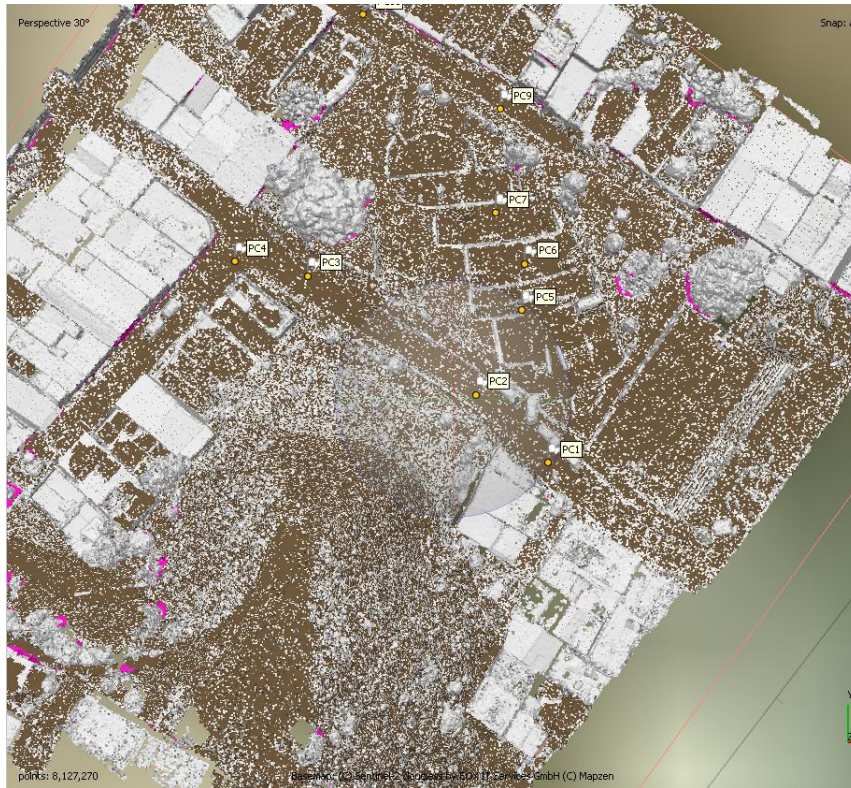
Tamaño de célula (m): 50

Número de retorno: Cualquier retorno

Aceptar Cancelar

Nota: Introducción de parámetros para clasificación de puntos de terreno, estos parámetros obedecen a los resultados que se requieran para la clasificación, y corresponden al criterio de quien realice el procedimiento.

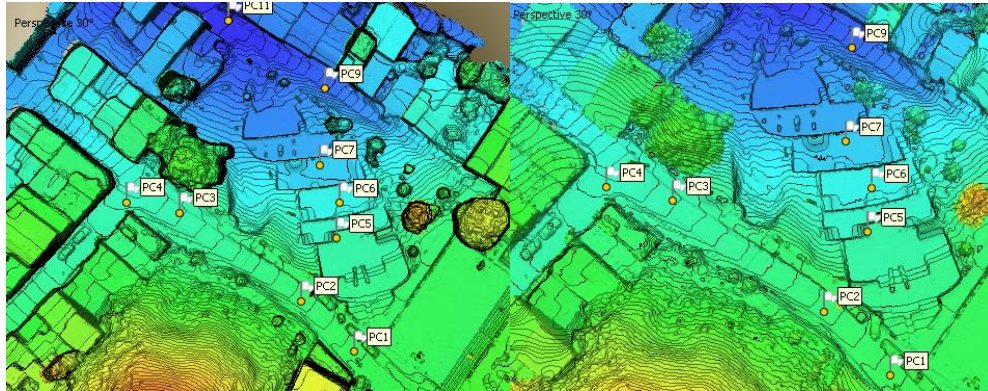
Imagen. 19 Nube de Puntos Clasificada con los Datos de terreno



Nota: Nube de puntos clasificada con los datos de terreno bajo parámetros establecidos aleatoriamente hasta obtener la información requerida con el software (Agisoft Metashape).

Una vez depurada la información de la nube de puntos, se obtiene nuevamente el modelo digital de elevaciones y a su vez las curvas de nivel, en la siguiente imagen se observan en paralelo las curvas de nivel, donde a la izquierda se presentan sin la clasificación y a la derecha se observan los resultados con la clasificación del terreno.

Imagen. 20 Curvas de nivel modelo clasificado y no clasificado



Nota: Al costado izquierdo modelo digital sin clasificación, al costado derecho modelo digital con la clasificación de terreno.

Finalmente se procesa la información generando el ortofoto mosaico (ortofoto), el cual quedará georreferenciado con base en los puntos de control, lo que permitirá que la ortofoto pueda ser utilizada en herramientas como Google Earth y/o AutoCAD Civil 3D para interpretación cartográfica del sitio de interés.

