

# **Análisis de deslizamientos en la vía Balboa – Argelia empleando herramientas SIG para comprender las causas subyacentes que afectan un punto crítico**

**Danny Reinaldo Caicedo Zambrano**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en  
Sistemas de Información Geográfica

Asesora

INGENIERA

ANA MARIA GIRALDO PATIÑO

Territorios Inteligentes y Sostenibles

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2024

## Resumen

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la vía que conecta los municipios de Balboa y Argelia, en el departamento del Cauca, abarcando desde el punto de referencia - PR 0+000 hasta el PR 52+706. Mediante recorridos de campo, fotografías aéreas capturadas con drones, e imágenes satelitales se lograron identificar y clasificar 13 eventos de movimientos en masa siguiendo los criterios establecidos por el Servicio Geológico Colombiano. Entre los distintos eventos detectados, se optó por focalizar el estudio en el punto crítico situado en el PR 16+300. Esta área ha sido particularmente propensa a deslizamientos que han obstruido la única vía de acceso, generando serias dificultades en la movilidad de la población.

Mediante un modelo tridimensional creado con fotografías aéreas se procedió a realizar un análisis exhaustivo de los diversos factores que pueden incidir en los movimientos en masa. Se consideraron aspectos como la cobertura vegetal del área, el tipo de uso del suelo, la inclinación topográfica, la composición del suelo y la presencia de asentamientos cercanos. A partir de esta evaluación, se concluye que estos elementos ejercen una influencia significativa en la ocurrencia recurrente de movimientos en masa en este sector.

Finalmente, considerando que para la estabilización de este punto se requiere obras de contención que demanda recursos económicos altos, y que el municipio no está en capacidad de financiar, se propone alternativas de mitigación del riesgo, que contribuyan a una estabilización del talud a largo plazo a partir de una revisión de literatura que se asemeja a las condiciones ambientales del sector.

**Palabras clave:** Movimientos en masa, talud, modelo 3D, mitigación del riesgo, drone, imágenes satelitales

## Abstract

The present research was carried out along the road connecting the municipalities of Balboa and Argelia, in the Cauca department, spanning from reference point PR 0+000 to PR 52+706. Through field surveys, aerial photographs captured by drones, and satellite images, 13 mass movement events were identified and classified according to criteria established by the Colombian Geological Service. Among the various events detected, focus was placed on studying the critical point located at PR 16+300. This area has been particularly prone to landslides, which have obstructed the sole access road, leading to significant mobility challenges for the local population

Using a three-dimensional model created from aerial photographs, we conducted a comprehensive analysis of the various factors that may influence mass movements. Aspects such as vegetation cover, land use type, topographic slope, soil composition, and the presence of nearby settlements were taken into account. Based on this assessment, it is concluded that these elements exert a significant influence on the recurring occurrence of mass movements in this sector.

Finally, considering that stabilizing this point requires costly containment works that the municipality cannot afford, alternative risk mitigation strategies are proposed. These aim to contribute to long-term slope stabilization through a literature review that parallels the sector's environmental conditions.

**Keywords:** Mass movements, slope, 3D model, risk mitigation, drone, satellite images.

## Contenido

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>4. OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>5. REFERENTE TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
5.1 ANTECEDENTES.....	15
5.2 REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL .....	22
<b>6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>24</b>
6.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE INFLUENCIA .....	24
6.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PUNTO DE INTERÉS .....	25
<b>7. METODOLOGÍA.....</b>	<b>27</b>
7.1 ENFOQUE METODOLÓGICO .....	28
7.2 TIPO DE ESTUDIO .....	28
7.3 HERRAMIENTAS UTILIZADAS .....	28
7.4 PROCEDIMIENTO.....	31
<b>8. RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
<b>9. DISCUSIÓN.....</b>	<b>62</b>
<b>10. CONCLUSIONES.....</b>	<b>63</b>
<b>11. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>12. REFERENCIAS.....</b>	<b>65</b>

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Referente normativo.....	23
<b>Tabla 2</b> Criterios de clasificación de los movimientos en masa establecida por el SGC. ....	34
<b>Tabla 3</b> Inventario movimientos en masa entre los PR 0+000 al 52+706 de la vía Balboa – Argelia departamento del Cauca. ....	45
<b>Tabla 4</b> Clasificación de movimientos en masa en el tramo de estudio según su magnitud .....	51
<b>Tabla 5</b> Especies arbóreas recomendadas para siembra en el sector .....	60

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Ubicación geográfica del área de influencia .....	24
<b>Figura 2</b> Ubicación geográfica del punto de interés .....	26
<b>Figura 3</b> Descarga de imagen satelital desde Planet .....	32
<b>Figura 4</b> Consulta de movimientos en masa sobre la vía Balboa - Argelia .....	33
<b>Figura 5</b> Imágenes cargadas en el software Agisoft Metashape .....	37
<b>Figura 6</b> Orientación de las fotografías aéreas.....	38
<b>Figura 7</b> Creación de la nube de puntos.....	38
<b>Figura 8</b> Creación de malla de puntos .....	39
<b>Figura 9</b> Modelo 3D creado .....	40
<b>Figura 10</b> Modelo de elevación digital DEM (de la superficie) creado.....	40
<b>Figura 11</b> Clasificación de superficies.....	41
<b>Figura 12</b> DEM creado .....	42
<b>Figura 13</b> DEM importado al software ARCGIS PRO.....	42
<b>Figura 14</b> Curvas de nivel sobre el DEM generadas en Arcgis PRO .....	43
<b>Figura 15</b> Población y corredor vial afectado – Registro SIMMA.....	50
<b>Figura 16</b> Puntos críticos identificados en la vía Balboa – Argelia sobre la imagen satelital descargada.....	53
<b>Figura 17</b> Modelo 3D creado, punto crítico PR 16+300 .....	54
<b>Figura 18</b> Suelo arcilloso evidenciado en el punto crítico.....	55
<b>Figura 19</b> Vegetación tipo herbácea presente en el área del punto crítico .....	56
<b>Figura 20</b> Rastros típicos en suelos de uso ganadero.....	57
<b>Figura 21</b> Pendiente del talud y perfil del terreno calculado en Arcgis online.....	58
<b>Figura 22</b> Curvas de nivel PR 16+300.....	58

## 1. Introducción

Los movimientos en masa representan una problemática compleja que puede surgir debido a diversas circunstancias, ya sean de origen natural o humano. En el mundo, se han registrado numerosos deslizamientos, especialmente durante épocas de lluvias intensas, lo que conlleva a considerables pérdidas económicas, materiales y, lamentablemente, pérdidas de vidas humanas.

La vía que conecta los municipios de Balboa y Argelia, en el departamento del Cauca, no es una excepción. Este tramo de vía ha experimentado múltiples eventos de movimientos en masa, los cuales son detallados en el presente documento. Se hace hincapié especial en un punto crítico, donde los deslizamientos son recurrentes, afectan con frecuencia la circulación y representan riesgos considerables para la vida y los bienes de los habitantes locales.

La zona de estudio experimenta con frecuencia movimientos en masa, los cuales son atribuibles a una combinación de variables tanto antrópicas como naturales. Este enfoque busca proporcionar una comprensión más completa de algunos factores que impulsan los deslizamientos en esta zona de riesgo, con el fin de proporcionar herramientas de apoyo que sean útiles para que las entidades municipales puedan gestionar los recursos necesarios y así implementar una solución definitiva para el punto crítico seleccionado.

Considerando lo anterior, el propósito de este trabajo de investigación es analizar, a través del empleo de herramientas SIG los movimientos en masa en la vía que une los municipios de Balboa y Argelia, especialmente el punto crítico del PR 16+300, el cual es un sector afectado por deslizamientos frecuentes y tiene un impacto negativo directo en las comunidades adyacentes.

Para alcanzar este objetivo, el trabajo de investigación se desarrolló en tres fases. En la fase 1, se emplearon fotografías aéreas, drones e imágenes satelitales para identificar los deslizamientos a lo largo de esta vía. En la fase 2, se realizó un análisis exhaustivo utilizando herramientas SIG, que incluyó la elaboración de un modelo 3D, con el propósito de determinar las causas subyacentes que impactan un punto crítico específico del corredor vial. Por último, en la fase 3, se proponen alternativas de mitigación basadas en una revisión de literatura enfocada en terrenos similares al área de estudio, con el fin de reducir el riesgo de futuros deslizamientos.



## **2. Planteamiento del problema de investigación**

Los movimientos en masa son fenómenos que se presentan mayormente en países con características topográficas de terrenos escarpados y montañosos, dejando pérdidas económicas, materiales y de vidas humanas.

Colombia es atravesada por la cordillera de Los Andes, que se extiende desde el sur hasta el norte del país. Esta geografía genera áreas con pendientes pronunciadas, propiciando la existencia de diversos pisos térmicos en áreas geográficamente reducidas. Sin embargo, esta riqueza geográfica también trae desafíos significativos, ya que la combinación de factores tropicales, como las lluvias y la variabilidad climática, afecta la estabilidad de las laderas. (Flórez, 2003). El departamento del Cauca es uno de los más afectados por movimientos en masa en Colombia. Según un informe del Servicio Geológico Colombiano (SGC), esta susceptibilidad se atribuye a una combinación de factores, que incluyen su ubicación geográfica, formación geológica y geomorfológica, variabilidad hidrometeorológica, así como la configuración y el uso de sus suelos (SGC, 2023).

El área de estudio, en la vía que conecta los municipios de Balboa y Argelia entre los PR 0+000 al 52+706, se ve afectada por movimientos en masa constantes. Esta situación representa una amenaza persistente para la movilidad de la población local, así como un riesgo significativo para la vida y la propiedad de los residentes de la zona.

Para abordar esta problemática de manera efectiva, es esencial llevar a cabo un análisis de estos deslizamientos. Para ello, se requiere la aplicación de herramientas SIG que permitan identificar y analizar con precisión los movimientos en masa. Este análisis es crucial para determinar las causas y los factores subyacentes que influyen en la ocurrencia de estos eventos.

### 3. Justificación

La vía que conecta los municipios de Balboa y Argelia en el departamento del Cauca entre los PR 0+000 al 52+706 enfrenta una problemática recurrente: los movimientos en masa. Estos eventos, representan una amenaza constante para los campesinos de la zona, los usuarios de la vía, y la integridad del corredor vial. La gravedad de esta situación requiere una investigación exhaustiva para comprender y abordar eficazmente estos riesgos.

El uso de herramientas avanzadas como los SIG para identificar y analizar los movimientos en masa permitirá una evaluación acertada de la magnitud y factores que inciden para la ocurrencia de estos eventos en la vía entre Balboa y Argelia. Al examinar factores como las características geológicas, vegetación presente en el terreno, composición del suelo, asentamientos cercanos, las condiciones climáticas, el uso del suelo y otros elementos pertinentes, se podrá identificar las causas subyacentes de estos deslizamientos.

Los resultados de esta investigación no solo brindan información vital para comprender las causas subyacentes y factores que inciden en los movimientos en masa, sino que también serán de gran utilidad para las alcaldías municipales, especialmente para las dependencias encargadas de la gestión del riesgo y la planificación urbana. La identificación de los puntos críticos y la evaluación de los factores de riesgo permitirán a estas dependencias gestionar y priorizar la asignación de recursos y diseñar intervenciones efectivas para mitigar los impactos de los deslizamientos y mejorar la seguridad en la vía beneficiando a los pobladores del sector y los usuarios de la vía.

Este estudio tiene una utilidad metodológica significativa, ya que podría ser aplicado en investigaciones futuras en regiones similares del país, caracterizadas por acceso complejo debido

a factores como la topografía del terreno, la variabilidad climática y la situación de orden público. Por consiguiente, es crucial el desarrollo de estudios que empleen estas herramientas y metodologías similares para abordar adecuadamente los desafíos que presentan estas zonas del país.



## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Analizar los deslizamientos en la vía Balboa – Argelia mediante el empleo de herramientas SIG, para comprender las causas subyacentes que afectan un punto crítico específico.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Identificar los puntos críticos de riesgo por deslizamientos en el tramo de la vía Balboa – Argelia, mediante el empleo fotografías aéreas e imágenes satelitales.
- Analizar la topografía de un punto crítico específico, mediante el uso de un modelo 3D creado a partir de fotografías aéreas.
- Establecer soluciones alternas desde el área ambiental y el área técnica para la mitigación de deslizamientos en el punto crítico.

