



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO  
OBTENIDOS POR TECNOLOGIA LIDAR CON AERONAVE NO TRIPULADA Y  
POR FOTOGRAMETRIA CON UAV EN ZONA DE MONTAÑA**

**Miryam Paola Avella Rodríguez**

11792115849

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2022



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO  
OBTENIDOS POR TECNOLOGIA LIDAR CON AERONAVE NO TRIPULADA Y  
POR FOTOGRAMETRIA CON UAV EN ZONA DE MONTAÑA**

**Miryam Paola Avella Rodríguez**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Especialista en Sistemas de Información Geográfico**

Director:

Andrés Felipe Carvajal Vanegas, Dr.

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2022

## **Agradecimientos**

A mi familia quienes con su esfuerzo me han permitido estar hoy afrontando este nuevo logro, recordándome que siempre puedo y que a pesar de las dificultades siempre habrá un camino para alcanzar las metas.

A SAR INGENIERIA, empresa donde trabajo en la cual he crecido y he aportado a su crecimiento, a mi jefe que ha sido un apoyo y amigo, a mis compañeros de trabajo quienes hicieron posible toda la recolección de información.

A los profesores quienes brindaron y compartieron su conocimiento, al profesor Andrés por el tiempo dedicado a la revisión y orientación de este documento.

A mis amigos que siempre han tenido una voz de aliento y a todas las personas que de manera directa o indirecta participaron de todo el proceso, no solo del documento si no del posgrado en sí.

A dios y la vida porque ante tantas dificultades presentadas en los últimos años, pude cumplir un objetivo que tenía propuesto.

## 1. CONTENIDO

1.	CONTENIDO .....	5
2.	GLOSARIO .....	11
3.	INTRODUCCIÓN .....	22
4.	OBJETIVOS .....	25
<b>4.1</b>	<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>25</b>
5.	MARCO TEORICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	26
<b>5.1</b>	<b>CONCEPTO DE MODELO DIGITAL DE TERRENO .....</b>	<b>26</b>
<b>5.2</b>	<b>TECNOLOGIA LIDAR DRONE .....</b>	<b>26</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Sensor LIDAR RIEGL Minivux1UAV .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Escaneo a partir de Sensor LIDAR no tripulado .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Generación de MDT LIDAR .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3</b>	<b>FOTOGRAMETRIA A PARTIR DE UAV'S .....</b>	<b>31</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Drone eBee.....</b>	<b>32</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Fotogrametría con drone eBee .....</b>	<b>33</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Generación de MDT drone eBee .....</b>	<b>35</b>
<b>5.4</b>	<b>APLICACIÓN DE MODELO DIGITAL DE TERRENO .....</b>	<b>35</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Apoyo en Análisis estadísticos .....</b>	<b>36</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Minería a cielo abierto .....</b>	<b>36</b>

<b>5.4.3</b>	Cálculo de variables Topográficas.....	37
<b>5.4.4</b>	Modelos Hidrológicos.....	37
<b>5.5</b>	ESTUDIOS A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE TERRENO.....	37
<b>5.6</b>	ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	38
<b>6.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
<b>6.1</b>	LOCALIZACIÓN ÁREAS DE ESTUDIO – MUNIPIO DE YOTOCO .....	42
<b>6.2</b>	ESQUEMA DE TRABAJO .....	44
<b>6.3</b>	DISEÑO DE VUELO .....	45
<b>6.3.1</b>	Diseño de puntos de control (GCP).....	46
<b>6.4</b>	PROCESO DE CAMPO .....	47
<b>6.4.1</b>	Georreferenciación.....	47
<b>6.4.2</b>	Posicionamiento GPS - BASES.....	48
<b>6.4.3</b>	Demarcación y posicionamiento de los Puntos de Control (GCP) - Pre señalización	49
<b>6.4.4</b>	Ejecución de vuelos drone fotogramétrico .....	50
<b>6.4.5</b>	Ejecución vuelo sensor Lidar drone - MiniVUX-1UAV.....	51
<b>6.5</b>	PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS .....	52
<b>6.5.1</b>	Procesamiento de las observaciones GNSS - Apoyos .....	52
<b>6.6</b>	PROCESAMIENTO DE DATOS FOTOGRAMETRICOS .....	52
<b>6.6.1</b>	Procesamiento Digital en software PIX4D.....	52
<b>6.6.2</b>	Procesamiento Inicial.....	54
<b>6.6.3</b>	Densificación Point Cloud.....	55

<b>6.6.4</b>	Filtrado y generación de MDT.....	56
<b>6.7</b>	PROCESAMIENTO DE DATOS LIDAR .....	56
<b>6.7.1</b>	Procesamiento Digital PosPAC 8.3, RiPROCESS 1.85, PIX4D.....	56
<b>6.8</b>	COMPARACIÓN DE SUPERFICIES (MDT FOTOGRAMÉTRICO VS MDT LIDAR)	60
<b>6.8.1</b>	Generación de perfiles comparativos.....	61
<b>6.9</b>	PERFILES COMPARATIVOS .....	62
<b>6.10</b>	COMPARACIÓN DE PRESUPUESTO.....	63
<b>7.</b>	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	64
<b>7.1</b>	RESULTADO DE ÁREAS DE PÉRDIDA DE INFORMACIÓN .....	75
<b>7.2</b>	IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGIA SEGÚN LA ETAPA DE UN PROYECTO	77
<b>8.</b>	INDICADORES .....	79
<b>8.1</b>	EVALUACIÓN DE PRESUPUESTO.....	79
<b>8.2</b>	EFFECTIVIDAD, PRECISIÓN Y EXACTITUD - LIDAR .....	79
<b>8.3</b>	TIEMPOS.....	80
<b>9.</b>	CONCLUSIONES .....	82
<b>10.</b>	RECOMENDACIONES.....	84
<b>11.</b>	REFERENCIAS.....	86

**TABLA DE FIGURAS**

Figura 1: <i>Registro de información Sensor LIDAR RIEGL MinivuxIUAV</i> .....	27
Figura 2: <i>Sensor LIDAR RIEGL MinivuxIUAV</i> .....	28
Figura 3: <i>Movimiento Transversal y Longitudinal Sensor LIDAR RIEGL MinivuxIUAV</i>	30
Figura 4: <i>MDS obtenido a partir del Sensor LIDAR RIEGL MinivuxIUAV</i> .....	31
Figura 5: <i>Captura de fotografía aérea según las líneas de vuelo</i> .....	32
Figura 6: <i>Drone ebee SenseFly</i> .....	33
Figura 7: <i>Pose de la cámara</i> .....	34
Figura 8: <i>RayCloud - Aerotriangulación</i> .....	34
Figura 9: <i>MDS obtenido de Drone eBee</i> .....	35
Figura 10: <i>Localización Departamento Valle del Cauca.</i> .....	42
Figura 11: <i>Localización área de estudio Yotoco</i> .....	43
Figura 12: <i>Flujo de trabajo</i> .....	45
Figura 13: <i>Cambios de altura de las líneas de vuelos proyectadas en el terreno; Esquema típico.</i> .....	46
Figura 14: <i>Diseño de puntos de control.</i> .....	47
Figura 15: <i>Posicionamiento Vértice Base (YOTOCO_1)</i> .....	48
Figura 16: <i>Posicionamiento Vértice Base (YOTOCO_2)</i> .....	49
Figura 17: <i>Marcación y posicionamiento de puntos de control PC en campo. (PC3 – PC4).</i> .....	50
Figura 18: <i>Drone eBee- líneas de vuelo</i> .....	51
Figura 19: <i>Sensor Lidar MiniVUX-IUAV - trayectoria</i> .....	51
Figura 20: <i>Orientación interna, relativa y aerotriangulación</i> .....	54