Imagen. 21 Ortofoto mosaico



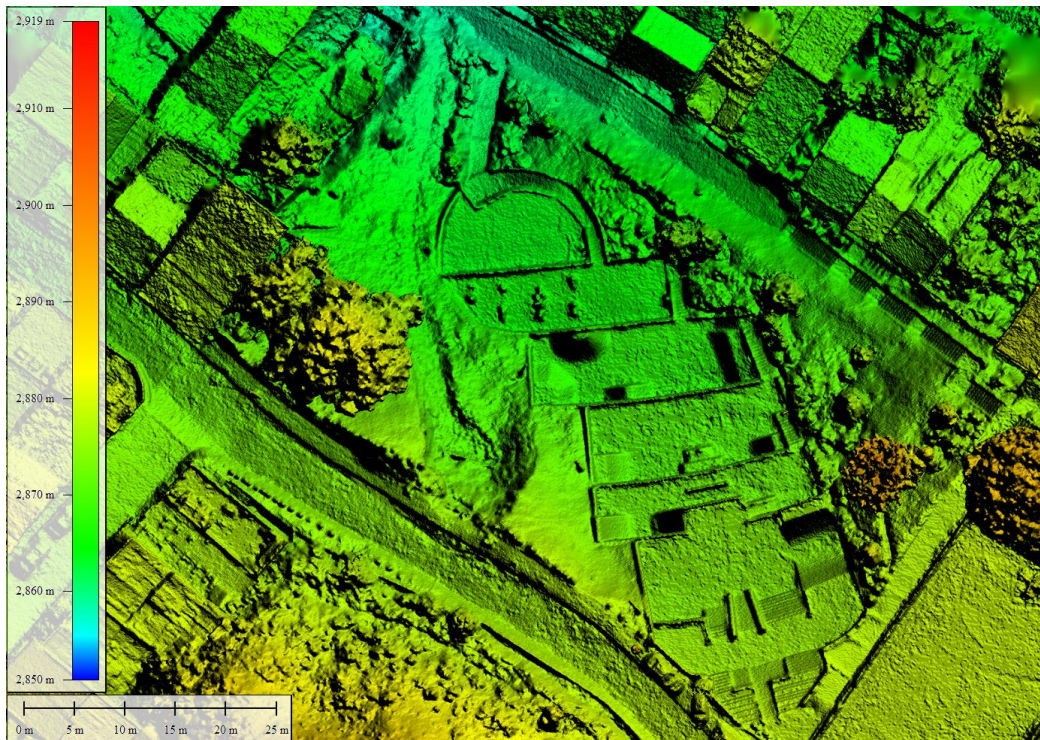
Nota: Ortofoto mosaico generado con el software (Agisoft Metashape)

El proceso de obtención y procesamiento de la información, se llevó a cabo aplicando la misma metodología y parámetros para los dos vuelos realizados, de esta manera se tiene tanto información cartográfica, como información del terreno, para realizar un contraste de datos.

9.2.2. Resultados vuelo 1 (Marzo 16 De 2023)

Dada la metodología implementada y relacionada en el capítulo anterior, para el primer vuelo se obtuvo inicialmente un modelo digital de elevaciones que refleja gráficamente y de una manera clara, el evento el movimiento en masas ocurrido.

Imagen. 22 Modelo digital de elevaciones (MDE) vuelo 1



Nota: MDE generado con el software Agisoft Metashape, a partir del cual se obtiene el modelo digital del terreno con sus curvas de nivel.

A partir del modelo digital de elevaciones se generó el modelo digital de terreno y seguidamente la correspondiente ortofoto, mediante los cuales se pueden caracterizar de manera gráfica el deslizamiento.

Imagen. 23 Orto foto mosaico y curvas de nivel vuelo 1



Nota: Ortofoto mosaico y curvas de nivel cada 50 cm generadas con el software Agisoft Metashape

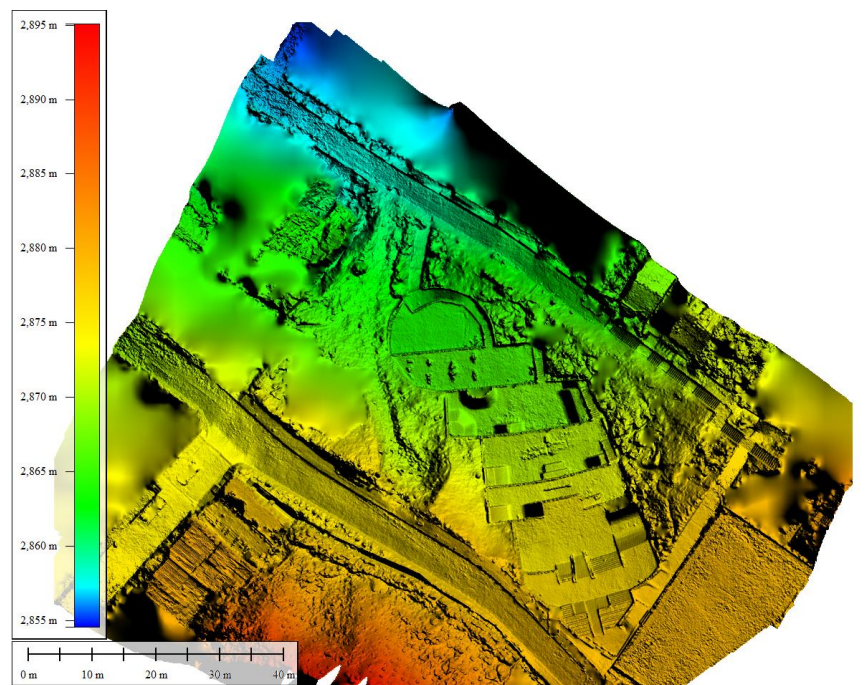
Como se observa en la anterior imagen el modelo digital contiene curvas de nivel cada 50 cm y este permite identificar plenamente el sector donde ha ocurrido el evento de remoción en masa, de tal manera que se puede cuantificar el área aproximada que se encuentra afectada por el evento como se aprecia a continuación.

9.2.3. Resultados vuelo 2 (Junio 3 De 2023).

Con base en los lineamientos y metodologías implementados para el desarrollo los trabajos en campo y el procesamiento de la información para el primer vuelo, se realizó el mismo procedimiento para obtener la información del segundo vuelo en la zona de estudio.

Como resultado se logró la generación del modelo digital de elevaciones, las curvas de nivel y la ortofoto mosaica que se evidencian en las siguientes imágenes.