## 5. Referente teórico

En este capítulo, se estudiaron las teorías y enfoques relevantes para comprender el tema de investigación del presente documento. Se analizaron las investigaciones previas y se identificaron las lagunas en el conocimiento existente que justificaron la realización del presente estudio.

Un desplazamiento en masa se puede usar en general, para describir el movimiento descendente de suelo, rocas y materiales orgánicos bajo el efecto de la gravedad, y también la forma del terreno que resulta de ese movimiento, a esto se le pueden sumar factores antrópicos como, la deforestación, intervención en la parte baja del talud con maquinaria o manual, descarga de agua directa sobre un talud y otros factores de tipo natural como pendiente elevada del terreno, composición del suelo propensos a deslizamientos, sismos, lluvias intensas, infiltración de agua sobre el terreno, entre otras. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2008).

Colombia, al ser un país con relieve variado, presenta diferentes tipos de clima en áreas reducidas. En general, en el país en los periodos de lluvias se desatan constantes deslaves, desprendimientos y flujos, o se reactivan deslizamientos, afectando muchas poblaciones, al igual que la infraestructura vial y otros proyectos lineales o extensos. Estas situaciones desfavorables se agudizan con alguna frecuencia debido a las fuertes y prolongadas lluvias que acompañan cada cinco o seis años, en promedio, el fenómeno climático de La Niña. En el periodo 2010-2011 se presentó en el país el evento de La Niña más intenso e inusitado registrado en los últimos 30 años, a causa de fuertes lluvias que azotaron la región Andina y el Caribe.

El Servicio Geológico Colombiano – SGC (2019) como entidad encargada en el país de realizar investigaciones y monitoreo de amenazas geológicas en las que se incluyen los movimientos en masa, en el año 2015 publicó la actualización del Mapa Nacional de Amenaza relativa por Movimientos en Masa a escala 1:100.000, a partir del cual se categorizó aproximadamente el 50% del territorio nacional en amenaza baja, el 22% en amenaza media, el 20% amenaza alta y el 4 % en amenaza muy alta por movimientos en masa.

### **5.1 Antecedentes**

En esta sección, se presenta un resumen preciso de las investigaciones realizadas por diversos autores en relación con el tema abordado en este documento. La revisión documental tuvo como objetivo aprovechar los aspectos significativos y metodología empleada en los estudios para orientar el desarrollo de la presente investigación.

Los movimientos en masa son un fenómeno global que ocurre en diversas condiciones climáticas y tipos de terrenos, provocando considerables pérdidas económicas y numerosas víctimas mortales y heridos anualmente. Estos eventos suelen generar perturbaciones económicas, desplazamiento de población y efectos adversos sobre el medio ambiente. (Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2008)

A lo largo de la historia, se han llevado a cabo numerosos estudios sobre los movimientos en masa provocados por diversos factores. Por esta razón, las investigaciones relacionadas con los movimientos en masa o deslizamientos de tierra son de vital importancia para comprender las causas subyacentes, evaluar los riesgos futuros y desarrollar estrategias de prevención y mitigación. Estos eventos pueden atribuirse a una variedad de factores de origen natural o

humano, y en los últimos años, el cambio climático ha ganado relevancia como una causa de gran peso.

En este sentido, Stoffel et al., (2012) llevó a cabo una investigación en áreas montañosas con el objetivo de determinar cómo el calentamiento global contribuye a una mayor frecuencia y magnitud de precipitaciones intensas. Por lo tanto, las lluvias cada vez más intensas pueden desencadenar, entre otros procesos, inundaciones repentinas y flujos de escombros en zonas montañosas.

En concordancia con lo anterior, se considera que las lluvias pueden ser causantes de estos sucesos, que se presentan con mayor severidad en el área de Latinoamérica. Teniendo en cuenta las precipitaciones anuales, Moreno et al., (2006) realizó una investigación en la que se estudió la relación entre la lluvia y los deslizamientos reportados en el departamento de Antioquia. En este estudio se analizaron los deslizamientos ocurridos entre los años 1929 y 1999, posiblemente causados por lluvia, a los cuales se les hizo el proceso de georreferenciación. Posteriormente, se seleccionaron 41 estaciones de registro diario de lluvia pertenecientes a Antioquia y departamentos cercanos. Para analizar la variabilidad del número de deslizamientos de tierra en diferentes escalas temporales, se exploró la posible influencia de las dos fases El Niño y La Niña sobre la variabilidad interanual. Se realizó el análisis de la lluvia acumulada de 3, 5, 10 y 15 días anteriores a los deslizamientos, registrada en estaciones cercanas al sitio del movimiento en masa. Posterior al análisis de los datos, el investigador observó el número de deslizamientos durante los años con eventos de El Niño y La Niña, así como en los años sin estos eventos (denominados normales). Determinó que durante La Niña se ilustra una mayor cantidad de deslizamientos, mientras que durante El Niño reporta lo contrario. El autor deduce entonces



que el excedente de lluvia presentado por la fase fría La Niña incrementó el número de deslizamientos ocurridos en el departamento de Antioquia.

El uso de fotografías aéreas para la elaboración de mapas tomo interés a principios del siglo XX, la fotografía aérea desde aviones motorizados se hizo técnicamente posible y se desarrollaron las primeras cámaras que consistían en una serie de lentes dispuestas circularmente para ampliar el campo de visión de la cámara, (Luhmann, 2008). A nivel mundial se han desarrollado diferentes casos de estudio en el que se usan fotografías aéreas para el monitoreo de deslizamientos en masa, de tal forma que se pueda mitigar los impactos generados por estos eventos, y ser empleados como una herramienta para la prevención del riesgo de desastres en las poblaciones cercanas.

Las fotografías capturadas mediante satélites también han sido de gran ayuda para el estudio de los deslizamientos en masa. Recientemente, Alayo, (2021) llevó a cabo una publicación con el principal objetivo de estimar los desplazamientos provocados por deslizamientos de tierra, utilizando la correlación de imágenes satelitales SPOT 6 y Sentinel 2 en la ciudad de Huancabamba, Perú. Para el desarrollo de esta investigación, se emplearon imágenes satelitales ópticas pancromáticas de la plataforma SPOT 6, con una resolución espacial de 1.5 m, y de la plataforma Sentinel 2, con una resolución espacial de 10 m. En la primera fase, se adquirieron las imágenes satelitales y se aplicaron opcionalmente correcciones geométricas, radiométricas y/o atmosféricas. En la segunda fase, se procedió directamente a aplicar la correlación de las imágenes satelitales, y en una tercera fase, se obtuvo una imagen compuesta de dos bandas que contenían los desplazamientos horizontales este-oeste y norte-sur. Como resultado, se determinó que los desplazamientos generados se obtuvieron por la combinación de

las bandas que contenían los desplazamientos horizontales E-W y N-S. El análisis correlativo de datos permitió determinar que algunos de los factores que contribuyeron al avance y/o detonación de los deslizamientos fueron la sismicidad y la precipitación acumulada. Las tasas de desplazamientos sísmicos oscilaron entre 3 mm y 19 mm, mientras que para los desplazamientos por precipitación acumulada fueron de 2 mm a 11 mm. Estos resultados evidenciaron que Huancabamba está situado sobre deslizamientos activos.

En consecuencia, diversos investigadores han empleado la fotogrametría a partir de fotografías aéreas en sus estudios. Estas imágenes no solo pueden ser obtenidas mediante satélites o aviones, sino también a través de vehículos aéreos no tripulados, como los drones. Un ejemplo de ello es el estudio realizado por Rivera (2020), quien se enfocó en desarrollar un modelo preventivo utilizando fotogrametría a partir de drones. En su investigación, detalla la metodología utilizada para analizar el posible deslizamiento de tierra y sus repercusiones urbanas en la zona de estudio, incluyendo la afectación cuantitativa de viviendas, expresada en metros cúbicos ( $m^3$ ) de tierra desplazada. Para ello, el autor llevó a cabo visitas de campo en Álvaro Obregón, una alcaldía al poniente de la Ciudad de México, para establecer puntos de control que ayudaron a reducir el margen de error en la latitud y longitud. El vuelo fotogramétrico se realizó con un error aproximado de 5 a 8 metros en la longitud, latitud o altitud. Posteriormente, las fotografías fueron procesadas utilizando el software Agisoft Photoscan. Cabe destacar que en este estudio el dron fue operado a una altura de entre 70 y 80 metros, y para la generación del modelo final se emplearon los programas ArcGIS y QGIS.

El uso de drones en estudios relacionados con deslizamientos está ganando cada vez más importancia. Según Alonso (2021), la utilización de drones para el monitoreo de taludes o

laderas estables o inestables ha marcado un nuevo rumbo en los proyectos de Ingeniería Civil. Esta tecnología permite obtener información en tiempo real, prever o simular riesgos asociados a la construcción de taludes en carreteras o en proyectos hidroeléctricos, y, sobre todo, tomar decisiones con un alto grado de certeza frente a posibles eventos catastróficos. A lo largo de los años, el desarrollo de la fotogrametría y sus aplicaciones, junto con la modernización de las técnicas de geoposicionamiento, ha abierto nuevas oportunidades para el avance en el estudio de metodologías de análisis espacial. Esto facilita la integración de información y la creación de modelos de evaluación más eficientes.

El tema de los deslizamientos en Suramérica también se ha estudiado desde hace décadas, uno de los primeros autores pioneros en desarrollar estudios en temas relacionados con movimientos en masa en Suramérica fue el geólogo canadiense, Sharpe (1938), quien desarrolló la primera clasificación sistemática de los movimientos en masa conocida en América, considerada como una de las más completas y con un alto sentido genético, dado el perfil profesional de su autor.

En consideración al relieve predominantemente montañoso en esta parte del continente americano, los deslizamientos son un fenómeno recurrente. Según un informe de la Oficina de la ONU para Asuntos Humanitarios (2020), América Latina y el Caribe se sitúan como la segunda región más propensa a desastres naturales a nivel mundial. Esta región ha experimentado 66 deslizamientos mortales entre los años 2000 y 2020, resultando en casi 3000 víctimas fatales. En particular, en Colombia, en el año 2017, se registraron 349 muertes y más de 45,000 personas se vieron afectadas por estos eventos.

En otro estudio llevado a cabo en Suramérica, Ayala et al., (2018) investigó la sección (pendiente) del deslizamiento en el centro poblado de "Rangra - Perú", empleando imágenes obtenidas mediante drones. Al comparar dos tipos de GPS, se determinó que la diferencia de precisión entre el GPS Diferencial y el GPS Navegador no fue relevante para los propósitos del estudio. El objetivo principal fue identificar la geomorfología del relieve, los escarpes, la corona y la dirección del movimiento del desplazamiento. Para mejorar la precisión, se establecieron puntos de control utilizando una estación total. Con esta información, se llevó a cabo una evaluación del deslizamiento a una escala ingenieril. El autor recomienda realizar vuelos a una altura de 50 o 60 metros para la fotogrametría con drones, con el fin de obtener insumos de mayor resolución. También se sugiere tener en cuenta las condiciones climáticas del área al planificar los vuelos.

Continuando con el análisis de movimientos en masa elaborando modelos 3D a partir de fotografías aéreas capturadas con dron es importante mencionar el estudio de Gupta, et al., (2018), donde utilizó drones capturados con múltiples conjuntos de imágenes superpuestas para reconstruir el 3D de los deslizamientos de tierra. En este estudio, se mapearon dos deslizamientos de tierra y se reconstruyó en 3D. Para el deslizamiento de tierra, se tomaron más de 150 imágenes superpuestas utilizando el dron DJI Phantom 3 Advanced. La altitud de vuelo se mantuvo entre 15 y 30 m por encima de la unidad de control principal que sostenía el navegador, que estaba parado en el camino. De todas ellas, se utilizaron 72 imágenes para reconstruir el 3D. La imagen reconstruida por el dron coincide muy bien con la fotografía de campo y representa una condición casi real. Las mediciones realizadas por drones coinciden con los datos de la Estación Total. Sin embargo, existe cierta diferencia porcentual manteniendo como referencia las mediciones de la estación Total. La distancia de un muro de contención en el

deslizamiento de tierra obtenida del modelo 3D fue de 14,35 m mientras que en realidad era de 14,3 m. Esta imagen 3D proporciona información detallada que se puede utilizar como entrada para diversos estudios. Además, la nube de puntos puede generar contornos de intervalos inferiores a un metro y un DEM de alta resolución ( $\leq 1$  m) podría generarse y utilizarse fácilmente para diversas aplicaciones.