Figura 21: Modelos Fotogramétricos de procesamiento con imágenes tomadas con drone	
– Pix4D .....	55
Figura 22: MDT obtenido de proceso Fotogramétrico .....	56
Figura 23: Procesamiento trayectoria de vuelo .....	57
Figura 24: Valores RMS .....	58
Figura 25: Nubes de puntos generadas luego del ajuste de la trayectoria y el escaneo Lidar	
- MDS .....	59
Figura 26: MDT Lidar .....	59
Figura 27: MDT Resultante (MDT Lidar – MDT Fotogrametría) .....	60
Figura 28: Perfil sobre MDT Comparativo .....	61
Figura 29: Perfiles sobre MDT LIDAR y MDT DRONE .....	62
<b>Figura 30: ANÁLISIS DE RESULTADOS – PERFIL 1 .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 31: ANÁLISIS DE RESULTADOS – PERFIL 2 .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 32: ANÁLISIS DE RESULTADOS - PERFIL 3 .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 33: ANÁLISIS DE RESULTADOS – PERFIL 4 .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 34: ANÁLISIS DE RESULTADOS – PERFIL 5 .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 35: ANÁLISIS DE RESULTADOS – PERFIL 6 .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 36: ANÁLISIS DE RESULTADOS – PERFIL 7 .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 37: ANÁLISIS DE RESULTADOS – PERFIL 8 .....</b>	<b>72</b>
Figura 38: Graficos de pérdida de información en MDT Fotogramétrico .....	76
Figura 39: Cantidad de área por rango de precisión .....	77
Figura 40: Estimación de tiempos .....	81

## TABLA DE TABLAS

Tabla 1: <i>Parámetros de vuelo</i> .....	46
Tabla 2: <i>Sistema de coordenadas empleado</i> .....	48
Tabla 3: <i>Características de entrada Pix4D</i> .....	52
Tabla 4: <i>Características de procesamiento Pix4D</i> .....	53
Tabla 5: <i>Características de Editor de nubes de puntos Pix4D</i> .....	53
Tabla 6: <i>Implementación de tecnología según la etapa de un proyecto.</i> .....	78
Tabla 7: <i>Evaluación de presupuesto</i> .....	79

## 2. GLOSARIO

**Altimetría:** La altimetría la constituyen los métodos que proyectan los puntos, sobre la superficie terrestre, en el plano vertical, mediante un proceso conocido como nivelación y que básicamente sirve para determinar las diferencias de elevación (distancia vertical) entre los puntos de la tierra. (Mejía et al. 2007)

**Atributos Puntos LIDAR:** La información adicional se almacena junto con cada valor posicional x, y, y z. Los siguientes atributos del punto lidar se mantienen para cada pulso láser registrado: intensidad, número de devolución, cantidad de devoluciones, valores de clasificación de punto, puntos que están en el borde de la línea de vuelo, valores RGB (rojo, verde y azul), tiempo del GPS, ángulo de escaneo y dirección de escaneo. (ESRI, 2019)

**BIM:**(Building Information Modeling) es una metodología de trabajo colaborativa. Basada en procesos de gestión de información mediante el uso de modelos digitales 3D. Da herramientas para optimizar las etapas del ciclo de vida de los proyectos de edificaciones e infraestructura. (CEMEX, 2020)

**Correlación Digital de Imágenes:** La correlación es un proceso o técnica automática mediante el cual se establece la correspondencia de un elemento en dos o más fotografías, para ello se requiere que haya traslape entre ellas. La correlación, conocida también como Image Matching es de suma importancia al permitir en fotogrametría digital la medición de puntos en: la orientación interna, relativa, procesos de aerotriangulación y captura de información para la elaboración de modelos digitales de terreno (DTM). En esencia, esta técnica explica el proceso de identificación automática de los puntos homólogos en imágenes digitales. (GEOMATICA, 2015).

Entre mayor sea el número de imágenes correlacionadas, la probabilidad de errores en la modelación se reduce considerablemente y viceversa.

**Drone:** Los drones son Aeronaves no tripuladas que se controlan de forma remota y pueden ser utilizados para realizar o llevar a cabo diferentes tipos de misiones y tareas. Los drones pueden ser manejados de diferentes formas: Manual, Semiautomático, Automático y Autónomo. (Conde, 2021). En el mercado se encuentran de ala fija tipo avión, de rotor o multirrotor tipo helicóptero.

**Elevación:** Distancia vertical entre un punto o nivel en la superficie de la tierra, o unido a ella, y el nivel del mar. Con estas definiciones podemos observar que un objeto fijo en la superficie del terreno, o el terreno mismo, tienen siempre Elevación respecto al nivel del mar, y ese es su único punto de referencia. (JSAIZ, 2019)

**Error Medio Cuadrático (EMC):** Si consideramos una serie de errores reales respecto del valor real o exacto de la magnitud que medimos (y que nunca conoceremos= se define como error medio cuadrático a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los residuos dividido por el número de éstos. (PEÑA & SANS, 2005)

**Estación de control (Estación base):** Estación de posición conocida con precisión, donde se ubica un equipo receptor, que da el control a las unidades establecidas en estaciones remotas, de la cual se derivan todas las demás posiciones desconocidas. (Glosarios.servidor-alicante, 2018)

**Estación Digital de Trabajo:** La estación de trabajo, es un ordenador de alto rendimiento con un procesador más potente, más memoria y capacidades mejoradas para desarrollar tareas precisas como: diseño gráfico, edición de videos, ingeniería, ciencia y programación de juegos.

También conocido como workstation, este equipo realiza múltiples tareas de forma simultánea y ha desarrollado un excelente software que ayuda a cumplirlas con una exactitud impresionante. (Suarez, 2018)

**Fotografía Aérea:** Fotografía de una parte de la superficie terrestre realizada por la técnica de la fotografía aérea con el objetivo de obtener información o medidas de las entidades geográficas, para finalidades cartográficas y análisis de medida. (ICGC, 2020). Según la relación entre la estación de cámara y la escena, la fotografía aérea puede ser vertical, oblicua u horizontal. La separación entre cada fotografía consecutiva depende del traslapo longitudinal empleado, la separación entre fotografías adyacentes depende del traslapo transversal del vuelo y la cobertura de cada imagen sobre el terreno está relacionada con la altura de vuelo sobre este.

**GLONASS (Global Navigation Satellite System):** (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema - Sistema de navegación global por satélite) son las siglas del GNSS creado por Rusia para la localización geográfica sobre la superficie terrestre. Se trata de una de las alternativas al sistema GPS de Estados Unidos. (ARISTA SUR, 2019)

**GNSS (Sistema de Posicionamiento Global):** Se define como GNSS (Global Navigation Satellite System). Se denomina así, de forma genérica a los Sistemas de Navegación por Satélite que proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global, tanto de forma autónoma, como con sistemas de aumentación. El primer sistema operativo fue el sistema GPS, gestionado por el ejército de los Estados Unidos por ello, a pesar de desarrollarse otros sistemas, en la cultura social es un término tan extendido que se confunde con el término GNSS, que engloba además del GPS a otros sistemas de navegación por satélite como son GLONASS, GALILEO o BEIDOU. (Villen, 2014)

**GPS:** El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de radionavegación de los Estados Unidos de América, basado en el espacio, que proporciona servicios fiables de posicionamiento, navegación, y cronometría gratuita e ininterrumpidamente a usuarios civiles en todo el mundo. (Space-Based positioning Navigation & Timing, s.f.)

**IMU:** Una **unidad de medición inercial** o **IMU** (del inglés inertial measurement unit), es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos. Las unidades de medición inercial son normalmente usadas para maniobrar aviones, incluyendo vehículos aéreos no tripulados, entre muchos otros usos. (Wikipedia, 2021). El IMU permite obtener la magnitud los giros del drone sobre cada uno de los ejes coordenados (XYZ) en el instante de toma de cada fotografía aérea. Estos giros se conocen como Phi, Kappa y Omega.