Imagen. 24 Modelo Digital de Elevación



Nota: MDE generado con el software Agisoft Metashape, a partir del cual se obtiene el modelo digital del terreno con sus curvas de nivel.

Imagen. 25 Modelo Digital de Elevación



Nota: Ortofoto mosaico y curvas de nivel cada 50 cm generadas con el software Agisoft Metashape

Tanto para el primer vuelo como para el segundo se generaron los modelos digitales con curvado cada 50 cm, de tal manera que se permita hacer una apreciación visual del comportamiento del terreno en estudio.

A partir de la información obtenida (modelos digitales) se crearon los archivos con las superficies en el software Autocad Civil 3D, de tal manera que se pudiese interpretar y recrear tanto el estado inicial como el actual del terreno generando los comparativos para realizar los comparativos de las diferentes superficies.

9.3. FASE 3

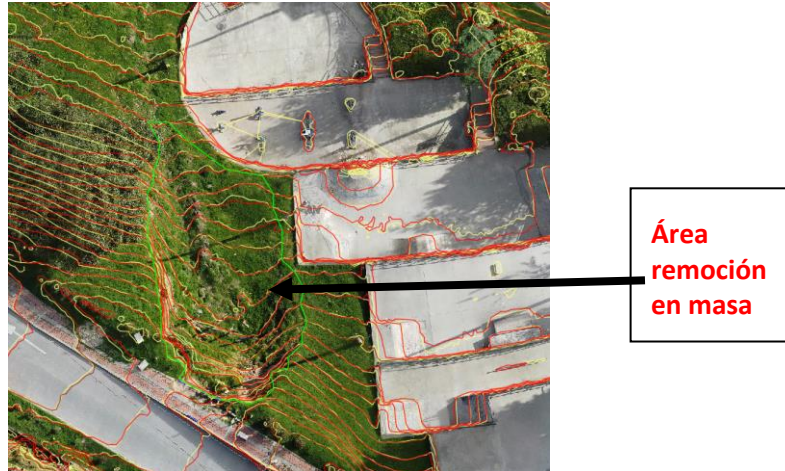
En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en los dos (2) escenarios tomados como referencia; los resultados obtenidos se analizan y se contrastan entre si con el fin de analizar el comportamiento de los procesos de remoción en masa evaluados.

9.3.1 Análisis inicial de procesos de remoción en masa

Mediante los modelos obtenidos y configurados en el software AutoCAD Civil 3D, se recrea una superficie buscando reflejar el estado inicial del terreno que presentó el deslizamiento, la creación de esta nueva superficie del estado inicial del terreno se basa en la interpretación de las curvas de nivel, buscando la continuidad del curvado sin la interrupción de los sobresaltos que genera el vacío del material removido durante el proceso de remoción en masa; el criterio usado para determinar la metodología mencionada anteriormente, se sustenta a partir del análisis de las imágenes obtenidas en la línea de tiempo y los modelos digitales generados con los vuelos con dron, indicando que en un alto grado de probabilidad el terreno se comportaba geoméricamente dando continuidad al curvado como se ha mencionado.

En la siguiente imagen se aprecia el modelo digital de terreno (MDT) del primer vuelo (curvas color rojo) y el MDT del segundo vuelo (curvas color amarillo), y en el área demarcada en color verde se evidencia el sobresalto generado por el proceso de remoción en masa.

Imagen. 26 Modelo Digital de Elevación



Nota: Imagen obtenida con dron y digitalizada en el software Autocad Civil 3D en conjunto con los modelos digitales obtenidos en los 2 vuelos

Con base en lo expuesto anteriormente, se realizó la recreación del estado inicial del terreno (ver imagen 27) obteniendo una superficie uniforme que permita hacer un comparativo del estado inicial versus el estado actual del terreno.

Imagen. 27 Modelo Digital de Elevación, estado inicial del terreno

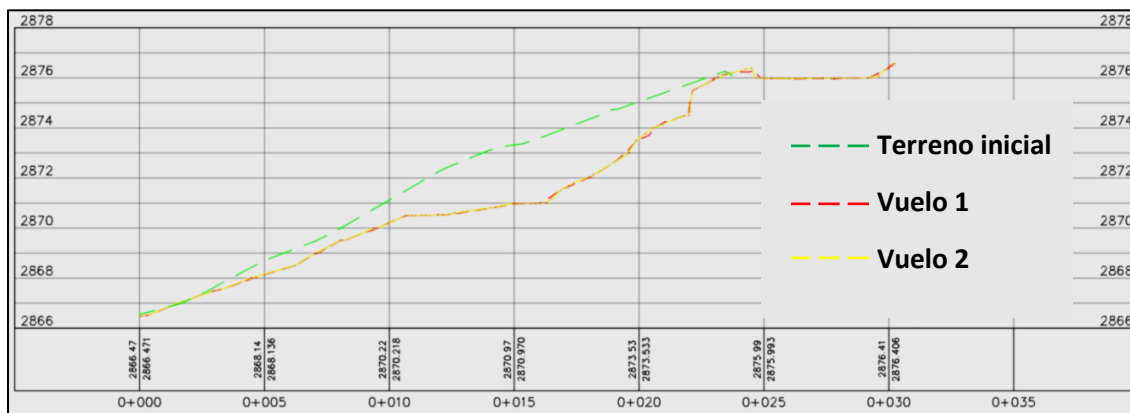


Nota: Imagen obtenida con dron y digitalizada en el software Autocad Civil 3D reflejando el estado inicial del terreno.

Una vez asumidas las condiciones iniciales del terreno, se procedió a realizar una superposición de superficies (estado inicial del terreno, vuelo 1 y vuelo 2), de tal manera que se pudiese evidenciar la dinámica del comportamiento del suelo como resultado del proceso de remoción en masa.