Colombia no ha sido ajeno a estos fenómenos que se presentan a nivel mundial, el país ha acarreado en los últimos 60 años, junto con la erosión, enormes costos sociales y económicos. Un gran número de sus poblaciones se ha edificado en laderas muy vulnerables, y algunas de ellas como Paz de Río (Boyacá), Gramalote (Norte de Santander), San Cayetano (Cundinamarca) y varias del departamento de Nariño y Cauca se han debido reconstruir o reubicar a causa de daños ocasionados por este tipo de eventos, (Servicio Geológico Colombiano, 2017). Según las cifras del Banco Mundial (2012) señalan que el 86 % de la población colombiana y el 44 % del territorio se ubican en zonas de amenaza sísmica media y alta, el 28 % de las viviendas corren peligro de inundación y el 31% a una amenaza alta y media por movimientos en masa.

En un estudio llevado a cabo por Acevedo, (2022) sobre los deslizamientos de tierra en el municipio de Pamplona, Colombia, representa un enfoque notable en la modelización de este fenómeno. Utilizando herramientas como QGIS para obtener mediciones en terreno y generar modelos digitales de elevación (DEM), se logra una comprensión más profunda de la topografía y morfología del terreno. La simulación de deslizamientos como fluidos sobre una malla derivada del DEM proporciona una representación precisa del comportamiento del terreno durante eventos de deslizamiento. La conclusión de que la simulación describe un flujo superficial con velocidades y espesores específicos es valiosa para comprender las posibles

consecuencias de los deslizamientos en la zona estudiada. Sin embargo, es importante destacar que, como indica el autor, este enfoque puede no ser aplicable a todos los tipos de deslizamientos, algunos de los cuales podrían requerir una descripción más detallada y profunda para obtener resultados más precisos y satisfactorios. En síntesis, el estudio de Acevedo contribuye significativamente al entendimiento de los deslizamientos de tierra en Pamplona, mostrando cómo las herramientas computacionales y los modelos pueden utilizarse para prever y comprender mejor estos eventos naturales.

El departamento del Cauca, es uno de los más afectados de Colombia por deslizamientos debido a las fuertes lluvias que se presentan en el sector y su topografía con pendientes elevadas. El 9 de enero de 2023 se registró en el departamento uno de los mayores deslizamientos de los últimos años que afectó el municipio de Rosas, Cauca, si bien no dejó víctimas fatales, si generó pérdidas materiales y terminó afectando a más de 700 personas de siete veredas, igualmente las pérdidas económicas que se generaron fueron considerables por el cierre de la vía Panamericana dejando incomunicados a los departamentos de Nariño y Cauca, (Servicio Geológico Colombiano, 2023).

## **5.2 Referente normativo y legal**

En esta apartado, se exploraron y se presenta de manera concisa los principales elementos del referente normativo aplicable a la temática de estudio. Se mencionan las leyes relevantes, que tienen impacto en el desarrollo y la ejecución del trabajo de investigación, las cuales se describen a continuación:

**Tabla 1***Referente normativo*

<b>NORMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>LEYES</b>	
<b>Ley 1523 de 2012</b>	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.
<b>Ley 1682 de 2011</b>	Medidas y disposiciones para los proyectos de infraestructura de transporte.
<b>RESOLUCIONES</b>	
<b>1983 del 27 de septiembre de 2023</b>	Por medio de la cual se incorpora la norma “RAC 100 – Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS” a los reglamentos aeronáuticos de Colombia.
<b>Resolución No. 000744 del 4 de marzo de 2009</b>	Por medio del cual se establece el Manual de diseño geométrico para carreteras
<b>Resolución 743 de 2009</b>	Por el cual se establece la Guía metodológica para el diseño de obras de Rehabilitación de pavimentos asfálticos
<b>DECRETOS</b>	
<b>Decreto 1478 de 2022</b>	Por medio del cual se adopta la actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres
<b>Decreto 4147 - 3 de noviembre 2011</b>	Por el cual se crea la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres
<b>Decreto 2157 de 2017</b>	Por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres
<b>OTROS</b>	
<b>RAC 91 – Reglamentos aeronáuticos de Colombia</b>	Emitida por la aeronáutica civil, por medio de la cual se establecen las reglas para volar un drone en Colombia.

Fuente: Elaboración propia

## 6. Descripción del área de estudio

### 6.1 Ubicación geográfica del área de influencia

El Departamento del Cauca, es uno de los treinta y dos departamentos que componen el territorio la República de Colombia, se localiza en el suroeste del país y sus territorios hacen parte de las regiones Andina y Pacífica. Cuenta con una superficie 29.308 Km<sup>2</sup>, lo que representa el 2.56 % del territorio nacional. Su capital es la ciudad de Popayán y está dividido política y administrativamente en 42 municipios. La economía de este departamento está basada principalmente en la producción agrícola, especialmente de fique, caña de azúcar, caña panelera, café, papa, maíz, yuca, frijol y tomate (Gobernación del Cauca, 2018). De acuerdo con los datos del último Censo Nacional de Población realizado en el 2018 por el DANE (2018) el Cauca cuenta con una población de: 1'464.488 que representa el 3,03% de la población nacional.

#### Figura 1

*Ubicación geográfica del área de influencia*



Fuente: Elaboración propia



## **6.2 Ubicación geográfica del punto de interés**

La zona de estudio, ubicada en la vía Balboa – Argelia en el departamento del Cauca, presenta varios puntos críticos donde históricamente se han registrado movimientos en masa. Estos fenómenos son atribuidos a las fuertes lluvias recurrentes en la región y al relieve montañoso característico del área. En la actualidad, la vía está siendo ampliada y mejorada con la instalación de pavimento flexible. Sin embargo, en el punto de referencia (PR) 16+300 se identifica un tramo de 150 metros de longitud con un alto grado de complejidad para su intervención, debido a los constantes deslizamientos y la inestabilidad del terreno. Actualmente, solo hay un carril habilitado para el paso de vehículos, lo que genera dificultades para la circulación, especialmente durante períodos prolongados de lluvia. Estos deslizamientos en ocasiones dejan aislados a los municipios, lo que provoca múltiples inconvenientes para la población.

De acuerdo con el censo poblacional del 2018, estos municipios presentan una población de 21.108 y 26.144 respectivamente. (DANE, 2018). Estos beneficiarios de la vía que transitan continuamente por este corredor, se ven afectados por los frecuentes movimientos en masa que se presentan sobre esta importante ruta.

### **Municipio de Balboa**

El municipio de Balboa es uno de los 42 municipios que tiene el departamento del Cauca, tiene una superficie de 402.83 km<sup>2</sup> se encuentra dividido en 9 corregimientos y 73 veredas. El panorama económico en Balboa no es el mejor, las principales actividades económicas se basan en la agricultura en tareas como limpieza de terrenos, siembra y cosecha de productos como café, maíz, plátano, caña panelera y lulo. Una alternativa de empleo que deja buenas perspectivas son

los cultivos ilícitos, los cuales mejoran las condiciones económicas de esta población, pero degrada las condiciones ambientales y sociales. (EOT Balboa, 2010).

### **Municipio de Argelia**

Argelia, un municipio situado en el suroeste del departamento del Cauca, abarca un área de 674 km<sup>2</sup>, donde el 99.77% corresponde a zona rural y apenas el 0.23% a zona urbana. Su núcleo urbano se encuentra a una distancia de 175 km de Popayán, la capital departamental. La actividad agropecuaria constituye uno de los pilares fundamentales de la economía local, impulsada por la ubicación geográfica del municipio, la presencia de diversos pisos bioclimáticos y las condiciones agroecológicas favorables. Entre los cultivos más destacados se encuentran el maíz, el café y el aguacate. Sin embargo, el cultivo de hoja de coca sigue siendo la principal actividad económica, con aproximadamente el 95% de la población dependiendo directamente de esta actividad. (Plan de Desarrollo Territorial de Argelia, 2020).

### **Figura 2**

*Ubicación geográfica del punto de interés*



Fuente: Elaboración propia

## 7. Metodología

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo realizar un análisis de los movimientos en masa en la vía Balboa – Argelia, abarcando los kilómetros PR 0+000 al PR 52+706. Esto se llevará a cabo mediante el uso de herramientas SIG para identificar y comprender las causas subyacentes que afectan un punto crítico específico. El estudio se divide en tres fases:

En la primera fase, se identifican los puntos críticos utilizando fotografías aéreas tomadas con drones e imágenes satelitales. A partir de los datos recopilados, se realiza una clasificación siguiendo los criterios establecidos en "Clasificación de los movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia", publicado por el Servicio Geológico Colombiano en 2017.

La segunda fase implica la creación de un modelo 3D utilizando las fotografías aéreas capturadas con drones. Con este modelo, se lleva a cabo una evaluación detallada de factores que pueden influir en los movimientos en masa, como la vegetación, los usos del suelo, el tipo de suelo, los asentamientos cercanos y la topografía del área.

En la tercera fase, se presentan alternativas desde el punto de vista ambiental y técnico para mitigar los movimientos que afectan este corredor vial. Se proponen acciones relacionadas con la revegetalización del terreno y se sugieren especies vegetales más adecuadas según estudios realizados en la zona.

## **7.1 Enfoque metodológico**

La investigación del presente documento se enfoca en una investigación de tipo cuantitativa y aplicada teniendo en cuenta que existen datos o registros sobre el tipo de suelo, geología, entre otros factores que pueden influir en un movimiento en masa y se pueden encontrar en los EOT y planes de desarrollo de los municipios de Balboa y Argelia.

Adicionalmente los documentos consultados se enfocan en la aplicación práctica de los hallazgos de la investigación para abordar un problema específico: la mitigación de deslizamientos en un punto crítico específico. Se brindan recomendaciones y soluciones concretas basadas en los resultados del estudio, lo que sugiere un enfoque orientado a resolver problemas prácticos.

## **7.2 Tipo de estudio**

Dentro de la investigación cuantitativa, el tipo de estudio en este caso se define como exploratorio, dado que existen pocos registros de estudio en este sector, o trabajos relacionados.

## **7.3 Herramientas utilizadas**

### **Drone**

Los drones son aeronaves no tripuladas pero pilotadas bajo un control remoto que, gracias a su versatilidad, ya cumplen importantes cantidades de funciones como son cámaras especiales (térmicas, visión nocturna o calidad Full HD), gran autonomía de vuelo en el ámbito y localización de GPS cada uno esencial para el ámbito profesional; en el ámbito de la ingeniería civil con el uso de los drones se pueden realizar levantamientos topográficos 3D, control de excavaciones, seguimiento del avance de la obra y vigilancia ambiental, obtención de datos para realización de cartografía entre otras, en conclusión son una herramienta extremadamente útil para la geología, la agricultura, la construcción, y el

control y análisis de tráfico en las grandes ciudades, entre muchas otras tareas, ya que los drones son muy económicos de operar, prácticamente no requieren de insumos o combustibles para su operación y no ponen en peligro las vidas de quienes lo pilotan. (Bonilla et al., 2021).

Para la captura de fotografías se utilizó el dron AIR2S de la línea DJI, el cual utiliza un sensor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) de 1 pulgada y una cámara de 20 mega píxeles, píxeles de 2,4 micras, y en video alcanza una resolución de 5.4K, su dimensión es de 183 mm × 253 mm × 77 mm y un peso de 595 gramos. (DJI, 2021).

A partir de las fotografías capturadas con drones se pueden elaborar distintos estudios, de esta forma, el desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados la mejora y reducción de peso de diferentes sensores (especialmente las cámaras tipo RGB) junto con la adecuada estabilización de los mismos, con sistemas inerciales de 3 ejes, ha hecho que la fotogrametría clásica haya sido sustituida en gran medida por la técnica SFM (Structure From Motion) permite obtener un conjunto de coordenadas XYZ, o nube de puntos 3D, del macizo rocoso con información adicional de los canales RGB. La combinación de imágenes y vídeos junto con la obtención de modelos georreferenciados y escalados en los que se puedan realizar mediciones, constituye una característica importante de esta técnica. Esto, junto con la competitividad económica que ofrece, lo convierte en una tecnología con grandes posibilidades. (Gómez, et al., 2021).