**INS:** (Sistema de Navegación por Inercia). Un sistema INS mide la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema lidar. (ESRI, 2019)

**LIDAR:** El LIDAR (de light detection and ranging) es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de X, Y, Z. LIDAR, que se utiliza principalmente en aplicaciones de representación cartográfica láser aéreas. LIDAR es un sensor óptico activo que transmite rayos láser hacia un objetivo mientras se mueve a través de rutas de topografía específicas. El reflejo del láser del objetivo lo detectan y analizan los receptores en el sensor lidar. Estos receptores registran el tiempo preciso desde que el pulso láser dejó el sistema hasta cuando regresó para calcular la distancia límite entre el sensor y el objetivo. Combinado con la información posicional (GPS e INS), estas medidas de distancia se transforman en medidas de puntos tridimensionales reales del objetivo reflector en el espacio del objeto. (ESRI, 2019)

**LIDAR Aéreo:** Con LIDAR Aerotransportado, el sistema se instala en un helicóptero, avión o drone. La luz de láser infrarrojo se emite hacia el suelo y es devuelta al sensor LIDAR aerotransportado en movimiento. Hay dos tipos de sensores aerotransportados: topográficos y batimétricos. (ESRI, 2019)

**LIDAR Terrestre:** El LIDAR terrestre recopila puntos muy densos y altamente exactos, que permiten la identificación precisa de los objetos. Estas nubes de punto densas se pueden utilizar para administrar instalaciones, realizar relevamientos topográficos de carreteras y vías férreas, e incluso crear modelos de ciudades en 3D para espacios en el exterior y en el interior, para mencionar algunos ejemplos. Hay dos tipos principales, móviles y estáticos. (ESRI, 2019)

**Línea de vuelo:** Las líneas de vuelo son las trayectorias que recorre un dron y sobre las cuales se realizan las tomas de fotografías aéreas. Son líneas previamente diseñadas y establecidas sobre un software específico. (Rodriguez, 2021)

**Medición cinemática:** Forma de medición diferencial continua con fase portadora, que requiere de períodos cortos de observación. Las restricciones operacionales incluyen el inicio o determinación de una línea base y rastrear un mínimo de cuatro satélites en forma continua. Un receptor se ubica estático en un punto de control, mientras otros receptores se desplazan por los puntos a medir. (Glosarios.servidor-alicante, 2018)

**Minivux-1UAV:** El RIEGL miniVUX-1UAV es un escáner láser aerotransportado extremadamente liviano, diseñado específicamente para la integración con UAS / UAV / RPAS. (RIEGL, 2021)

**Modelo Digital de Elevación (MDE):** Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. (Inegi.org.mx)

**Modelo Digital de Superficie (MDS):** Un modelo digital de superficies (MDS) representa todos y cada uno de los elementos del terreno. El suelo, los árboles, las construcciones, etc... Es decir, el MDS nos da las cotas de cada elemento. (Inegi.org.mx)

**Modelo Digital de Terreno (MDT):** En este caso, se trata de un modelo digital donde solo nos quedamos con la **capa suelo, eliminando todos los elementos de vegetación (árboles) y estructurales (construcciones)** del territorio. Así tenemos una imagen limpia de todo nuestro terreno. (IDS, 2020). Contiene información acerca de la posición (x, y) y la altitud (z) de la superficie.

**Nube de Puntos LIDAR:** son grandes colecciones de puntos de elevación 3D, que incluyen X, Y, Z junto con atributos adicionales como marcas de tiempo GPS. (ESRI, 2019)

**Ortofoto:** Fotografía con escala constante y propiedades de una proyección ortogonal, formada a partir de una fotografía en proyección central mediante rectificación diferencial. En una ortofotografía los objetos ocupan sus posiciones horizontales reales. Si la rectificación ha sido analógica no se ha corregido el desplazamiento de las superficies verticales. (ICGC, 2020)

**Partes Por Millón (ppm):** Las partes por millón en topografía es una medida del cambio o de la incertidumbre de las mediciones. El valor dado es de más de un millón. En la estructura de la parcela, el valor de PPM es una indicación de la exactitud. Para un nivel 1 de exactitud en la tabla anterior, 5 PPM significa una exactitud de 5 milímetros en un kilómetro (1 kilómetro = 1.000.000 milímetros). (ArcGIS for Desktop, 2016)

**Precisión:** Es el valor más pequeño de una magnitud que se puede medir con exactitud por medio de un instrumento de medida. (FisicaLab, 2021)

**PITOT:** Dispositivo que está diseñado para proporcionar mediciones de presión dinámica y estática en un solo paquete. (AeroEXPO, 2021). El viento es uno de los principales factores de degradación de la calidad y rendimiento cuando se usa la tecnología drone.

**Puntos de Control (GCP):** Los puntos de control (ground control points, GCP en inglés) son puntos de referencia que: Se colocan físicamente en el entorno, se fotografían desde el aire y se establecen sus coordenadas geográficas con precisión. (Rodríguez, 2021)

Es decir, el piloto tiene que colocar por cada punto de control una referencia visual (un objeto, una marca de pintura en el suelo, una diana impresa). Estos objetos deben ser claramente visibles desde el aire, e idealmente, localizables en varias fotos. Esta etapa forma parte y hay que tenerla en cuenta en la planificación de vuelo. (Aerial-insights, 2019)

**Posicionamiento:** Acción mediante el cual se determina las coordenadas geográficas, producida por un receptor GPS-GNSS en modo individual. (Rodríguez, 2021)

**Receptor GPS-GNSS:** Un receptor GPS de alta precisión calcula de forma exacta las ubicaciones geográficas utilizando la información de los satélites de GPS. La precisión de estos receptores va de distancias inferiores al metro hasta centímetros, dependiendo de su capacidad de rastrear y procesar las señales de satélite. (Collector for ArcGIS, 2018)

**Red Geodésica:** Conjunto de puntos (estaciones) de monitoreo continuo de datos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), distribuidas estratégicamente en un territorio, en los cuales se determinan su posición geográfica (latitud, longitud y elevación). (IDECA, 2018)

**Retornos:** Retorno o devolución es un pulso láser emitido que puede tener hasta cinco devoluciones dependiendo de las entidades en las que se refleja y las capacidades del escáner láser que se utiliza para recopilar los datos. La primera devolución se etiquetará como devolución número uno, la segunda como devolución número dos, etc. (ESRI, 2019)

**RGB:** Es una sigla formada por los términos de la lengua inglesa red (“rojo”), green (“verde”) y blue (“azul”). El concepto suele emplearse para referirse a un modelo cromático que

consiste en representar distintos colores a partir de la mezcla de estos tres colores primarios. (Definicion.de, 2021)

**Sistemas de Información Geográfica:** Los SIG son una colección de información geográfica organizada de hardware y software, que nos permite capturar, almacenar, manipular y analizar información geográfica con el fin de solucionar problemas complejos de planificación y gestión. (Alvarez, 2008)

**Software Fotogramétrico:** Son algoritmos diseñados para la correlación de imágenes digitales. Sus funciones básicas corresponden a la fotogrametría convencional para realizar la orientación interna y relativa como primer paso (gracias a la posición y giros etiquetados en cada fotografía); orientación absoluta y densificación del cloud como segundo paso y finalmente; generación de orto mosaico y curvas de nivel en un tercer paso.

**Traslapo:** Denominamos traslape, a la superposición parcial de las fotografías tomadas por el Drone, en la realización de un levantamiento fotogramétrico. (Coatza Drone, 2019). Existen dos tipos de traslapos en fotogrametría, el traslape longitudinal que es el área común entre dos fotografías consecutivas y el traslape transversal que es el área común entre dos líneas de vuelo adyacentes.

**Triangulación:** tiene como principal objetivo la extensión del control terrestre a través de franjas o de bloques de fotos. Este tipo de triangulación se utilizará en operaciones fotogramétricas de restitución. (Globla, s.f.)