En la siguiente imagen se observa en el perfil recreado las diferencias de nivel respecto a las tres superficies superpuestas, allí se evidencia claramente lo que pudo haber sido el estado inicial del terreno y se representa la masa de material removido como resultado del proceso de remoción en masa.

Imagen. 28 Perfil del terreno representando los tres modelos digitales de terreno (estado inicial, vuelo 1 y vuelo 2)



Nota: Imagen tomada de los modelos digitalizados e el software Autocad Civil 3D.

A partir de la superposición de superficies también se puede obtener un área y volumen de material desplazado durante el proceso de remoción en masa (ver imagen 29) y de esta manera se logra cuantificar la dinámica de dicho desplazamiento en cuanto a forma y tamaño.

Imagen. 29 Perfil del terreno representando los tres modelos digitales de terreno (estado inicial, vuelo 1 y vuelo 2)

Name	B	2d Area(sq.m)	Cut(adjusted)(Cu. ...	Fill(adjusted)(Cu. ...	Net(adjusted)(Cu. ...	Net Graph
<input checked="" type="checkbox"/> volumen inicial		206.25	220.76	2.16	218.60<Cut>	

Nota: Imagen tomada de los modelos digitalizados del software Autocad Civil 3D, como resultado del proceso de comparación entre superficie inicial y vuelo 1.

9.3.2 Análisis de la dinámica del comportamiento del terreno entre el vuelo 1 y vuelo 2

Previamente establecidas las condiciones del terreno y evidenciada la dinámica del comportamiento inicial, cuyo desplazamiento inicial corresponde con un área aproximada de 206.25 m² y un volumen de 220.76 m³; se continua con el análisis de la dinámica que pudiese

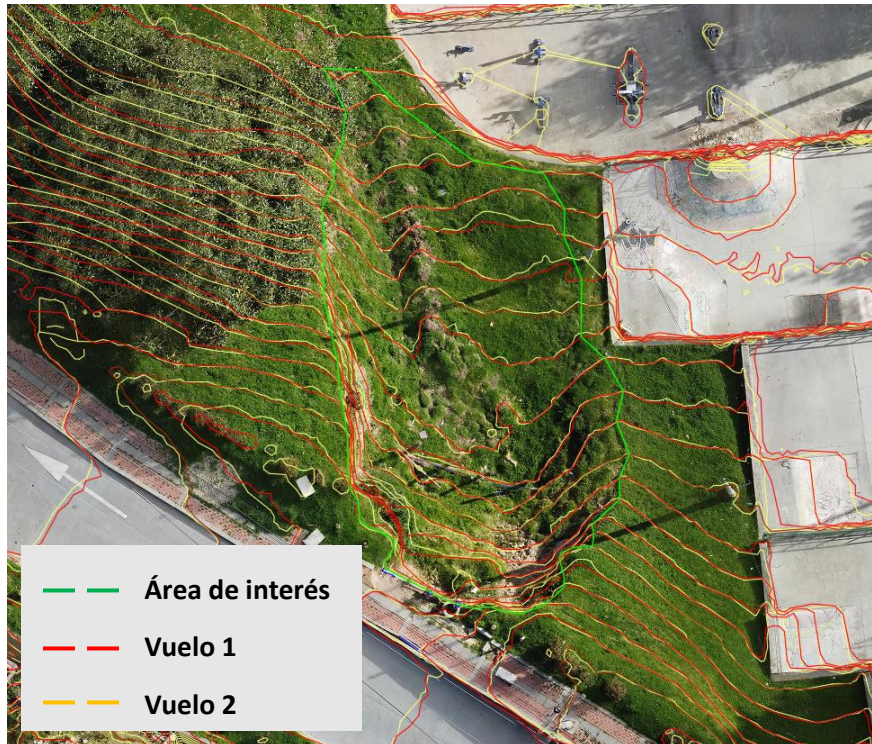
presentarse en el periodo de tiempo comprendido (aproximadamente 2.5 meses) entre el vuelo 1 (marzo 16 de 2023) y el vuelo 2 (junio 3 de 2023). El procedimiento aplicado la continuación del análisis aplica la misma superposición o comparación de superficies generadas por los modelos digitales obtenidos en el vuelo 1 y vuelo 2 y la verificación de la dinámica que se puede observar contrarrestando la posición de los objetos representados en las ortofotos correspondientes a los dos vuelos.

9.3.2.1 Superposición de superficies entre vuelo 1 y vuelo 2

Es de resaltar que para obtener un resultado satisfactorio y con alto grado de precisión, los modelos digitales que se deseen comparar, deben ser la consecuencia de un proceso que aplique los mismos parámetros para la obtención de los datos y su procesamiento, garantizando que los datos sean homogéneos desde su origen con el fin de poder correlacionarlos y encontrar sus desviaciones entre sí, estas desviaciones indican en este caso la dinámica del comportamiento del terreno durante el periodo analizado.

Una vez consolidados los modelos digitales de acuerdo a lo expresado en el párrafo anterior, se generan las dos superficies en el software AutoCAD Civil 3D, permitiendo inicialmente observar el comportamiento de cada modelo a partir de sus curvas y encontrando las similitudes y diferencias que se presentan al superponerlas (ver imagen 30).

Imagen. 30 Superposición de superficies entre el vuelo 1 y vuelo2.



Nota: Imagen tomada de los modelos digitalizados e el software Autocad Civil 3D, como resultado del proceso de comparación entre el vuelo 1 y vuelo 2.