### **Imágenes satelitales**

Otro método avanzado para obtener información visual del terreno son las imágenes satelitales, capturadas como su nombre lo indica por satélites que se han enviado por diferentes

países a nivel mundial. El primer satélite artificial de la historia lanzado al espacio fue el 4 de octubre de 1957 por la Unión Soviética, el Sputnik 1. Tenía una masa aproximada de 83 kg, contaba con dos transmisores de radio (20,007 y 40,002 MHz) y orbitó la Tierra a una distancia de entre 938 km en su apogeo y 214 km. La teledetección ha significado un gran avance para el monitoreo de la superficie terrestre. (García, 2011).

Después del primer satélite enviado al espacio se han perfeccionado con el paso del tiempo y se han dedicado para tareas específicas como registro de imágenes satelitales. Desde 1972 con el lanzamiento del primer satélite Landsat se han obtenido de manera continua imágenes satelitales de todo el mundo, lo que ha permitido analizar la dinámica terrestre a largo plazo. (De Jong, et al., 2005).

Una imagen satelital es una fotografía tomada por un satélite artificial, que muestra la geografía de un territorio específico, ya sea una ciudad, un país o un cuerpo celeste, o también algún espectro determinado de ondas electromagnéticas, lo que se usa en la meteorología para determinar los fenómenos de tiempo significativos. (García, 2011).

Las imágenes de Planet Scope recoge imágenes diarias de resolución de 3.7 metros, 8 bandas Multiespectrales (Coastal blue, blue, Green I, Green, Yellow, Red, Red edge, NIR). Las fuentes de datos de todo el espectro electromagnético, incluidos los sensores ópticos, de radar, microondas pasivos y lidar, revelan diferentes aspectos sobre las propiedades físicas de la Tierra. Las imágenes vienen con corrección radiométrica y de sensores aplicadas a los datos. (PlanetScope, 2023).

## **Arcgis Pro**

Por otro lado, las técnicas de visualización con SIG a partir de datos fotogramétricos han supuesto un gran avance en la interpretación y el estudio del patrimonio, posibilitando la prospección de grandes superficies hasta el análisis de pequeñas piezas. El uso de estos SIG ha crecido de forma exponencial en los últimos años convirtiéndose en la herramienta de visualización más importante para el análisis y gestión del patrimonio cultural. (Campanaro, et al.,2016).

Uno de los softwares usados para el desarrollo del presente trabajo es ArcGIS Pro, el cual es una aplicación de escritorio que proporciona herramientas avanzadas para la creación, edición y análisis de datos geográficos. ArcGIS Pro permite crear mapas y vistas interactivas de alta calidad, así como realizar análisis espaciales complejos, compartir información geográfica en línea y trabajar en proyectos colaborativos. (Pucha, 2023).

## **Agisoft Metashape**

Es un producto de software autónomo que realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D para su uso en aplicaciones SIG, documentación del patrimonio cultural y producción de efectos visuales, así como para mediciones indirectas de objetos de diversas escalas. (Agisoft LLC, 2023).

## **7.4 Procedimiento**

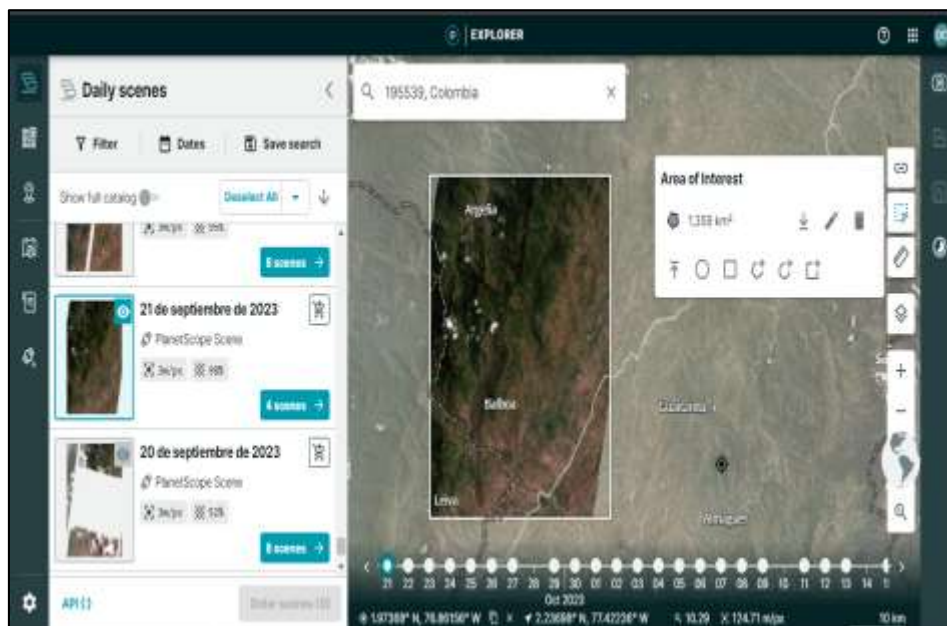
### **Fase 1**

**Identificar los puntos críticos de riesgo por deslizamientos en el tramo de la vía Balboa – Argelia, mediante el empleo fotografías aéreas e imágenes satelitales.**

Inicialmente se crea un shapefile en el software ArcGIS PRO para identificar tanto la vía de intervención como el área de estudio. Luego, se procede a buscar imágenes satelitales del área delimitada. En este trabajo de investigación, se utilizó la plataforma de Planet, la cual ofrece imágenes satelitales de alta frecuencia con una resolución de 3 m/px. Para acceder a estas imágenes, es necesario solicitar previamente una licencia. Una vez completado este paso, se selecciona y descarga la imagen satelital más adecuada para el análisis.

### Figura 3

*Descarga de imagen satelital desde Planet.*



**Fuente:** Elaboración propia

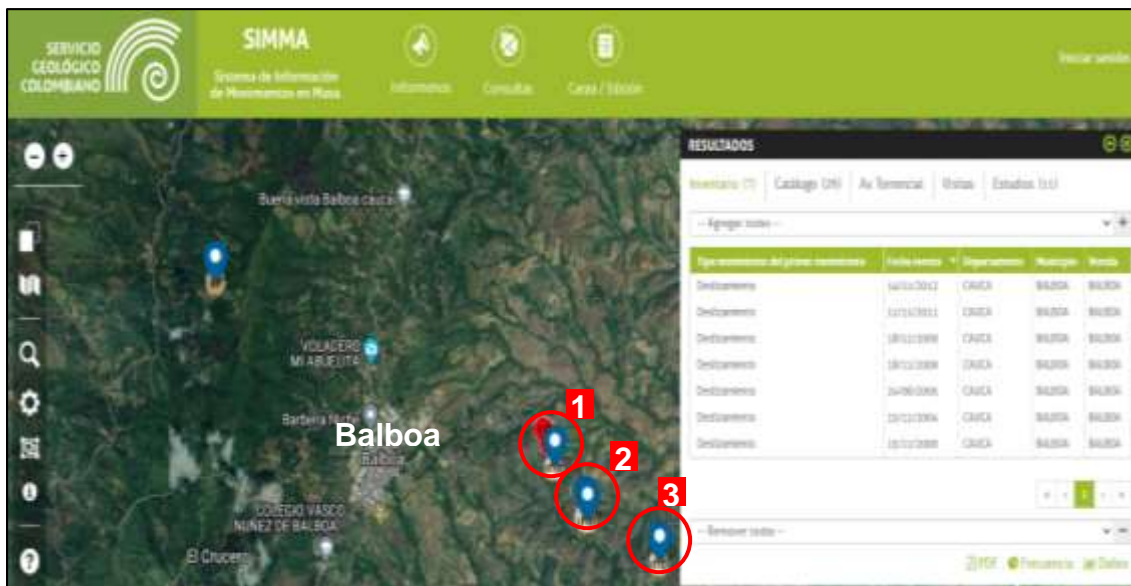
A continuación, se realizó una consulta adicional utilizando el shapefile de la vía. Esta consulta se llevó a cabo en el Sistema Nacional de Movimientos en Masa (SIMMA), un sitio web proporcionado por el Servicio Geológico Colombiano, donde se registran los movimientos en masa ocurridos a nivel nacional. Se enfocó en el tramo de estudio que abarca desde el PR 0+000 hasta el PR 52+706, que conecta los municipios de Balboa y Argelia.



Durante esta búsqueda, se encontraron registros de deslizamientos activos en el municipio de Balboa en los PR 16+300, 17+600, y un tercer registro en el PR 7+000 con fecha de reporte del 29/10/2014. Sin embargo, durante la etapa de campo, se observó que ya existe una obra de contención en el área del tercer registro, y según información proporcionada por la comunidad local, la situación se ha mantenido estable. Para el municipio de Argelia, no se encontraron registros en esta plataforma. A continuación, se presentan los resultados generados:

**Figura 4**

*Consulta de movimientos en masa sobre la vía Balboa - Argelia*



Fuente: Servicio geológico colombiano

A partir de la información obtenida en el SIMMA se realiza un recorrido en campo con el fin de verificar los registros existentes y elaborar un inventario de movimientos en masa ocurridos en el tramo delimitado, este listado contiene información específica como PR, fecha de ocurrencia (según registro SIMMA o información de la comunidad), vereda, coordenadas, altura, tipo de suelo y registro fotográfico actual.

Con los datos recolectados a partir de los recorridos en campo, imágenes satelitales, y fotografías aéreas, se procede a realizar una clasificación de los puntos críticos, tomando como referencia la *Tabla 2 Criterios de clasificación de los movimientos en masa* tomada de la literatura *clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia* publicado por el Servicio Geológico Colombiano (2017). Para establecer los criterios de clasificación presentados en la tabla No. 2, se utilizaron los datos proporcionados por el SIMMA para los tres movimientos en masa registrados en esta plataforma. Para los deslizamientos restantes, se llevó a cabo una consulta con la comunidad local para determinar el grado de impacto en la vía y para recabar información sobre posibles víctimas mortales o desaparecidas como resultado de los deslizamientos en cada punto.

**Tabla 2**

*Criterios de clasificación de los movimientos en masa establecida por el SGC.*

<b>Grupo</b>	<b>Movimiento</b>	<b>Criterio</b>
1	Catastrófico	Efectos con daños muy significativos para la economía nacional o pérdidas de centenares de vidas humanas
2	Muy severos	Efectos con algunas víctimas humanas y damnificados, con costos muy cuantiosos para la economía regional
3	Menore	Efectos con daños menores y sin víctimas humanas, hasta efectos no registrados

Fuente: Adaptada (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

## Fase 2

### **Analizar la topografía de un punto crítico específico, mediante el uso de un modelo 3D creado a partir de fotografías aéreas.**

A partir de los deslizamientos identificados en campo y mapa generado con la ubicación geográfica de estos, se selecciona el movimiento en masa considerado de mayor tamaño o mayor punto crítico para realizar el modelo 3D, el cual es creado a partir de fotografías aéreas obtenidas mediante un vuelo con dron.

#### **Selección del punto crítico**

Para la selección del punto crítico al cual se le realiza el modelo 3D, se priorizaron aquellos que fueron clasificados dentro de los grupos 1 y 2 según la tabla No 2 de los *Criterios de clasificación de los movimientos en masa establecidos por el SGC*. Además, se tomaron en cuenta parámetros clave como: longitud de la afectación a lo largo del corredor vial, la facilidad de acceso hasta el sitio y los factores climáticos específicos del sector. Es importante resaltar la relevancia de este último factor, ya que las condiciones climáticas juegan un papel crucial en la viabilidad de realizar vuelos con drones. Es esencial contar con condiciones climáticas favorables para garantizar la seguridad y la calidad de las imágenes capturadas durante el vuelo. Por lo tanto, la evaluación de los factores climáticos se convierte en un aspecto fundamental en el proceso de selección del punto crítico.