**Retornos:** Retornos o Devoluciones don los pulsos láser emitidos desde un sistema lidar se reflejan desde objetos sobre y por encima de la superficie del suelo: vegetación, edificios, puentes y así sucesivamente. Un pulso láser emitido puede regresar al sensor lidar como uno o muchas devoluciones. Cualquier pulso láser emitido que encuentre varias superficies de reflejo a

medida que viaja hacia el suelo se divide en tantas devoluciones como superficies reflectoras existen.

**RTK:** Las siglas RTK tienen su significado del inglés "**Real-Time Kinematic**". Es un sistema de posicionamiento y navegación que ofrece precisión centimétrica a la aeronave, entre otros beneficios. (DJI ENTERPRISE, 2019)

## Resumen

El actual informe expone las diferencias significativas que se obtienen a la hora de comparar un Modelo Digital de Terreno obtenido a partir de un Sensor LIDAR transportado por una aeronave no tripulada y un Modelo Digital de Terreno obtenido a partir de Fotogrametría por UAV. Si bien las tecnologías que se exponen son similares, no arrojan los mismos resultados en obtención de MDT. Se realiza una comparación de MDT en un área rural que presenta condiciones topográficas montañosas, con presencia de bosque, con la finalidad de exponer las ventajas y desventajas de cada una y sugerir algunas prácticas de implementación de las mismas.

Para identificar las diferencias que se obtiene entre los modelos de terreno, se genera un modelo de comparación de terreno donde se evidencian las áreas donde la información discrepa entre un modelo y otro, a estas áreas se les denominó (áreas de falta de información).

Se trazan ocho perfiles en las zonas de mayor cambio, con el fin de evidenciar los resultados obtenidos entre un MDT Lidar y MDT fotogramétrico.

Luego de realizadas las comparaciones se evidencia que la información que arroja la información Lidar es precisa, confiable y contundente a la hora de representar el terreno.

El MDT obtenido por procesos fotogramétricos muestra un 33% de áreas de pérdida de información, lo cual hace que su información no sea confiable por si sola y requiera de procesos topográficos convencionales que la complementen.

Es así como se determina que la tecnología Lidar permite obtener muy buenos resultados de altísima calidad, en menor tiempo, a mayor costo, pero que finalmente se ve reflejado en la calidad de la información y sin requerir de procesos adicionales o complementarios.

## Abstract

The current document exposes the significant differences obtained when comparing a Digital Terrain Model obtained from a LIDAR Sensor carried by an unmanned aircraft and a Digital Terrain Model obtained from UAV Photogrammetry. Although the technologies that are exposed are similar, they do not yield the same results in a product DTM. A comparison of DTM is made in a rural area that presents mountainous topographic conditions, with the presence of forest and the second study area is an urban space corresponding to a main road located in the city of Bogotá, it is characterized by the great level of detail that surrounds it, for expose the advantages and disadvantages of each one and suggest some fields of implementation of the same.

To identify the differences obtained between the terrain models, a terrain comparison model is generated where the areas where the information differs between one model and another are evidenced, these areas were called (areas of lack of information).

Eight profiles are drawn in the areas of greatest change, in order to demonstrate the results obtained between a Lidar DTM and a photogrammetric DTM.

After making the comparisons, it is evident that the information provided by the Lidar information is accurate, reliable and forceful when it comes to representing the terrain.

The DTM obtained by photogrammetric processes shows 33% areas of information loss, which makes your information unreliable by itself and requires conventional topographic processes to complement it.

This is how it is determined that Lidar technology allows obtaining very good results of the highest quality, in less time, at a higher cost, but that it is finally reflected in the quality of the information and without requiring additional or complementary processes.

### 3. INTRODUCCIÓN

Actualmente los Modelos digitales de terreno (MDT) son la base fundamental para el diseño de un proyecto, la ejecución del mismo y la verificación de los trabajos realizados, que son las etapas de prefactibilidad, factibilidad, entregas de planos record e ingeniería de detalle hablando de proyectos de índole constructivo.

La tecnología y su rápida evolución permiten obtener MDT confiables que reflejen el estado actual y real del terreno. Hoy por hoy se recurre a la implementación de aeronaves no tripuladas para la obtención de dicha información. En el mercado se encuentra desde hace algunos años la realización de procesos fotogramétricos con Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) y más recientemente la implementación de Sensor LIDAR transportado por una aeronave no tripulada.

La constante evolución en los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) junto con nuevos software de procesamiento de información, permite la obtención de múltiples insumos de gran precisión que se emplean en diversas áreas del conocimiento.

Hoy día los Modelos Digitales de Terreno obtenidos a partir de información capturada por medio de Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV), es la manera más fácil de obtener un modelo del terreno casi que en tiempo real, sin embargo la falta de definición en algunos MDT hace que no se cuente con la información real o completa sobre una superficie, ello hace que los estudios o modelamientos que se realicen sobre la información arrojen resultados que son poco confiables.

La pérdida de información en un MDT incide directamente en los costos, tiempo de ejecución, precisión de la información y recursos a emplear que se proyectan para el estudio o ejecución de un proyecto.

Es común encontrar diversos proyectos que emplean MDT generado a partir de Fotogrametría con UAV, dado que el procesamiento de la información es basado en las fotografías, se pierde detalle en algunos segmentos del modelo. Para que estos modelos sean óptimos es necesario combinarlo con prácticas convencionales como levantamientos topográficos en campo de aquellas zonas que se encuentran cubiertas por superficies que reflejan una altura considerable con respecto al terreno.

Por otro lado la información obtenida con Sensor LIDAR a bordo de aeronave no tripulada, presenta un reflejo real de la superficie del terreno gracias al principio de haz de luz emitido hacia el suelo y a los cinco retornos con los que cuenta. Es una tecnología comúnmente conocida sobre aeronaves tripuladas que realiza vuelos a gran altura, haciendo que el nivel de detalle en la captura de información sea menor. La ventaja de contar con un sensor LIDAR soportado sobre un UAV es la confiabilidad en la información obtenida para generación de MDT, empleando los modelos en proyectos de ingeniería de detalle.

Actualmente es poca la información que se encuentra sobre MDT generados a partir de Sensor LIDAR a bordo de aeronave no tripulada, es importante dejar el precedente de los beneficios que se obtienen al emplear esta tecnología.

En el presente documento se realiza una comparación de dos superficies obtenidas a partir de dos metodologías diferentes, una base de estudio es un MDT generado con información obtenida por Sensor LIDAR DRONE versus MDT generado a partir de información adquirida por Fotogrametría con (UAV); de allí se deriva la importancia de la escogencia de cada una de las metodologías en función de la finalidad, precisión requerida, confiabilidad de la información y el porcentaje datos obtenidos por cada uno de los dos procesos.

La captura de información se realiza con equipos que están debidamente avalados y registrados ante la aeronáutica civil, el personal que hizo posible el desarrollo de los vuelos también se encuentra certificado e inscrito ante la aeronáutica civil.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar comparativamente Modelos Digitales de Terreno (MDT) obtenidos por Sensor LIDAR con aeronave no tripulada y Fotogrametría (UAV), para un área definida en el Municipio de Yotoco, departamento del Valle del Cauca Colombia.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Generar MDT para un área definida en el Municipio de Yotoco a partir de información obtenida por Sensor LIDAR con aeronave no tripulada y Fotogrametría con UAV.
- Analizar espacialmente la confiabilidad y pérdida de información capturada por cada una de las metodologías LIDAR con aeronave no tripulada y Fotogrametría con (UAV).
- Comparar por medio de perfiles el comportamiento del MDT Lidar versus MDT fotogramétrico, en zonas de bosque alto y denso.
- Proponer los posibles usos de cada tecnología según las etapas de un proyecto.