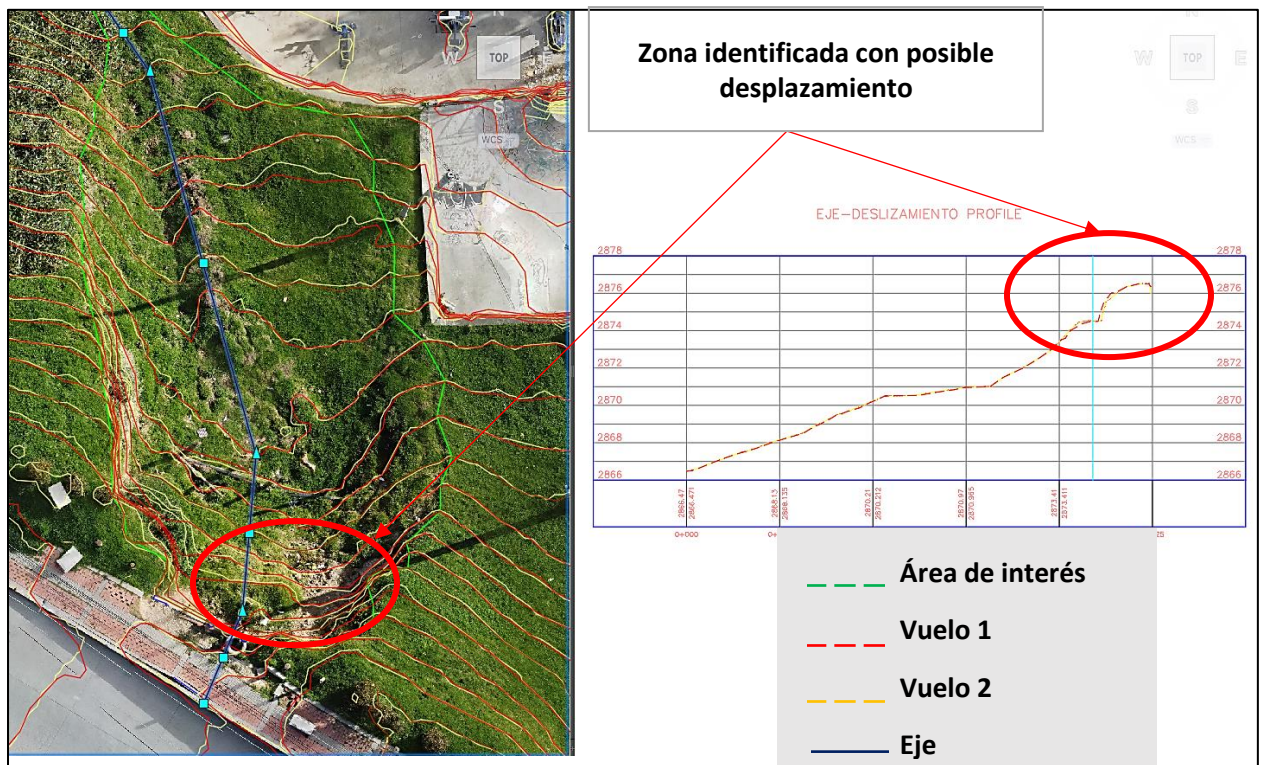
De lo evidenciado en la anterior imagen, se indica lo siguiente:

1. Los datos obtenidos para los MDT de los dos vuelos se encuentran bajo los mismos parámetros y permiten un nivel alto de confianza para compararlos, esto se refleja en la similitud en cuanto a la diagramación de las curvas de nivel (posición y elevación).

- De manera preliminar y a la vista, la representación gráfica que arroja el curvado del terreno no evidencia un comportamiento significativo del terreno durante el periodo de tiempo analizado.

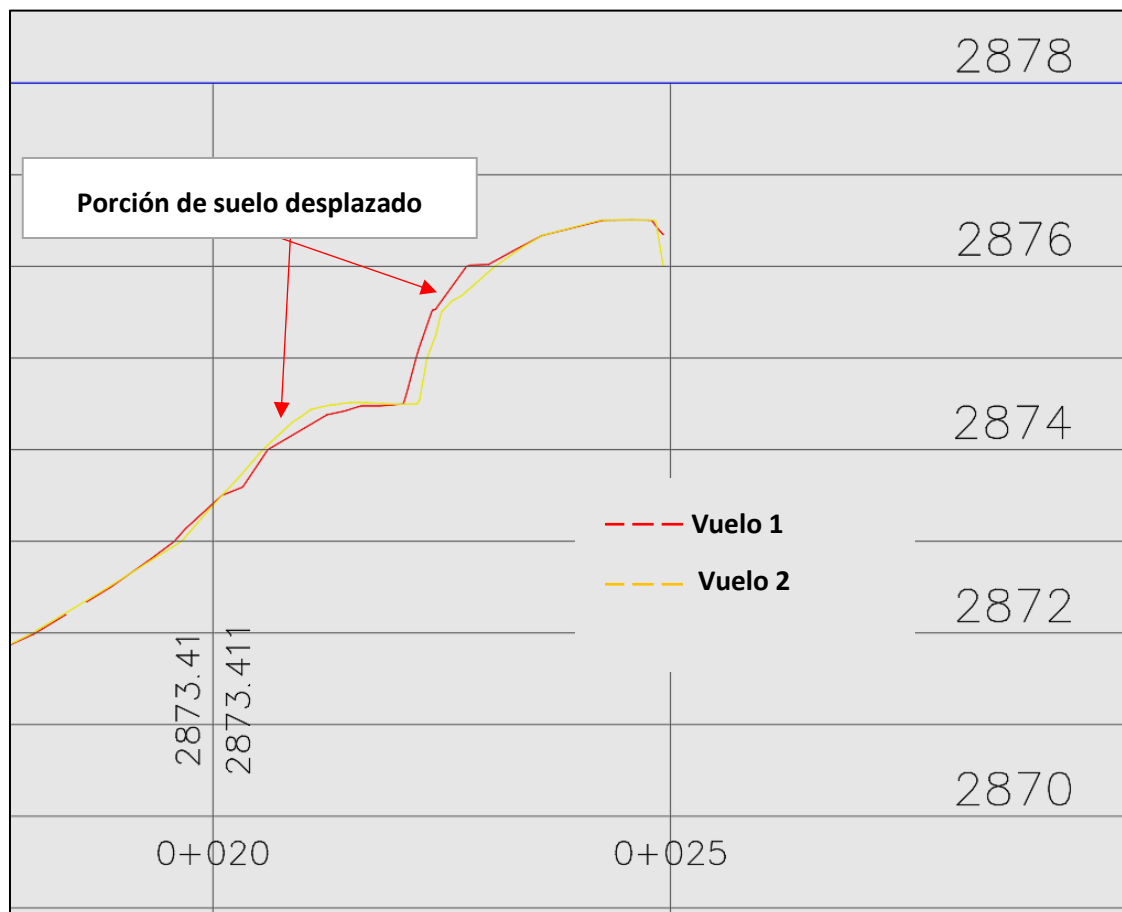
Con base en lo analizado preliminarmente, para profundizar en el análisis, se recrean perfiles sobre un eje determinado del sitio de interés, con el fin de establecer condiciones que permitan tener indicios de algún cambio en el comportamiento del terreno (ver imagen 31).