Basándose en lo mencionado anteriormente, las opciones disponibles son los movimientos en masa identificados en los PR 45+300 y PR 16+300. El primero de estos puntos presenta una afectación al corredor vial de 180 metros y es fácilmente accesible. Sin embargo,

debido a su ubicación geográfica en los límites con el páramo de Cerro Plateado, se enfrenta a condiciones climáticas adversas que dificultan la realización de vuelos con drones, tales como nubosidad y lloviznas. El segundo punto, al estar ubicado a una altitud de 1038 msnm, se encuentra en un piso térmico cálido. Por esta razón, las condiciones climáticas son propicias para llevar a cabo vuelos con drones. En cuanto a las demás características, son similares a las del PR45+300.

De acuerdo a lo señalado previamente, el punto seleccionado es el deslizamiento en masa del PR 16+300 localizado en las coordenadas latitud: 2.032369 y longitud: -77.188078, vereda La Esperanza municipio de Balboa, cuenta con una longitud de 150 m y una altura promedio de 30 m, rodeado mayormente de vegetación tipo arbusto y suelos de tipo arcilloso; según el reporte oficial del SIMMA, la fecha de ocurrencia del deslizamiento fue el 11 de noviembre de 2011.

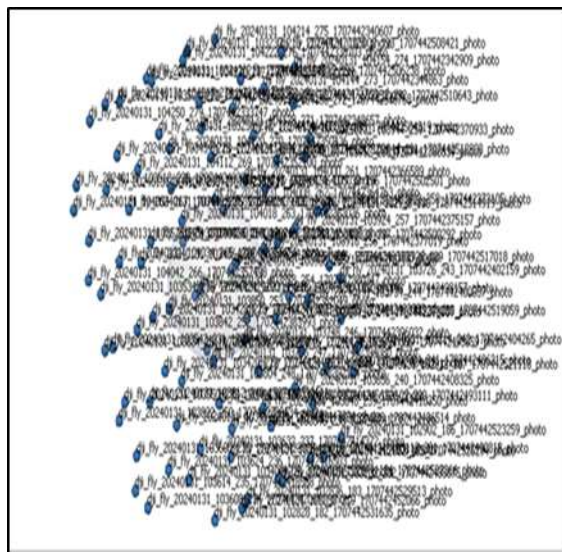
### **Herramientas utilizadas**

Para la captura de fotografías aéreas se empleó el dron DJI Air2S junto con el software Drone Harmony, el cual se utilizó para planificar el vuelo. En el terreno, se tomó como referencia el estudio de Ayala (2018), donde sugiere una altura de vuelo de 50 metros. Posteriormente, se llevó a cabo el vuelo, arrojando como resultando un total de 435 fotografías aéreas del área de interés.

Para el procesamiento de las imágenes aéreas, se empleó el software Agisoft Metashape. En este programa, se cargaron las fotografías mediante la herramienta *nuevo proyecto* de la pestaña *archivo*, se ajustaron al sistema de coordenadas WGS84.

**Figura 5**

*Imágenes cargadas en el software Agisoft Metashape*



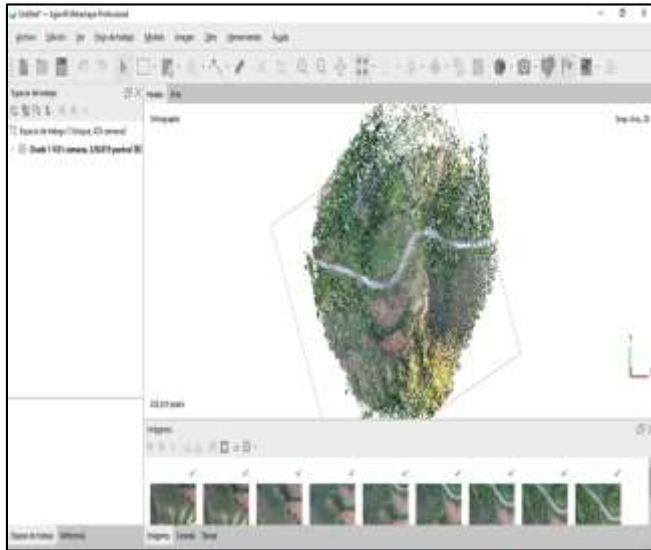
Fuente: Elaboración propia

Una vez georreferenciadas las imágenes se aplica el proceso *orientar fotografías* en la caja de herramienta. Posteriormente, se creó la nube de puntos a partir de la herramienta *flujo de trabajo*, enfatizando la opción de calidad disponible: alta, media o baja. Para este trabajo de investigación, se optó por la calidad alta. En el computador utilizado (un Lenovo con Ryzen 5, 8GB de RAM y 512GB de SSD), cada proceso tardó entre 1.5 a 2 horas.

Por otra parte, el filtrado de profundidad varía según el tipo de terreno en consideración, siendo leve en zonas planas, moderado en áreas escarpadas y agresivo en terrenos muy montañosos. En este caso, siendo un terreno escarpado se optó por un filtrado moderado, de acuerdo a lo observado en las imágenes satelitales y durante las visitas de campo.

**Figura 6**

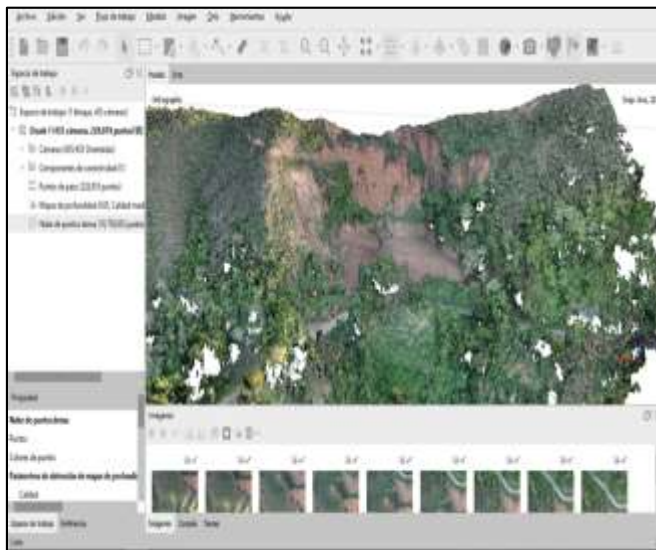
*Orientación de las fotografías aéreas*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7**

*Creación de la nube de puntos*

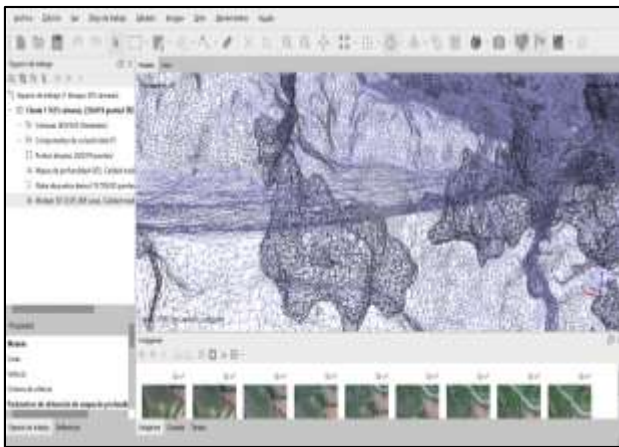


Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la nube de puntos densa creada (Figura 7), se pueden apreciar puntos blancos que el software no puede completar debido a factores como la sombra, el ángulo del dron, las nubes, etc. Por esta razón, es necesario crear una malla base, la cual implica la triangulación del modelo en partes muy pequeñas mediante la herramienta en el software llamada *malla de puntos* de la pestaña *flujo de trabajo*. Con este proceso, el programa busca rellenar los triángulos donde aparecen estos espacios en blanco utilizando la textura de cada una de las fotografías tomadas, basándose en la georreferenciación realizada anteriormente.

## Figura 8

### *Creación malla de puntos*



Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los resultados anteriores, se procede a crear el modelo 3D del punto de estudio, aplicando un teselado, mediante la herramienta *crear modelo de tesela* de la pestaña *flujo de trabajo*, el cual es un proceso que ayuda a liberar «peso» al procesador de la computadora, cargando los datos en forma escalonada. El Modelo de Tesela pone textura al modelo 3D creado.

**Figura 9**

*Modelo 3D creado del PR 16+300*



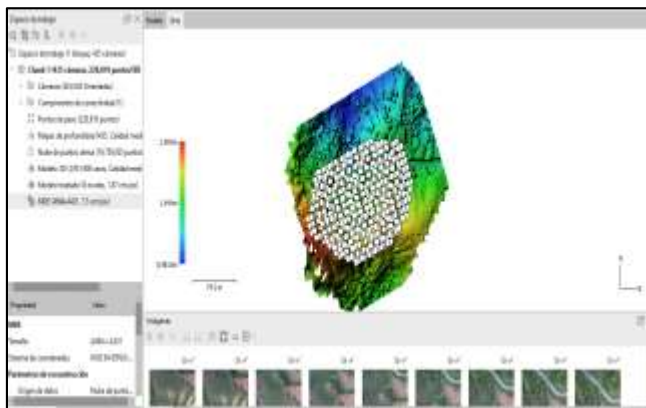
Fuente: Elaboración propia

**Herramientas creadas para el análisis del sector**

Para el análisis del área de estudio se debe tener en cuenta variables como, elevación del terreno, vegetación existente, tipo de suelo entre otros, por tal motivo se procede a crear un modelo de elevación digital (de la superficie), mediante la herramienta *crear modelo digital* desde la pestaña *flujo de trabajo*, el cual define la elevación de todos los objetos presentes.

**Figura 10**

*Modelo de elevación digital DEM (de la superficie) realizado*



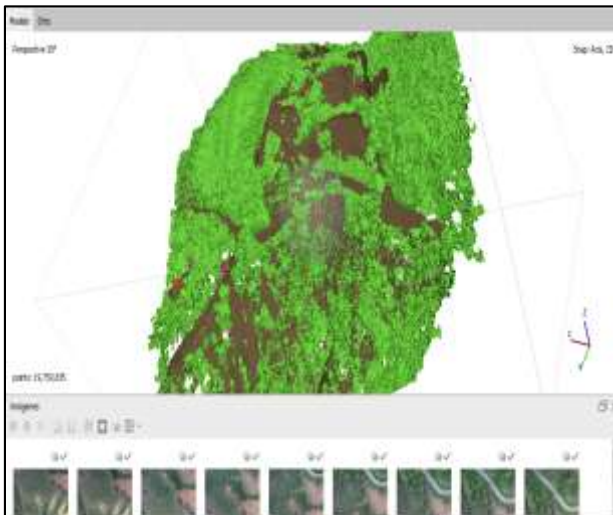
Fuente: Elaboración propia



Posteriormente, mediante la herramienta *clasificar puntos* a partir de la pestaña *nube de puntos densa* se realizó una clasificación de los objetos que no se desean incluir en el Modelo de Elevación Digital (DEM), tales como edificaciones, arbustos, árboles y vehículos. Es decir, se procedió a generar un Modelo de Elevación Digital del terreno. En la figura 11, se visualiza en color verde lo que el sistema interpretó como vegetación, en tono café se representa el suelo desnudo, y en tono rosado se identifican las edificaciones. En este caso, se llevó a cabo manualmente la clasificación de algunos objetos, especialmente en lo que respecta a la vegetación, que el software no pudo identificar.

### Figura 11

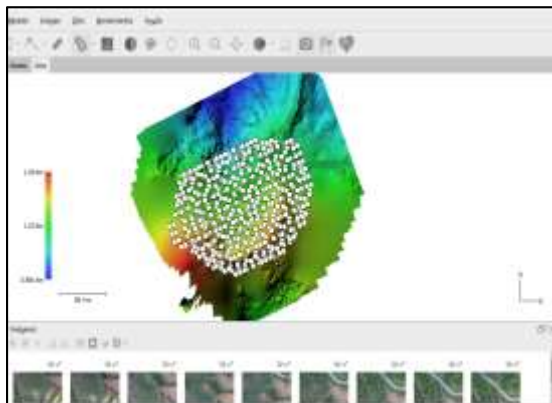
#### *Clasificación de superficies*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 12**

*DEM creado*



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se exportó el Modelo de Elevación Digital (DEM) con una resolución de 0.07m en formato TIF, con el propósito de integrarlo a un software SIG para proseguir con el análisis del área de interés mediante la interpretación de las curvas de nivel del punto. En este caso de estudio, se empleó el software ArcGIS Pro para integrar el DEM, como se muestra en la figura 13.