## **5. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

### **5.1 CONCEPTO DE MODELO DIGITAL DE TERRENO**

En el devenir de la ciencia, las técnicas topográficas y cartográficas han estado tradicionalmente ligadas al estudio y representación del terreno, en cualquiera de sus estados o situaciones, obteniéndose resultados digitales en dos o tres dimensiones. Estas técnicas han ido variando poco a poco su concepción primaria monotemática hacia una situación más generalista y multidisciplinar, convirtiéndose en apoyo o soporte para otras ciencias. (Mercedes Farjas, 2011)

Un modelo digital del terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. (Felicísimo, 2019)

El Modelo Digital de Terreno MDT al ser digital responde a una conformación de codificación en cifras, por ende permite un tratamiento de datos de manera informática, toma forma de estructura de datos, representa una distribución espacial, incorpora variables cuantitativas y de distribución continua.

### **5.2 TECNOLOGIA LIDAR DRONE**

LIDAR (Ligth Amplification by Stimulated Emission of Radiation) acrónimo en inglés y se traduce como Amplificación de la Luz por Emisión Inducida de Radiación. LIDAR ha sido el término empleado para referirse a la información obtenida por medio de registros laser.

La tecnología LIDAR permite capturar información de altísima resolución en valores (X, Y y Z) de cualquier elemento tridimensional, almacenando la información generalmente en nubes de puntos de alta densidad y precisión. Sobre las nubes de puntos obtenidas se pueden realizar procesos como es el caso de la obtención de secciones transversales, perfiles, cálculos métricos,

modelos digitales de terreno (MDT), modelos digitales de elevación (MDE), modelos digitales de superficie (MDS), modelos BIM entre muchas aplicaciones en diferentes campos.

**Figura 1:** Registro de información Sensor LIDAR RIEGL Minivux1UAV



Figura de elaboración propia, 2021.

Consiste en un sistema activo de teledetección que utiliza su propia fuente de energía láser, por medio de mediciones de intervalos de tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso laser y la recepción del retorno el sensor LIDAR.

### 5.2.1 Sensor LIDAR RIEGL Minivux1UAV

RIEGL es una compañía dedicada a la investigación, producción, diseño y desarrollo de telémetros y medidores de distancia laser, con más de 40 años de experiencia.

El sensor RIEGL miniVUX-1UAV es un escáner láser aerotransportado extremadamente liviano, diseñado específicamente para la integración con UAS / UAV / RPAS.

**Figura 2:** *Sensor LIDAR RIEGL Minivux1UAV*



Figura de elaboración propia, 2021.

Cuenta con un campo de visión de 360 ° permitiendo la adquisición completa del entorno.

El sensor RIEGL miniVUX-1UAV es capaz de realizar hasta 100.000 mediciones por segundo y hasta 100 exploraciones por segundo. Posee tecnología Waveform-LiDAR exclusiva de la compañía RIEGL, permite la digitalización del eco y el procesamiento de formas de onda en línea, con resolución de múltiples objetivos reconociendo información incluso en el follaje denso. Es un sensor que cuenta con cinco retornos.

El miniVUX-1UAV proporciona interfaces mecánicas y eléctricas para la integración de IMU externas. Los datos de escaneo pueden almacenarse en una tarjeta SD de fácil acceso o transmitirse a través de LAN-TCP / IP. (RIEGL, 2021)

Dentro de las características principales se tiene: (RIEGL, 2020)

- Hasta 100.000 mediciones / segundo
- 100 kHz Laser PRR
- Rango hasta 330m @ reflectividad  $\geq 80\%$
- Láser Clase 1

- Muy compacto y bajo peso 1.55 kg
- FOV 360°
- Carcaza de aluminio robusta, listo para montar sobre un multirroto
- Capacidad de múltiples retornos hasta 5 retornos por cada pulso
- Precisión 10mm
- IP 64
- Integración con DJI M600
- Integración IMU/GNSS Applanix

### *5.2.2 Escaneo a partir de Sensor LIDAR no tripulado*

Normalmente se emplean los sistemas LIDAR a bordo de aeronaves tripuladas, actualmente la tecnología ha permitido contar con sensores livianos a bordo de un dron, lo cual hace que sea un sistema rentable proporcionando datos espaciales muy confiables, en base a nube de puntos.

El escáner láser LIDAR funciona de forma aerotransportada por un UAV, realiza dos movimientos uno transversal y uno longitudinal. El movimiento transversal lo realiza el espejo quien a su vez realiza un giro de 360°, el espejo es el encargado de reflejar la luz que llega desde el láser, el movimiento longitudinal corresponde a la trayectoria del dron o UAV.

Para realizar las mediciones, requiere un sistema GPS GNSS - RTK, una Unidad de Medición Inercial (IMU) y el sensor láser.

De un vuelo con sistema LIDAR dron se obtiene una nube detallada del terreno conocida como MDS. La ventaja al emplear esta tecnología es que se tiene gran precisión tanto en posición como en elevación, gracias a la altura que alcanza permite tener cobertura sobre grandes extensiones de terreno y resultados a escala de detalle.

**Figura 3:** *Movimiento Transversal y Longitudinal Sensor LIDAR RIEGL Minivux1UAV*

MOVIMIENTO TRANSVERSAL

MOVIMIENTO LONGITUDINAL



Figura de elaboración propia, 2021.

### 5.2.3 *Generación de MDT LIDAR*

El modelo digital terreno (MDT) recrea la forma de la superficie terrestre una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno.

El MDT que se crea a partir de información LIDAR no tripulado, se realiza por medio de algoritmos aplicados a la información obtenida donde se tiene mayormente en cuenta el último retorno de la nube de puntos (.las), encargada de definir la superficie o ground que es como se conoce en los programas de filtrado.

Con ayuda de diversos programas se realiza el proceso de clasificación de nube de puntos LIDAR por retornos. Para la generación del MDT se tiene en cuenta el último retorno capturado dentro de la información laser, para este caso es el quinto retorno el que se asume como ground. Se debe realizar un proceso de verificación y refinado de los puntos para eliminar aquellos que se comportan como ruido.

**Figura 4:** MDS obtenido a partir del Sensor LIDAR RIEGL Minivux1UAV

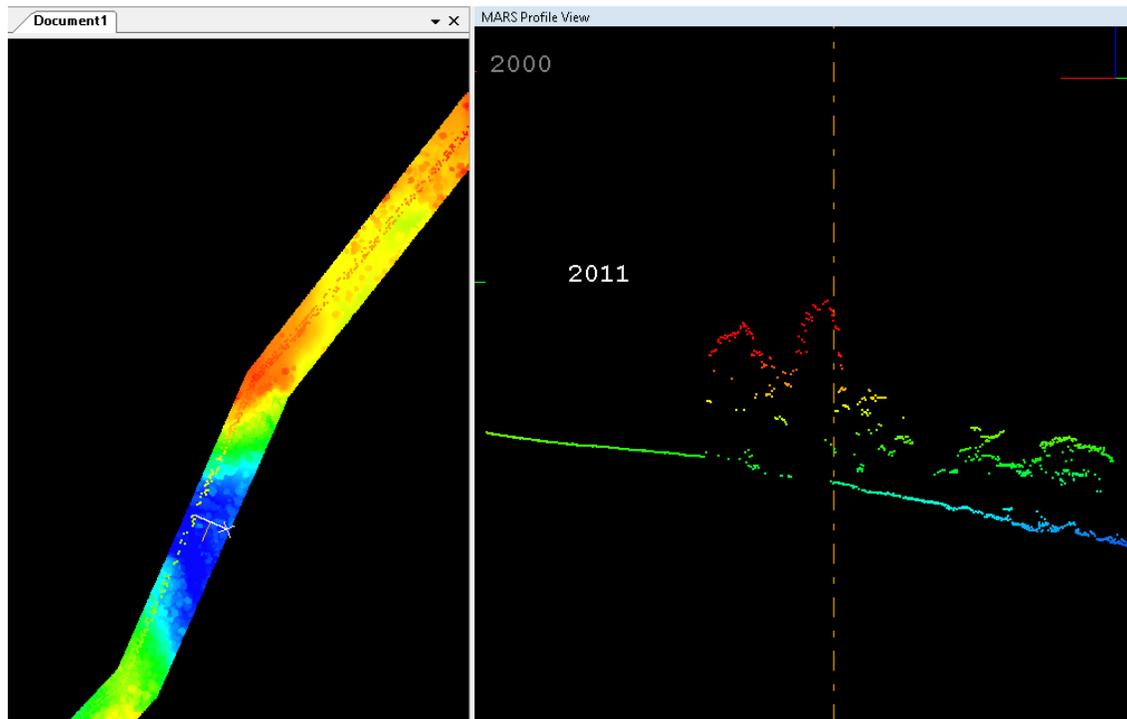


Figura de elaboración propia, 2021.