Imagen. 31 Generación de perfil comparación de superficies entre el vuelo 1 y vuelo2.



Nota: Imagen tomada de los modelos digitalizados en el software Autocad Civil 3D, como resultado del proceso de comparación entre el vuelo 1 y vuelo 2 y generación de perfil.

Imagen. 32 Ampliación de imagen en zona de perfil identificada con posible desplazamiento



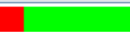
Nota: Imagen tomada de los modelos digitalizados en el software Autocad Civil 3D, como resultado del proceso de comparación entre el vuelo 1 y vuelo 2 y generación de perfil.

Lo que se refleja en las imágenes anteriores es el resultado del análisis de las dos superficies, a partir de la generación de perfiles longitudinales sobre diferentes ejes planteados a lo largo del deslizamiento, generando varios escenarios, de los cuales en uno se logró identificar que en la parte alta del deslizamiento adyacente al andén (ver imagen 32), se pudo presentar un leve movimiento de material que se desplaza en una distancia entre 2 y 3 m con una diferencia de altura aproximada de 1,50 m (ver imagen 33), esto se puede inferir a partir de la posición de los

alineamientos que indican que entre la abscisa 0+020 y la 0+025 sufren un cambio en el valor de sus elevaciones durante el periodo de tiempo analizado.

Adicionalmente como complemento al análisis, se realiza el cálculo de volúmenes de corte y lleno con el fin de corroborar algún tipo de cambio en los estados topográficos del terreno, como resultado de este cálculo se obtiene un valor de 3,04 m³ en corte y 7,28 m³ en lleno, de lo cual se puede establecer que efectivamente se debió presentar un cambio en los procesos de remoción en masa del terreno generando por un desplazamiento de material cuyo valor no es muy representativo y que en términos generales el área en estudio no presenta mayor cambio en el comportamiento del terreno durante de tiempo evaluado.

Imagen. 33 Ampliación de imagen en zona de perfil identificada con posible desplazamiento

Name	B	2d Area(sq.m)	Cut(adjusted)(Cu. ...	Fill(adjusted)(Cu. ...	Net(adjusted)(Cu. ...	Net Graph
..... <input checked="" type="checkbox"/> COMPARATIVO VUEL...		184.76	3.04	7.28	4.24<Fill>	

Nota: Imagen tomada de los modelos digitalizados en el software Autocad Civil 3D, como resultado del proceso de comparación entre el vuelo 1 y vuelo 2 y generación de perfil.

A partir del análisis de las imágenes obtenidas en los dos vuelos es posible dar una explicación respecto al leve cambio de posición de la porción de suelo que se expuso anteriormente.

9.3.2.2 Análisis de la dinámica del comportamiento del terreno a partir de las ortofotos generados obtenidas mediante los vuelos 1 y 2.

El análisis a partir de las imágenes tiene un contexto cualitativo el cual se soporta mediante la observación de los objetos representados en la imagen identificando cambios en sus

características y en forma de tal manera que se logre precisar algún tipo de comportamiento que indique cambios en la dinámica del terreno; respecto a lo cuantitativo es necesario referenciar uno o varios elementos que se encuentren dentro de la imagen analizada específicamente en el área de estudio, con el fin de verificar las posibles desviaciones que puedan tener dichos elementos en sus componentes X,Y y Z dentro de cada imagen (para el caso de estudio ortofoto vuelo 1 y vuelo 2).

En la siguiente imagen se apreciarán elementos resaltados en la ortofoto del vuelo 1, evidenciando que al cambiar la imagen de fondo por la ortofoto del vuelo 2 es imperceptible algún tipo de cambio o movimiento en dichos elementos, lo cual indica que en términos generales el deslizamiento no presenta una dinámica representativa en su topografía, más allá del leve cambio detectado con los perfiles socializados en el capítulo anterior.

Imagen. 34 Elementos en común ortofoto vuelo 1 y vuelo 2 respectivamente



Nota: Imagen tomada de las ortofotos generadas en cada vuelo y digitalizadas en el software Autocad Civil 3D, resaltando elementos en común para observar su comportamiento.

Respecto al leve movimiento indicado a partir de los perfiles en el anterior capítulo, en la imagen 34 se resalta la zona (polígonos color rojo) donde se genera este escenario, encontrando que en este sector hay acumulación de material de suelo resultante del movimiento en masa, que se encuentra expuesto y susceptible de ser removido inicialmente por efectos de la lluvia.