**Figura 13**

*DEM importado al software ARCGIS PRO*



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente mediante la herramienta *contour* se proyectaron curvas de nivel para el DEM y ortofoto del área de estudio cada 2m y 10m, como se observa a continuación.

### Figura 14

*Curvas de nivel sobre el DEM generadas en Arcgis PRO.*



Fuente: Elaboración propia.

### Fase 3

#### **Establecer propuestas de mitigación alternativas para atenuar futuros deslizamientos**

Teniendo en cuenta que el presupuesto para este tipo de obras es reducido, se plantean algunas obras de mitigación desde el punto de vista ambiental y el área técnica que permita atenuar estos movimientos en masa, de acuerdo al tipo de suelo, temperatura, elevación sobre el nivel de mar, y condiciones ambientales que se presenten en el sector.

Para esto se llevó a cabo un proceso de consulta de diversas fuentes bibliográficas sobre métodos de tipo ambiental que permitan la mitigación de deslizamientos en puntos críticos. Se

consideraron factores como la composición del suelo, la vegetación del terreno, el uso del suelo, los asentamientos cercanos y la pendiente del terreno. Se hizo especial hincapié en los estudios realizados en áreas con vegetación de bosque seco tropical, similar a la observada en la etapa de campo. Finalmente, se seleccionaron los métodos que se consideran más apropiados para abordar este punto crítico.

Es válido aclarar que los métodos de mitigación que se investigan en las fuentes bibliográficas consultadas, no competente a la construcción de estructuras de contención tipo muro ni obras de drenaje, debido a que financieramente se encuentran fuera del alcance para el municipio, además de requerir de más estudios.

## 8. Resultados

### Fase 1

Utilizando las coordenadas recopiladas en el terreno, se procedió a contrastar y corroborar sobre la imagen satelital descargada, los desplazamientos en masa identificados. De esta manera, se llevó a cabo una evaluación precisa y detallada de los deslizamientos, lo que permitió obtener una comprensión más completa de varios factores que pueden influir en estos movimientos, tales como: vegetación de la zona, el uso del suelo, la topografía del terreno, la composición del suelo y los asentamientos cercanos. A continuación, se presentan los movimientos en masa identificados en campo y verificados mediante la imagen satelital.


**Tabla 3**




*Inventario movimientos en masa entre los PR 0+000 al 52+706 de la vía Balboa – Argelia departamento del Cauca.*

N°	Registro fotográfico	Características
1		PR: 16+300 <hr/> Fecha ocurrencia: 11 nov 2011 (registro SIMMA) <hr/> Coordenadas: Lat: 2.032369 Long: -77.188078 <hr/> Altura: 1038 msnm <hr/> Tipo de suelo: Arcilloso <hr/> Vereda: La esperanza - Balboa

<p>2</p>		<p>PR: 17+600</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 18 nov 2009 (registro SIMMA)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.043047 Long: -77.199606</p> <hr/> <p>Altura: 1198 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Arcilloso</p> <hr/> <p>Vereda: La esperanza - Balboa</p>
<p>3</p>		<p>PR: 33+635</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 12 dic 2021 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.101287 Long: -77.204121</p> <hr/> <p>Altura: 2115 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Franco</p> <hr/> <p>Vereda: Campo Bello - Balboa</p>
<p>4</p>		<p>PR: 33+850</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 22 feb 2022 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.103990 Long: -77.206088</p> <hr/> <p>Altura: 2130 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Franco</p> <hr/> <p>Vereda: Campo Bello – Balboa</p>



5		<p>PR: 34+100</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 18 oct 2009 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.109501 Long: -77.208072</p> <hr/> <p>Altura: 2161 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Rocoso</p> <hr/> <p>Vereda: San Francisco - Balboa</p>
6		<p>PR: 35+985</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 11 nov 2022 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.122471 Long: -77.212292</p> <hr/> <p>Altura: 2270 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Franco</p> <hr/> <p>Vereda: La Planada - Balboa</p>
7		<p>PR: 38+250</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 16 mar 2023 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.137836 Long: -77.211578</p> <hr/> <p>Altura: 2367 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Arcilloso</p> <hr/> <p>Vereda: San Alfonso - Balboa</p>

<p>8</p>		<p>PR: 40+150</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 07 jul 2023 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.147144 Long: -77.214747</p> <hr/> <p>Altura: 2387 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Franco</p> <hr/> <p>Vereda: La Floresta - Balboa</p>
<p>9</p>		<p>PR: 41+600</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 15 sep 2011 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.154073 Long: -77.212915</p> <hr/> <p>Altura: 2436 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Rocoso</p> <hr/> <p>Vereda: La Floresta - Balboa</p>
<p>10</p>		<p>PR: 41+850</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 18 nov 2023 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.157314 Long: -77.213057</p> <hr/> <p>Altura: 2510 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Franco</p> <hr/> <p>Vereda: La Floresta – Balboa</p>



11		<p>PR: 41+910</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 18 oct 2022 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.157772 Long: -77.213130</p> <hr/> <p>Altura: 2530 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Franco</p> <hr/> <p>Vereda: La Floresta - Balboa</p>
12		<p>PR: 45+300</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 18 oct 2022 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.172336 Long: -77.216385</p> <hr/> <p>Altura: 2398 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Rocoso</p> <hr/> <p>Vereda: Puente Tierra – Argelia</p>
13		<p>PR: 46+500</p> <hr/> <p>Fecha ocurrencia: 18 oct 2022 (inf. comunidad)</p> <hr/> <p>Coordenadas: Lat: 2.187658 Long: -77.217184</p> <hr/> <p>Altura: 2197 msnm</p> <hr/> <p>Tipo de suelo: Franco</p> <hr/> <p>Vereda: Puente Tierra - Argelia</p>

Fuente: Elaboración propia

En la fase de identificación de los movimientos en masa en campo se evidenciaron 13 deslizamientos que se clasificaron de acuerdo a la tabla 2, extraída de la *Clasificación de Movimientos en Masa y su Distribución en Terrenos Geológicos Colombianos* publicada por el SGC (2017). En esta tabla, se establecen tres valores de referencia: categoría 3 (menores), que causaron impactos leves en la vía y/o en vidas humanas; categoría 2 (muy severos), que ocasionaron afectaciones cobrando vidas humanas y/o generando costos significativos para la economía regional; y categoría 1 (catastrófico), que provocó una afectación severa a la economía nacional o la pérdida de cientos de vidas humanas.

Por consiguiente, se considera fundamental la información registrada en el sitio web SIMMA sobre las víctimas mortales o desaparecidas en estos puntos debido a los movimientos en masa. A continuación, se presenta como ejemplo la consulta realizada para el deslizamiento del PR 16+300, donde se muestra el grado de afectación en la vía y la población afectada.

### Figura 15

*Población y corredor vial afectado – registros SIMMA*



Fuente: SIMMA

Para los casos en los que no hay registro en el portal web SIMMA ni en otra documentación, se consultó con la comunidad cercana. Como resultado, coinciden en que ninguno de estos deslizamientos ha causado víctimas humanas. Sin embargo, tanto el deslizamiento del PR 45+300 como el mencionado anteriormente en el PR 16+300 han ocasionado afectaciones considerables en el corredor vial y, por lo tanto, han generado costos significativos para la economía local. Por tal motivo, estos dos puntos críticos se consideran como grado 2 en la tabla de *clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos colombianos del SGC (2017)*.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los deslizamientos en masa en la vía Balboa – Argelia, junto con su respectiva clasificación.

**Tabla 4**

*Clasificación de movimientos en masa en el tramo de estudio según su magnitud*

No	PR	COORDENADAS		CLASIFICACIÓN		
		LATITUD	LONGITUD	1	2	3
1	16+300	2.032369	-77.188078		X	
2	17+600	2.043047	-77.199606			X
3	33+635	2.101287	-77.204121			X
4	33+850	2.103990	-77.206088			X
5	34+100	2.109501	-77.208072			X
6	35+985	2.122471	-77.212292			X
7	38+250	2.137836	-77.211578			X
8	40+150	2.147144	-77.214747			X
9	41+600	2.154073	-77.212915			X
10	41+850	2.157314	-77.213057			X

<b>11</b>	41+910	2.157772	-77.213130		X
<b>12</b>	45+300	2.172336	-77.216385	X	
<b>13</b>	46+500	2.187658	-77.217184		X

Fuente: Elaboración propia

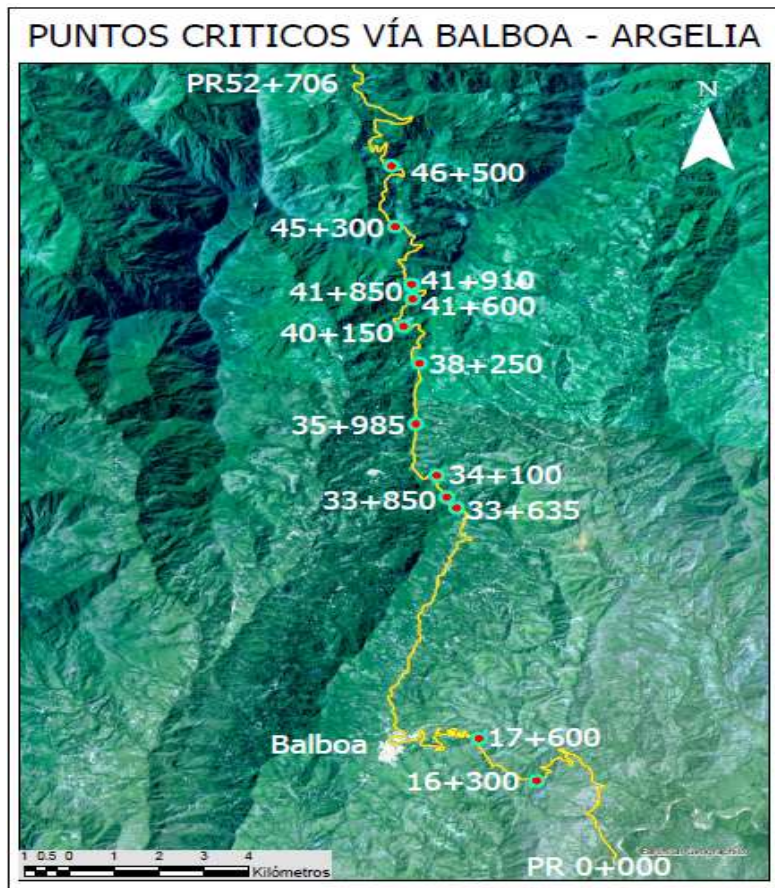
Como se evidencia en la tabla anterior, no se registran movimientos en masa sobre este corredor vial que haya causado una afectación severa, es decir ninguno de los deslizamientos registrados ha causado afectaciones graves sobre la economía nacional ni ha generado centenares de muertes, considerando que, de acuerdo a la *Guía Para Realizar la Categorización de la Red Vial Nacional* publicada por el Ministerio de Transporte (2012) esta vía es catalogada como de segundo orden, en otras palabras es una vía que presenta un flujo vehicular entre 150 a 700 vehículos/día y por medio de la cual se conectan dos municipios, por tal motivo los eventos de inestabilidad que se presenten en esta vía, normalmente no se clasifican dentro de este primer grupo (1-catastróficos), dado que, las afectaciones a la economía se reflejarían solo a nivel local o regional.

Por otra parte, se registraron deslizamientos en los PR 16+300 y 45+300, clasificados dentro del segundo grupo (2-muy severos). La magnitud de estos eventos, confirmada mediante visitas de campo, provocó el cierre total de la vía durante varios días, generando costos significativos para la economía local. Es importante destacar que no se reportaron pérdidas de vidas humanas en estos puntos.

Finalmente, de los movimientos en masa identificados en este estudio, 11 se clasificaron dentro del tercer grupo (3-menores). Estos incidentes causaron daños menores en el corredor vial, resultando en cierres parciales de la vía, pero sin causar víctimas humanas.

**Figura 16**

*Puntos críticos identificados en la vía Balboa – Argelia sobre la imagen satelital descargada*



Fuente: Elaboración propia.