### 5.3 FOTOGRAMETRIA A PARTIR DE UAV'S

La fotogrametría es la ciencia o técnica cuyo objetivo es el conocimiento de las dimensiones y posición de objetos en el espacio, a través de la medida o medidas realizadas a partir de la intersección de dos o más fotografías, o de una fotografía y el modelo digital del terreno correspondiente al lugar representado, el cual ha de ser realizado anteriormente por intersección de dos o más fotografías. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018)

La fotogrametría es una técnica que consiste en reconstruir terrenos a partir de imágenes aéreas. Permite a partir de información en 2D como lo es una imagen aérea, obtener un resultado en 3D como lo es la representación de una superficie o MDT.

Dentro del diseño del vuelo se establecen una serie de parámetros fundamentales para la ejecución del mismo. Se debe determinar la altura de vuelo, el área de interés, las líneas de vuelo, puntos de lanzamiento y aterrizaje y por supuesto los valores de porcentaje de traslapes que se deben presentar entre las imágenes, tanto de maneta longitudinal como transversal.

El solapamiento o traslape entre imágenes consecutivas y obtener gran cantidad de fotografías aéreas, hacen posible la reconstrucción de un objeto tridimensional.

Se requiere de un software especializado para generar el proceso de correlación de imágenes y posteriormente la generación de MDS, MDT, Orto mosaico o cualquier salida que se quiera obtener a partir del proceso fotogramétrico.

**Figura 5:** *Captura de fotografía aérea según las líneas de vuelo*

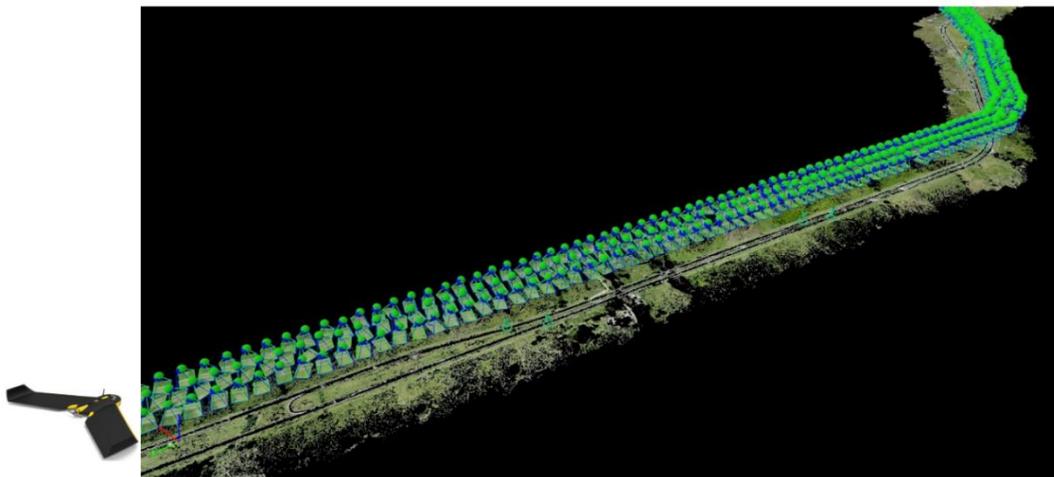


Figura de elaboración propia, 2021.

### 5.3.1 *Drone eBee*

El drone despegue, vuela y aterriza de forma autónoma. La inteligencia artificial incorporada en el Piloto Automático, analiza continuamente los datos de la Unidad de Medición Inercial, el GPS a bordo se encarga de todos los aspectos de la misión de vuelo. El sensor de tierra del drone está compuesto de un sensor óptico de alta velocidad y un lente que permite estimar la distancia al

suelo con alta precisión. Este sensor ayuda al dron a aterrizar suavemente, usando un procedimiento de aterrizaje lineal autónomo dentro de una gran variedad de terrenos y con una alta precisión, en base al GPS que lleva el dron. (Sensefly, 2021)

Tiene la capacidad de volar a gran altitud, se comporta de modo fiable y estable en condiciones de viento adversas, no requiere de ningún tipo de equipamiento adicional para el despegue o aterrizaje. Tiene incorporada una cámara fotogramétrica SenseFly S.O.D.A., captura imágenes RGB que garantiza la calidad y nitidez en la obtención de Orto mosaicos.

**Figura 6:** *Dron ebee SenseFly*



Figura de SenseFly, 2017.

### **5.3.2** *Fotogrametría con dron eBee*

El principio de la fotogrametría consiste en que un detalle en el suelo queda capturado en varias fotografías, a cada fotografía capturada se le asigna una coordenada geográfica navegada donde se registra Latitud, Longitud y Elevación. Esta posición corresponde al nombre de geotiqueta, es la que permite ubicar la fotografía a la hora de correlacionar las imágenes.

Para lograr el modelo estereoscópico, las fotografías deben volver a la posición y orientación del momento de su captura. Esto se conoce como pose de la cámara y está dada por 6 parámetros: 3 coordenadas y 3 orientaciones dispuestas en el espacio tridimensional.

**Figura 7:** Pose de la cámara

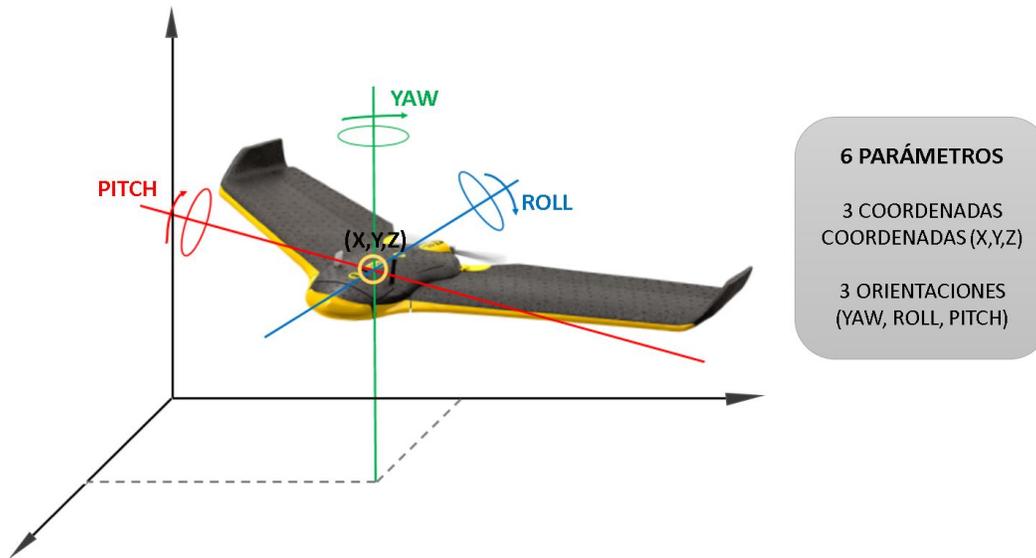


Figura de elaboración propia, 2021.

El proceso de aerotriangulación se realiza por medio de algoritmos de reconocimiento de imágenes, donde se identifica uno o varios puntos en común en diferentes fotografías realizando la orientación de las mismas y un ajuste por mínimos cuadrados. Para realizar un ajuste total del modelo es importante realizar una referencia directa con ayuda de puntos de control.