Imagen. 35 Elementos en común ortofoto vuelo 1 y vuelo 2 respectivamente



Nota: Imagen tomada de las ortofotos generadas en cada vuelo y digitalizadas en el software Autocad Civil 3D, resaltando elementos en común para observar su comportamiento.

9.3.3 Ventajas y desventajas del uso de drones en el análisis de procesos de remoción en masa

Tabla 5 Ventajas y desventajas del uso de dron el análisis de procesos de remoción en masa

ÍTEM	VENTAJA	DESVENTAJA
Tiempos	Se reducen considerablemente los tiempos para la toma de información.	Si no se planifican los vuelos de manera idónea, se puede incurrir en gastos de tiempo considerablemente

ÍTEM	VENTAJA	DESVENTAJA
		adicionales a los previamente establecidos.
Precisión	Según el equipo elegido se pueden obtener muy buenas precisiones	La precisión siempre dependerá de los criterios establecidos y de la incorporación o no de los puntos de control necesarios.
Cobertura	Se puede acceder a sitios donde no es posible realizar mediciones directas y se puede obtener información panorámica importante dependiendo del proyecto.	No existe una desventaja, ya que el dron garantiza una cobertura de área importante.
Calidad	Los equipos más profesionales ofrecen niveles de calidad de imagen excelentes y su información en los componentes X, Y y Z son muy buenos.	La calidad en los componentes X,Y y Z, siempre dependerán de la debida y correcta georreferenciación del proyecto y de los puntos de control.
Costos	Se obtiene mayor información con costos menores, si se compara con la información tomada con topografía convencional.	El equipo queda expuesto a sufrir accidentes durante los vuelos, pudiendo causar pérdidas económicas importantes y/o causando daños a terceros.

En el marco del empoderamiento de los medios digitales como parte importante en el campo de la ingeniería, es necesario conocer los diferentes equipos con los cuales se puede trabajar y de qué manera se pueden implementar en los procesos de cada fase de la ingeniería; para el presente proyecto se usó un dron Mavic de la casa DJI modelo 2 Mini SE, cuyas dimensiones y peso hacen de este un equipo versátil para el transporte tanto en tierra como en aire, permitiendo su uso en el sitio que se desee sin implementar mayor logística.

Es de resaltar que este dron que se utilizó es de los menos costosos y a su vez la resolución de su cámara es menor a la de otros equipos con prestaciones más profesionales, por ende, es necesario resaltar que el equipo a elegir para este tipo de proyecto debe corresponder a las necesidades de envergadura, resolución de imagen y precisión requerida.

En cuanto al ejercicio realizado para el presente proyecto, se obtuvo una información idónea para hacer los análisis correspondientes, sin embargo, se observó que la altitud de vuelo no podría sobrepasar los 45 m aproximadamente para obtener una imagen menos pixelada que permitiera referenciar adecuadamente los elementos, por tanto al necesitar una altitud del dron más baja, los tiempos de vuelo incrementan representando gasto de batería, lo cual podría representar inconvenientes para abarcar un área mayor a 10 ha en adelante.

Es necesario considerar que la información tomada con el dron depende de los criterios implementados durante la ejecución de los vuelos, así mismo redundar de una forma eficiente en la captura de imágenes aumentando así el porcentaje de asertividad en la información tomada reduciendo el margen de error en el momento del procesamiento de la información.

A continuación, se tabularán las ventajas y desventajas de la incorporación de vuelos con dron, que se percibieron luego de realizar el ejercicio para el presente proyecto; esta tabla se diseña considerando algunos ítems que se presumen necesarios para calificar el comportamiento de los vehículos aéreos no tripulados.

10. CONCLUSIONES

Se realiza la caracterización de la zona de estudio donde se logró evidenciar el cambio que ha presentado la ladera con el pasar de los años y los deslizamientos, se evidencian trabajos de mitigación en la zona, uno de ellos fue la estabilización de uno de los taludes presentes en la zona.

En la búsqueda de información y antecedentes se evidencia que en la Localidad de San Cristóbal predominan los suelos blandos arcillosos con una geomorfología relativamente suave a excepción de la arenisca, mediante la clasificación del Decreto 523 de 2010, por el cual se adopta la microzonificación sísmica de Bogotá la respuesta sísmica de la zona corresponde a un Depósito de Ladera y Cerros B.

Se logra realizar el análisis de la información, mediante la superposición de imágenes y modelos digitales, donde se evidencian los cambios del terreno y el movimiento de remoción en masa existente permitiendo así identificar el comportamiento de dichos procesos, datos de volumen, área de desplazamiento, cambio de ubicación de objetos en distintas fases de tiempo del terreno en el sector donde se generó el proceso, sin embargo, no se detectó un movimiento importante en el periodo comprendido entre los dos vuelos.

Siempre que se requiera hacer un comparativo de información obtenida mediante vuelos con dron en diferentes temporalidades, es necesario garantizar que la información captada y procesada conserve los mismos parámetros y criterios, de tal manera que todos los datos sean homogéneos en su origen.

Los tiempos de captura de información en campo se reducen considerablemente si se comparan con la topografía convencional y los modelos digitales obtenidos con dron reflejan con mayor fidelidad la topografía del terreno, esto se debe a la generosidad que se tiene en la nube de puntos obtenida.

11. RECOMENDACIONES

- El éxito de un proyecto que implique el uso de dron dependerá de la correcta georreferenciación del mismo y de la implementación de los puntos de control que garanticen la precisión de la información obtenida.
- Para cualquier clase de proyecto que incluya el uso de dron e información topográfica, se deben establecer parámetros claros para la georreferenciación del proyecto.
- Es necesario que los profesionales que requieran información para análisis a partir del uso de dron, tengan claro que tipo de información requieren y socializar ante el proveedor de tal manera que este pueda establecer los parámetros necesarios para brindar la información pertinente a analizar.