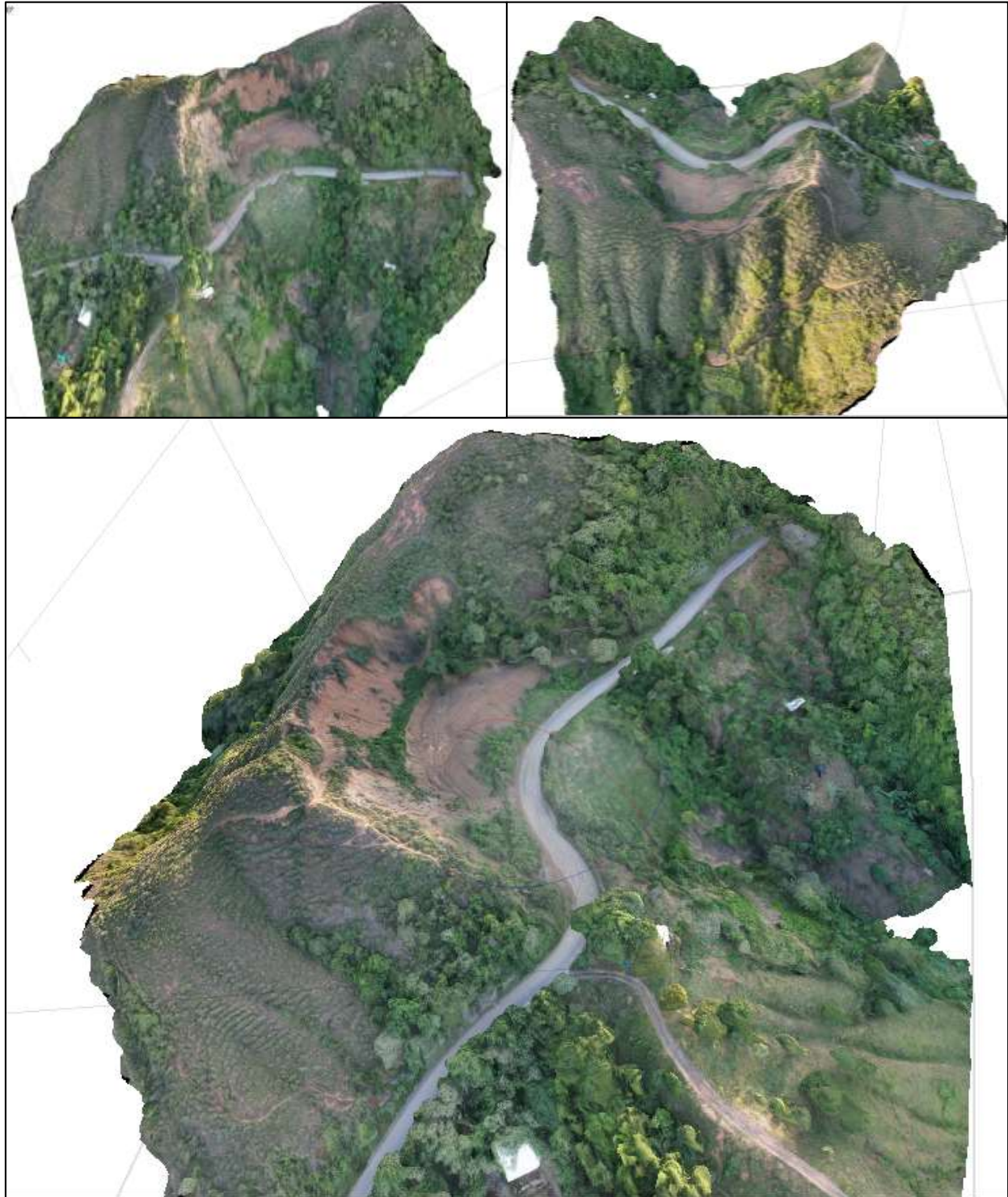
**Fase 2**

A partir de los movimientos en masa identificados en el tramo de estudio, se seleccionó el punto crítico en el PR 16+300, como se indica en la fase 2 de la metodología: selección del punto crítico. Se realizó un sobrevuelo con el dron DJI Air2s sobre este punto, y a partir del procesamiento de 435 fotografías capturadas, se obtuvo un modelo 3D con un área de 41,000 m<sup>2</sup>. Este modelo muestra una elevación máxima del terreno de 1082 metros sobre el nivel del mar (msnm) y una mínima de 990 msnm.



**Figura 17**

*Modelo 3D creado, punto crítico PR 16+300*



Fuente: Elaboración propia.

A partir del modelo creado se pudo realizar un análisis más riguroso de diferentes parámetros que pueden influir en los movimientos en masa como: composición del suelo, vegetación del terreno, uso de suelos, asentamientos cercanos, pendiente del terreno.

### **Composición del suelo**

Analizando detenidamente el modelo y basado en lo percibido en campo, se observa que, tanto en el punto crítico como en toda el área del modelo, predomina un tipo de suelo arcilloso. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua de México (2007), los suelos arcillosos son de tipo plástico debido a su alto contenido de minerales arcillosos, como la montmorillonita y la esmectita, lo que les hace experimentar grandes cambios de volumen al modificar su humedad. Estos suelos se caracterizan por un comportamiento cíclico de expansión y contracción al aumentar y disminuir su contenido de agua, respectivamente. Por lo tanto, todos los suelos cohesivos tienden a expandirse o contraerse con los cambios en la humedad.

### **Figura 18**

*Suelo arcilloso evidenciado en el punto crítico*



Fuente: Elaboración propia.

### **Vegetación del terreno**

En el punto crítico de estudio se observa un suelo desnudo, afectado por desprendimientos de tierra continuos desde la parte alta, así como por erosión causada por la escorrentía de aguas pluviales y la acción del viento. En otras áreas del modelo, se evidencia un 70% de vegetación herbácea, especialmente en la parte alta y detrás del talud afectado. Por último, en la parte baja del modelo, se detecta vegetación arbustiva (no superior a 4 m de altura), lo que indica un terreno estable en esta parte del talud.

### **Figura 19**

*Vegetación tipo herbácea presente en el área del punto crítico*



Fuente: Elaboración propia.

### **Uso de suelo y asentamientos cercanos**

Se observa un uso de suelo rural. Considerando las líneas de nivel en forma de isoyetas o curvas de nivel en la parte alta detrás del talud afectado, se puede concluir que se destina al uso ganadero, siendo aprovechado por las comunidades más cercanas al área. Esto también contribuye a que la vegetación predominante en esta zona sea principalmente herbácea. Por otro lado, no se detectan viviendas cerca del deslizamiento, lo que sugiere que el movimiento en masa en este punto crítico no está relacionado con la presencia de asentamientos cercanos.



**Figura 20**

*Rastros típicos en suelos de uso ganadero*



Fuente: Elaboración propia.

**Pendiente del terreno**

Otro factor influyente en los movimientos en masa es la topografía del terreno. Por esta razón, se crearon curvas de nivel cada 10 metros y un perfil del terreno que permite analizar el tipo de pendiente presente en este punto crítico. Se observa una diferencia de alturas (distancia horizontal) de 29.27m y una distancia vertical de 60.67m, para el cálculo de la pendiente se tiene entonces:

$$Pendiente = \frac{\text{Distancia vertical}}{\text{Distancia horizontal}} \times 100\%$$

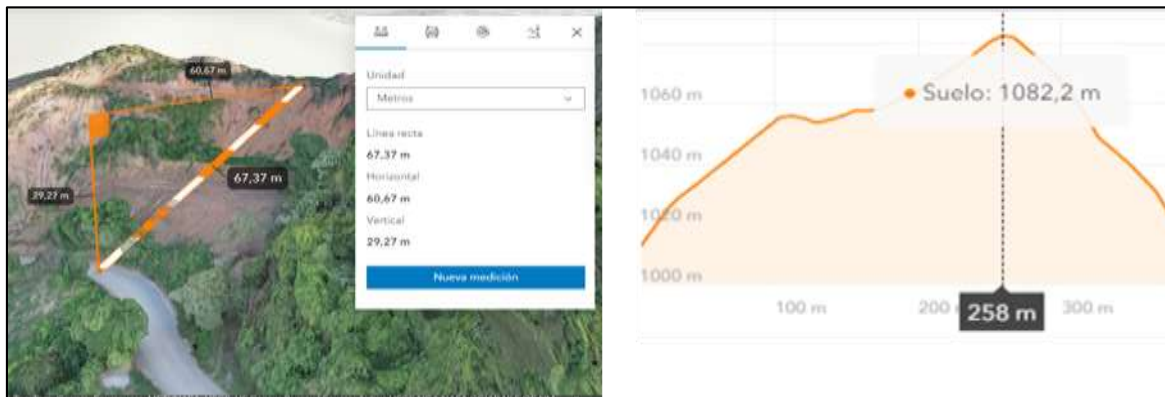
$$P = \frac{29.27}{60.67} \times 100\% \quad P = 48.24\%$$

Basándose en la Guía para la descripción de suelos publicada por la Organización de las Naciones Unidas (2009), se determina a partir del resultado obtenido (48.24%) que corresponde a una pendiente del terreno de clase 5, lo que señala que se trata de un terreno escarpado. Al observar el perfil del terreno, se nota que la elevación más baja registrada es de 990 metros sobre

el nivel del mar (msnm), mientras que la elevación más alta alcanza los 1082 msnm, evidenciando cambios abruptos en la elevación en distancias cortas, lo que sugiere la presencia de un terreno escarpado

**Figura 21**

*Pendiente del talud y perfil del terreno calculado en Arcgis online.*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 22**

*Curvas de nivel PR 16+300.*



Fuente: Elaboración propia

### **Fase 3**

Después de revisar diversas fuentes bibliográficas, se consideró como referencia principal el trabajo titulado *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* realizado por Suárez (1998). Este estudio aborda varios métodos para estabilizar taludes en áreas tropicales, con características similares a los factores ambientales observados en nuestra zona de estudio.

En este caso específico, se examinaron las propuestas de bioingeniería y revegetalización de taludes. Estas opciones fueron elegidas por ser adecuadas para las condiciones climáticas de la zona de estudio, en particular el punto crítico seleccionado, PR 16+300, que se encuentra en un piso térmico cálido. Además, estas soluciones no requieren un presupuesto elevado y son accesibles para el municipio.

A continuación, se detallan las obras de mitigación recomendadas para este sector.

#### **Modificación o perfilado del talud**

Este tipo de modificaciones busca mejorar las condiciones de estabilidad de un talud o ladera, ejecutando medidas mediante las cuales se obtenga el equilibrio de masas y la reducción de fuerzas que producen el movimiento del material térreo, Suárez (1998).

Lo anterior puede hacerse abatiendo el talud o construyendo terrazas o bermas intermedias. Mediante el abatimiento de la pendiente del talud, se busca que la superficie de falla se extienda en longitud, aumentando la seguridad del mismo frente a un evento de deslizamiento. La práctica de remover materiales desde las partes altas de un talud es un método muy efectivo que se utiliza con frecuencia en fallas activas, Suárez (1998).

### Revegetación

La alternativa más favorable para proteger este talud contra el fenómeno de erosión es mediante el uso de cobertura vegetal, ya sea utilizando pastos, juncos, hierbas, arbustos o árboles. Después de observar el entorno y el área de influencia, se determinó que la medida recomendada para este ambiente es el sistema de siembra directa de pasto brachiaria. Este tipo de pasto se adapta bien al clima de la zona y su sistema radicular profundo le permite obtener agua durante períodos de sequía. Además, se recomienda implementar trinchos mediante estacas vivas, las cuales se entierran en el suelo para que crezca vegetación en el área que se pretende revegetar. Este sistema puede utilizarse como tratamiento primario, ya que las estacas ayudan a anclar temporalmente el suelo donde se siembran las semillas, permitiendo que los trinchos crezcan y se conviertan en arbustos sobre el área tratada.

Se considera viable complementar el anterior sistema con una reforestación del sector, de acuerdo a las compensaciones forestales que se han presentado en la zona se tipifica el terreno como un sector de bosque seco tropical, en el que las especies que más se adaptan a este ambiente son:

**Tabla 5**

*Especies arbóreas recomendadas para siembra en el sector*

Nombre común	Especie
Arrayán	Myrcia popayanensis Hieron
Guamo	Inga edulis Mart.
Guayaba	Psidium guajava L.
Carbonero	Calliandra pittieri Standl.
Cachimbo	Erythrina poeppigiana (Walp.) O.F. Cook

Fuente: Plan de compensación forestal – Consorcio vías y Equipos Balboa 2021.