**Figura 8:** RayCloud - Aerotriangulación

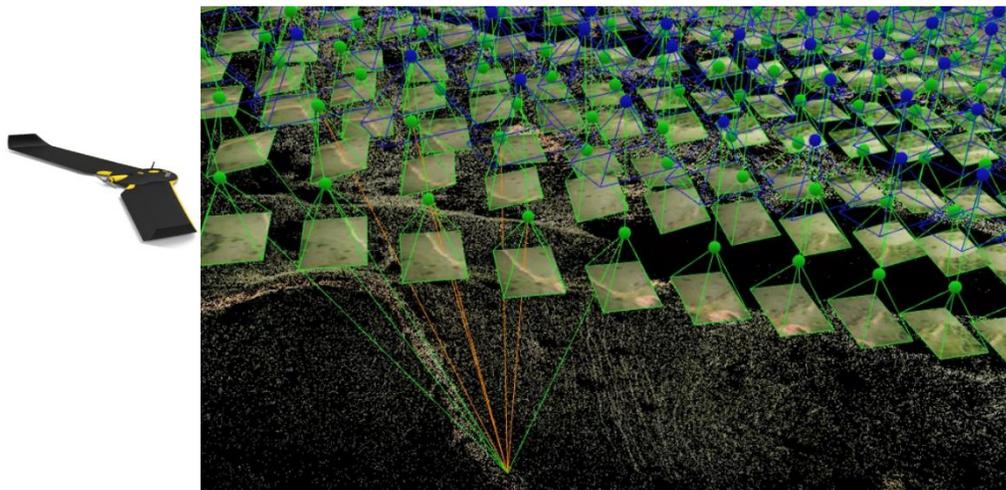


Figura de elaboración propia, 2021.

### 5.3.3 Generación de MDT drone eBee

La creación de MDT se obtiene a partir de un filtrado de puntos, donde se remueven todos aquellos elementos que se encuentran por encima o por debajo del terreno. Es común que fenómenos como sombras o reverberación en la superficie asfáltica, generen pixeles por encima o por debajo de la superficie a modo de error, estos también deben ser removidos para no afectar el MDT.

**Figura 9:** MDS obtenido de Drone eBee

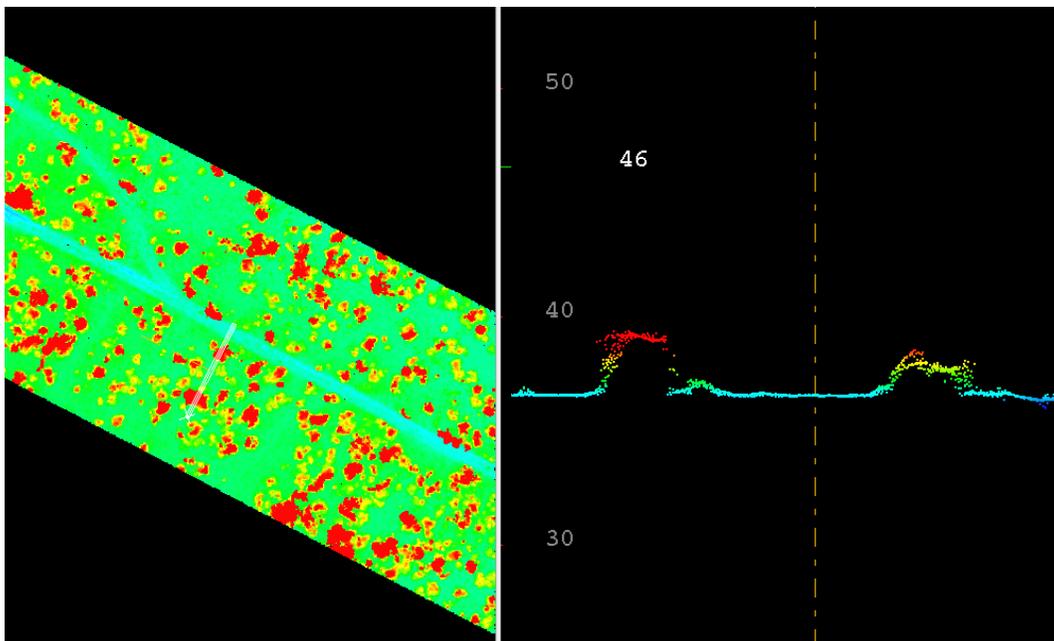


Figura de elaboración propia, 2021.

## 5.4 APLICACIÓN DE MODELO DIGITAL DE TERRENO

Son múltiples las aplicaciones que se le pueden brindar a los MDT, algunas de ellas se mencionan a continuación.

#### **5.4.1** *Apoyo en Análisis estadísticos*

Las variables incluidas en un MDT son factores de gran importancia en un gran número de procesos ambientales (precipitación, insolación-temperatura, flujos hídricos, erosión, distribución de hábitats, etc.) por tanto van a ser un elemento clave a la hora de estimar otras variables mediante procedimientos de interpolación global por regresión. (Geograf, 2006)

#### **5.4.2** *Minería a cielo abierto*

La obtención de MDT por medio de sensores y aeronaves no tripuladas, brinda la facilidad de cubrir grandes extensiones de terreno en poco tiempo, es una tecnología no intrusiva amigable con el medio ambiente, no requiere de accesos terrestres exponiendo personal para la captura de datos y lo más importante, es un reflejo fiel del terreno que se obtiene en muy corto tiempo.

Algunas de las aplicaciones mineras de los MDT se dan en la prospección y explotación de recursos minerales, actualizaciones topográficas para el cálculo de reservas de mineral, diseño y planeación para tareas de explotación.

En un levantamiento realizado por drones, el procedimiento es más simplificado. Se marcarán puntos de control para ayudarnos a orientar nuestro modelo digital de superficie a un sistema de coordenadas que nos permita alcanzar su correcta georreferenciación, seguidamente se ejecutará el vuelo. (Perez Cruz, 2019)

Este resultado final se basará en la optimización del sistema, busca resultados de calidad, pero con el requerimiento adicional de minimizar tiempo y esfuerzo que supondrá una reducción de costes también. (Perez Cruz, 2019)

### **5.4.3** *Cálculo de variables Topográficas*

A partir de los MDT se pueden realizar procesos como: Generación de curvas e nivel, trazados viales, creación de perfiles topográficos, secciones transversales, cálculo de volúmenes, estimación de cantidades de corte y relleno.

Vinculado a los procesos anteriores se obtienen los mismos como insumos, que son la base de estudio y soporte para el desarrollo de actividades por parte de otros profesionales mayormente en proyectos de obras de ingeniería de precisión.

### **5.4.4** *Modelos Hidrológicos*

Se emplea en procesos de simulación donde se pueden acelerar o ralentizar procesos y realizar repeticiones cuantas veces sea necesario. El MDT contiene características topográficas de una ladera que permiten ser la primera aproximación a la red de drenaje superficial y por extensión de la cuenca. (Alonso, 2006)

Algunos de los parámetros que se pueden simular son el Caudal Máximo Potencial CMP, la línea de flujo y el área Subsidiaria, de allí se realizan análisis y proyecciones multitemporales.

## **5.5 ESTUDIOS A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE TERRENO**

Se listan algunos títulos de proyectos en los que el MDT ha sido protagonista en el desarrollo de estudios académicos.

- Uso de Modelos Digitales en el Estudio de Cambios Ambientales en Antártida
- Aplicación del modelo digital del terreno en la erosión hídrica (Potrero B).
- Evaluación geomorfológica estructural a través de modelos sombreados y pares estereoscópicos generados a partir de modelos digitales de terreno.

- Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno.
- Extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de terreno.

## **5.6 ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

En Latinoamérica Colombia y Chile se catalogan como los países pioneros en uso e implementación de proyectos con LIDAR Aero tripulado.