- Se sugiere que, a partir de lo exhibido en el presente documento, se deriven otros ejercicios que permitan ahondar más acerca de los beneficios del uso de las aeronaves no tripuladas e identificar sus falencias ante distintos escenarios.
- Se sugiere para próximas investigaciones tratar de realizar más de 4 vuelos con intervalos mayores a 3 meses, para poder realizar un buen análisis en el tiempo, y de esta manera poder tener resultados más acertados en cuanto al cambio de la ladera; así mismo tomar información con topografía convencional y comparar con la los datos obtenidos con dron, de tal manera que se pueda determinar la diferencia en tiempos de labores de campo, los modelos digitales y cantidad de información conseguida.

BIBLIOGRAFIA

CDC. (s.f.). *Deslizamientos de tierra y aludes de barro*.
<https://www.cdc.gov/es/disasters/landslides.html>

CAPÍTULO 7. EL MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT). (2006). En Temario (pp. 127-148). Universidad de Murcia.

CAR. (2019). Anexos Capítulo 4.1. *En Respuesta a requerimiento de información adicional - Auto 001 de 2019*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5c59f8cfe9580.pdf>

CLGR-CC. (2017). Caracterización general de escenarios de riesgo. En *Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático*.
<https://www.idiger.gov.co/documents/220605/221366/IDENTIFICACI%2B%C3%B4N+Y+PRIORIZACI%2B%C3%B4N+DE+ESCENARIOS+DE+RIESGO.pdf/78288b58-4bea-4484-b46e-eaf2cbbb9d7c>

Cruden, D. M. (1991). *A simple definition of a landslide*. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43: 27-29

Cruden, D. M. & Varnes D. J. (1996.) *Landslide Types and Processes*. In *Special Report 247 Landslides Investigation and Mitigation*. Turner, A. K. and Schuster R. L. (eds.) TRB-NRC, National Academy Press: Washington, pp. 36-75.

Decreto No. 523 (2010) *Decreto 523 del 16 de Diciembre de la Alcaldía Mayor de Bogotá*,
<https://www.scg.org.co/wp-content/uploads/DECRETO-523-DE-2010-MICROZONIFICACION-BOGOTA.pdf>

E.S.E. San Cristóbal. (2011) *Diagnóstico de salud ambiental – localidad 4 San Cristóbal*. Bogotá D.C. Noviembre 2011. Pag 5.)

Felicísimo, A. (1994). *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales* 118 pp. <http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf>

Gómez, R., Galán, D., González B., Marchamalo, M., & Martínez R. (2021). Aplicación de la fotogrametría con drones al control de deformación de estructuras y terreno. *Informes de la Construcción*, 73(561): e379. <https://doi.org/10.3989/ic.77867>

Infobae. (11 de enero de 2023). Habitantes de Rosas, Cauca, advierten que podría registrarse otro deslizamiento. *Infobae*. <https://www.infobae.com/america/colombia/2023/01/11/habitantes-de-rosas-cauca-advierten-que-podria-registrarse-otro-deslizamiento/>

Montoya, D. & Reyes, G. (2005). *Geología de la Sabana de Bogotá. Memoria explicativa*. INGEOMINAS, 104 pág. Bogotá.

Montero Olarte, J. (2017). *Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia* <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Clasificacion-MM-Terrenos-Geologicos-Colombia.pdf>

Ruiz, R., Corominas, J., & Hurlimann, M. (2017). Experiencias con drones para el estudio de movimientos de ladera. IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables (pp. 581–

592). Santander: International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/107109>

Ramírez, D. (2022, 11 octubre). Alertan sobre 38 zonas de riesgo de deslizamiento en el sur Bogotá. *Caracol Radio*. <https://caracol.com.co/2022/10/11/alertan-sobre-38-zonas-de-riesgo-de-deslizamiento-en-el-sur-bogota/>

Semana. (10 de enero de 2023). Cierre total en la vía Panamericana por derrumbe en Rosas, Cauca; estas son las rutas alternas. *Semana.com*. <https://www.semana.com/nacion/california/articulo/cierre-total-en-la-via-panamericana-por-derrumbe-en-rosas-cauca-estas-son-las-rutas-alternas/202315/>

Trujillo Corredor, R. H. (2013). *Dinámica de la construcción por usos Localidad San Cristóbal* (Alcaldía de Bogotá, Ed.; 1.^a ed.). <https://www.catastrobogota.gov.co/sites/default/files/archivos/san%20crist%C3%B3bal.pdf>

UMILES. *RPAS, UAS y UAV: ¿Qué son y en qué se diferencian?* (2019, 19 octubre). UMILES. <https://umilesgroup.com/rpas-uas-uav-diferencias/#:~:text=El%20t%C3%A9rmino%20RPAS%20viene%20de,donde%20se%20controla%20al%20dron.>

UNGRD Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. (s. f.). <https://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=140>

Varnes, D. J., 1958 Landslide Types and Processes, in Special Report 29: Landslides and Engineering Practice (E.B. Ecker, ed.) HBR, National Research Council, Washington D. C. pp 20-47.

Varnes, D. J., (1978). Slope Movement Types and Processes. En Special Report 1976: Landslides Analysis and control (R. L. Schuster and R. J. Krizec, eds). TRB-NRC Washington D. C. pp 11-33

Dr. Lamberto Vera Vélez, UIPR, Ponce, P.R.) Vélez, L. V., & R., P. (s/f). *LA INVESTIGACION CUALITATIVA*. Edu.ar. Recuperado el 12 de noviembre de 2023, de https://www.trabajosocial.unlp.edu.ar/uploads/docs/velez_vera__investigacion_cualitativa_pdf.pdf