### **Zanjas de coronación**

Otro sistema que puede aplicarse, según la topografía del sector, es la implementación de zanjas de coronación. Estas zanjas permiten el control de la escorrentía mediante la construcción de cunetas y/o canales recolectores y descoles. Es importante que la entrega de la escorrentía recolectada a los canales naturales se realice de manera que no genere erosión adicional.

Las cunetas deben construirse sobre el terreno natural y revestirse preferiblemente con geomembrana impermeable o, en su defecto, con plástico. Además, este material debe ser asegurado al suelo natural mediante estacas para resistir la fricción del agua.

## 9. Discusión

Tras realizar las fases 1 y 2 del estudio, se deduce que los factores analizados mediante el modelo 3D son factores subyacentes que influyen en la estabilidad del talud del punto crítico del PR 16+300 de la vía Balboa –Argelia.

La utilización del suelo para la ganadería afecta el crecimiento y la cobertura vegetal existente, lo cual propicia la erosión eólica. Además, la ausencia de árboles de gran envergadura contribuye a la falta de un sistema radicular profundo que pueda anclar naturalmente el suelo. Esta observación coincide con los hallazgos de Suárez (1998), quien señala el efecto positivo de la vegetación en la prevención de problemas como la erosión, reptación y fallas subsuperficiales. Por lo tanto, se considera apropiado, para mitigar el movimiento en masa en el punto crítico del PR 16+300, implementar un tratamiento primario como la revegetalización, tal como se ha descrito anteriormente.

Por otro lado, la pronunciada pendiente del área promueve la erosión superficial causada por las aguas pluviales, lo que resulta en un arrastre continuo de material sobre la vía. Además, la erosión del suelo facilita una mayor infiltración del agua en el terreno, principalmente compuesto por material arcilloso. Esta situación aumenta la saturación y plasticidad del talud, creando condiciones propicias para nuevos deslizamientos, especialmente durante la temporada de lluvias. Este fenómeno concuerda con lo mencionado por Suárez (1998), quien sostiene que en suelos residuales arcillosos se han observado procesos de reptación del suelo tras la quema de bosques en áreas de alta pendiente. Así mismo se puede determinar que, el factor de asentamientos cercanos no influye en este deslizamiento, ya que no se observan asentamientos cercanos que puedan afectar el talud por actividades como el mal manejo de aguas.

## 10. Conclusiones

La aplicación de herramientas SIG como imágenes satelitales emerge como una estrategia fundamental para el estudio de sitios críticos como el punto del PR 16+300 de la vía Balboa – Argelia. Estas herramientas permiten una representación detallada del terreno y sus características, lo que facilita la identificación y estudio de factores subyacentes que influyen en la estabilidad del área. La capacidad de observar y modelar el terreno de manera precisa proporciona una comprensión más completa de las interacciones entre variables como la topografía, el uso del suelo y la vegetación, lo cual es fundamental para tomar decisiones informadas en la planificación y gestión de riesgos.

Los factores analizados a través del modelo 3D demuestran ser determinantes en la estabilidad del talud del punto crítico del PR 16+300 de la vía Balboa –Argelia. Específicamente, la influencia negativa del uso del suelo para la ganadería y la ausencia de una vegetación adecuada destacan la importancia de implementar medidas de revegetalización para mitigar el movimiento en masa en la zona.

La topografía pronunciada del área agravada por la erosión superficial causada por las aguas de lluvia crea condiciones propicias para la ocurrencia de deslizamientos de tierra, especialmente durante la temporada de lluvias. Este fenómeno, respaldado por hallazgos previos, subraya la necesidad de medidas adicionales para controlar la erosión y estabilizar el terreno arcilloso.

## **11. Recomendaciones**

Para la mitigación de los impactos generados por los continuos deslizamientos en este punto crítico es oportuno aplicar programas de revegetalización: Dado el impacto negativo del uso del suelo para la ganadería en la cobertura vegetal y la estabilidad del terreno, se recomienda llevar a cabo programas de revegetalización en el punto crítico del PR 16+300. Estos programas pueden incluir la siembra de árboles de gran porte y restauración de la vegetación nativa para fortalecer el sistema radicular del suelo, esto con el fin de reducir la erosión eólica.

Se sugiere llevar a cabo evaluaciones de riesgo periódicas para identificar posibles movimientos sobre los puntos críticos existentes o para la detección de nuevos puntos de riesgo a través de monitoreo continuo, dado la amenaza constante de nuevos deslizamientos, especialmente durante la temporada de lluvias. Esto puede implicar el uso de tecnologías de monitoreo remoto, como imágenes satelitales o drones, para detectar cambios en la estabilidad del terreno y tomar medidas preventivas de manera oportuna.

Desde el área ambiental, es muy importante tener en cuenta medidas de conservación y restauración del ecosistema circundante. Esto puede incluir la implementación de programas de reforestación y restauración, así como poner en practica corredores ecológicos para impulsar la biodiversidad y fortalecer la estabilidad del terreno. Además, es fundamental ejecutar prácticas de manejo sostenible del suelo para reducir la erosión y mejorar la calidad del suelo en el PR 16+300 de la vía Balboa – Argelia.



## 12. Referencias

- Acevedo, E. Cabrera, F. Serrano, J. (2022). Modelo de deslizamientos de tierra usando OpenFOAM aplicado a la zona de Pamplona, Colombia. (vol 20) Bistua.
- Agisoft LLC (2023). Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Versión 2.1. Obtenido de: [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_2\\_1\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_en.pdf)
- Alayo, J. Villegas, J. (2021). Estimación de desplazamientos ocasionados por deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, mediante análisis de imágenes satelitales. (vol 24) Investigación de física.
- Alonso, L. Baudilio, S. (2021) Uso de drones y sensores remotos para el monitoreo de laderas. (vol 14). Ingenierías UsbMed.
- Ayala, C. Moreno, M. (2018). Aplicación de la fotogrametría con droness para la caracterización de deslizamientos. (vol 1 N° 2). Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad.
- Banco mundial. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Banco Mundial Colombia. Obtenido de: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/671321468026993367/pdf/701030ESW0P1290ESTI0N0DEL0RIESGOweb.pdf>
- Bonilla, M. Kirenia, M. Zambrano, S. Ceballos, W. (2021). El uso de los drones en el ámbito profesional. Revista Científica Multidisciplinaria. Vol. 5, No. 4 Pág. 75-82.
- Campanaro, D. Landeschi, G. DellUnto, N. Leander, A. (2016). 3D GIS for cultural heritage restoration: A 'white box' workflow. Journal of Cultural Heritage. Volume 18, Pág. 321-332.

Comisión nacional del agua. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento.

Diseño estructural. Obtenido de: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro6.pdf>

Consorcio Vías y Equipos Balboa 2021. (2021). Plan de establecimiento y manejo forestal como medida de compensación del proyecto de pavimento flexible del tramo 4 de la vía 1202 estrecho-balboa-Argelia-el plateado entre el municipio de Argelia y Balboa.

DANE. (2018). Censo nacional de población y vivienda 2018 Colombia. Departamento administrativo nacional de estadística. Obtenido de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>

De Jong, S. M. Van Der Meer, F. (2005) Remote Sensing Image Analysis: including the spatial domain. Kluwer Academic Publishers. New York.

DJI. (2021). Manual de usuario v1 06-21. DJI Air2S. Obtenido de:

[https://dl.djicdn.com/downloads/DJI\\_Air\\_2S/DJI\\_Air\\_2S\\_User\\_Manual\\_v1.0\\_es.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Air_2S/DJI_Air_2S_User_Manual_v1.0_es.pdf)

Esquema de ordenamiento territorial EOT. (2010). Alcaldía municipal de Balboa. Secretaría de infraestructura.

Flórez, Antonio. (2003). Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Universidad nacional de Colombia. Unibiblos.

García, A. (2011). Satélites y la exploración del espacio. Revista de información, tecnología y sociedad. pp. 5-5.

Gobernación del Cauca. (2018). Perfil del departamento del Cauca. Secretaría de planeación e infraestructura. Obtenido de:  
<https://www.cauca.gov.co/Dependencias/OficinaAsesoradePlaneacion/InformacioneIndicadores/Perfil%20Departamento%20del%20Cauca.pdf>

Gómez, R. Martín, D. Gonzales, B. Sacristan, M. Marín, R. (2021). Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno. Informes de la Construcción. Vol. 73, 561, e379.

Gupta, Sharad. Shukla, Dericks. (2018) Aplicación de drones para mapeo de deslizamientos, estimación de dimensiones y su reconstrucción 3D. Revista de la Sociedad India de Teledetección.

Lozano, P. Küppers, M. (2007). Regeneración pionera en deslizamientos de tierra producidos por perturbaciones antropogénicas junto a carreteras, en la zona de amortiguamiento del parque nacional podocarpus, Ecuador. (vol 8) Cinchonia.

Moreno, H. Velez, M. Montoya, J. Rhenals, R. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. (vol 4). EIA.

Naciones Unidas (2020), América Latina y el Caribe: la segunda región más propensa a los desastres. Oficina de la ONU para Asuntos Humanitarios. Obtenido de:  
<https://news.un.org/es/story/2020/01/1467501>

Organización de las Naciones Unidas. (2009). Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición.

Obtenido de: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>

Owena, M. Dayb, S. Maslin, M. (2006). Late Pleistocene submarine mass movements:

occurrence and causes. (vol 26) Quaternary Science Reviews.

Plan de desarrollo territorial Argelia. (2020). Alcaldía municipal de Argelia. Secretaría de

infraestructura. Obtenido de: <https://www.tangara.gov.co/wp-content/uploads/2023/12/ARGELIA-PLAN-DE-DESARROLLO-MUNICIPAL-2020-2023.pdf>

PlanetScope (2023). Product Specifications. Obtenido de:

[https://assets.planet.com/docs/Planet\\_PSScene\\_Imagery\\_Product\\_Spec\\_letter\\_screen.pdf](https://assets.planet.com/docs/Planet_PSScene_Imagery_Product_Spec_letter_screen.pdf)

Pucha, F. Fries, A. (2023). Manual de ArcGIS Pro. Obtenido de:

[https://www.academia.edu/111426451/Manual\\_de\\_ArcGIS\\_Pro?uc-sb-sw=37699795](https://www.academia.edu/111426451/Manual_de_ArcGIS_Pro?uc-sb-sw=37699795)

Rivera, O. (2020). Fotogrametría de drones para la prevención de deslizamientos de tierra en la

ciudad de México. (vol 4) Reder.

Servicio Geológico Colombiano. (2023). Informe visita de emergencia a la microcuenca de la

quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alternativo de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento del Cauca. Obtenido de:

[https://www2.sgc.gov.co/Noticias/tpaginas/Concepto\\_Tecnico\\_SGC\\_Rosas\\_Cauca\\_20220124.pdf](https://www2.sgc.gov.co/Noticias/tpaginas/Concepto_Tecnico_SGC_Rosas_Cauca_20220124.pdf)

Servicio Geológico Colombiano. (2017). Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Publicaciones especiales geológicas. Obtenido de:

<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/Clasificacion-MM-Terrenos-Geologicos-Colombia.pdf>

Servicio Geológico Colombiano. (2019). Mapa de Amenazas por Movimientos en Masa 2019.

[mapa]. 1:100.000. Bogotá. Servicio Geológico Colombiano. Obtenido de:  
<https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/Paginas/Imagenes-de-amenazas-.aspx>

Servicio Geológico de los Estados Unidos & Servicio Geológico de Canadá. (2008). Manual de derrumbes: Una Guía para Entender todo sobre los Derrumbes (Vol. Circular 1325).

Servicio Geológico de los EE.UU. Obtenido de:

<https://es.scribd.com/document/287325800/Manual-de-Derrumbes-WEB-DS>

Stoffel, M. Huggel, C. (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments. (vol 36). Progress in Physical Geography.

Sharpe, C. 1938. Landslide and Related Phenomena: Columbia University Press, New York.

Suarez, D. (1998). Deslizamiento y estabilidad de los taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Universidad Industrial de Santander.

Thomas, T. (2008). A historical review on panorama photogrammetry. University of Applied Sciences. July, 2008.