En la actualidad Colombia también diseña y ejecuta proyectos con la ayuda de tecnologías aéreas no tripuladas. Tanto es así que cuenta con la regulación normativa por parte de la Aeronáutica Civil en cuanto a la regulación de los drones y la inscripción por parte del personal que los opera. Por otra parte están las entidades públicas como el Instituto de Desarrollo Urbano IDU quien en la “GUIA DE ELABORACION DE ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS” implementa la tecnología Lidar y UAV como uno de los recursos para generación de productos cartográficos.

En el año 2019 en Guatemala se desarrolla un estudio de comparación de Modelos Digitales (Juarez, 2019). El objetivo del proyecto fue realizar la comparación de dos Modelos Digitales de Terreno obtenidos por dos metodologías diferentes, comparando un MDT obtenido de Tecnología LIDAR con aeronave tripulada contra un MDT obtenido a partir de topografía convencional.

Del estudio realizado, define algunos aspectos fundamentales que son los que determina la variación del MDT, corresponde a la vegetación alta y densa.

Recomienda tener puntos de control que permitan validar los Modelos Digitales de Terreno y también realiza algunas recomendaciones del empleo de la tecnología según la fase del proyecto.

Este estudio es la investigación más cercana que se tiene sobre la comparación de dos MDT, donde uno de ellos es realizado con tecnología LIDAR con aeronave tripulada. Son pocos los informes documentados sobre tecnología LIDAR a bordo de aeronave no tripulada en los cuales se compare los resultados obtenidos contra otra tecnología, por ello se relacionan otros proyectos académicos que se vinculan de manera directa o indirecta a la temática de estudio presentada en el actual documento.

Es el caso del proyecto “Control de exactitud planialtimétrica de MDT y comparación de modelos topográficos en una centralidad de Ciudad del Plata: apoyo al estudio de escurrimiento superficial” desarrollado en Montevideo, Uruguay en el año 2020 (Lesparre, 2020), donde se buscó “aportar insumos desde el área de estudio de la Agrimensura, para la solución del drenaje pluvial de una zona de Ciudad del Plata, con el doble objetivo de evaluar diferentes metodologías de levantamiento de datos, comparando sus resultados. Mediante el estándar NSSDA se obtiene una exactitud planimétrica, tanto para el producto ortofoto como para el MDT, de 26 cm; y una exactitud altimétrica de 32 cm para este último, ambas a un 95 % de nivel de confianza. Al evaluar las diferencias en cota entre el MDT del VFN y el obtenido mediante vuelo de VANT, se obtienen diferencias con una media de 1 cm y desviación estándar de 20 cm. Entre otros resultados obtenidos. (Lesparre, 2020)

Se concluye en el estudio que el MDT obtenido por proceso fotogramétrico es una herramienta con mucho potencial para el apoyo en proyectos de infraestructura de drenaje pluvial a nivel urbano.

En España en la Universidad de Salamanca **Javier Fernández Lozano y Gabriel Gutiérrez Alonso** documentan sobre el “USO DE LIDAR Y AERONAVES NO TRIPULADAS PARA LA CARTOGRAFÍA Y REGISTRO DE ZONAS DE INTERÉS GEOMINERO”. Los

trabajos arqueológicos realizados en la zona se basaban en el uso de fotografía aérea y en la prospección de campo para la elaboración de cartografías de los sistemas hidráulicos y el análisis de los principales yacimientos.

La incorporación de nuevas tecnologías, como el LiDAR aerotransportado y los vehículos aéreos no tripulados (drones o VANT), permite el estudio detallado y la adquisición de datos de elementos del paisaje arqueominero en zonas de difícil acceso o muy vegetadas. En este trabajo se realiza la cartografía de yacimientos auríferos en la zona del valle del río Eria (suroeste de la provincia de León), comparando los resultados obtenidos con ambas tecnologías. Los resultados proporcionan modelos digitales a distinta resolución que, mediante un procesado de la imagen, permiten la identificación de nuevos datos para el conocimiento de la minería aurífera romana y la compleja red hidráulica de canales y estanques empleada para el transporte y acumulación de agua necesaria para la realización de las labores mineras. La metodología propuesta proporciona buenos resultados en el reconocimiento del paisaje minero, pudiendo ser empleada en otros distritos auríferos de características similares. (Fernández Lozano & Gutiérrez Alonso)

En el año 2012 en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Universidad de Sevilla el ingeniero **Jesús Sánchez García** realizó un proyecto **“Sistema LIDAR integrado en un UAV para la generación de Modelos Digitales del Terreno”** el objetivo principal de este proyecto ha sido la creación de un prototipo de sistema basado en la tecnología LIDAR para una aeronave de pequeñas dimensiones, con el fin de generar modelos digitales de terreno o MDT. (Sánchez García, 2012).

Empleando un láser scanner LD-MRS 400001 y un Helicóptero radiocontrol modelo CB 5000 realizaron pruebas de escaneo Lidar sobre aeronave no tripulada a 50m de altura, de ahí concluye que se cumplieron los objetivos propuestos ya que logra tener información MDT muy

cercana a la realidad pero que apenas es un inicio para la implementación del sistema de una manera óptima.

Finalmente se trae a acotación un proyecto realizado en la Universidad Santo Tomás De Aquino, por los profesionales **Jairo Díaz Villarraga y Yeismi Paola Galindo** quienes documentan la **“COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA LOGRADA EN EL USO DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A PARTIR DE TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL Y TECNOLOGÍA LIDAR EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL”**.

En ese proyecto se comparan tres metodologías por las cuales se puede obtener Modelos Digitales de Terreno, realiza un análisis detallado de la información y basados en cálculos emiten un criterio sobre la implementación de cada una de las metodologías en proyectos de infraestructura vial.

En el ejercicio profesional se han detectado errores e inconsistencias en los modelos digitales de terreno, derivados de los distintos procesos para el tratamiento de los datos o la toma de los mismos, lo cual puede crear inconsistencias importantes en los proyectos viales, por lo tanto la comparación de los modelos puede brindar una perspectiva acerca de la conveniencia del uso de las diferentes técnicas para la generación de modelos de acuerdo a las características del proyecto ya que contar con MDT de mayor precisión puede afectar o mejorar de manera significativa los procesos técnicos y económicos del mismo. (Díaz Villarraga & Galindo)

## 6. METODOLOGIA

### 6.1 LOCALIZACIÓN ÁREAS DE ESTUDIO – MUNIPIO DE YOTOCO

El Valle del Cauca hace parte de los 32 departamentos que componen el territorio Colombiano. Su nombre se deriva porque su llanura es atravesada por el Río que lleva su mismo nombre (Cauca).

La división política del Valle del Cauca se encuentra dividido en 42 municipios, su capital es Santiago de Cali, es administrado y dirigido por un gobernador y los municipios por alcaldes. (Gobernacion del Valle del Cauca, 2020)

Se ubica al lado occidental del país, en las regiones andina y del pacifico. A nivel administrativo el Valle del Cauca se divide en cinco regiones: La región Norte, Central, Pacifica, Sur y la región Oriental.

**Figura 10:** Localización Departamento Valle del Cauca.



Figura de elaboración propia, 2021.

Según datos consultados en la página de la Alcaldía Municipal de Yotoco - Valle Del Cauca, se establece que el Municipio de Yotoco tiene una extensión de 39.000 ha tiene una zona plana y otra montañosa. La parte plana pertenece al Valle de Rio Cauca, la zona montañosa corresponde a la vertiente oriental de la cordillera Occidental.

Las coordenadas geográficas centrales del municipio son: Latitud 3°51'37"N, Longitud 76°23'00"O y una altitud media de 972 m.s.n.m, tres pisos térmicos que son cálido, medio y frío se distribuyen a lo largo del territorio.

Limita con el municipio de Riofrío por el Norte, con los municipios de San Pedro, Buga y Guacarí por el Oriente, con el municipio de Vijes por el Sur y con los municipios de Calima Darién y Restrepo por el Occidente.

**Figura 11:** Localización área de estudio Yotoco

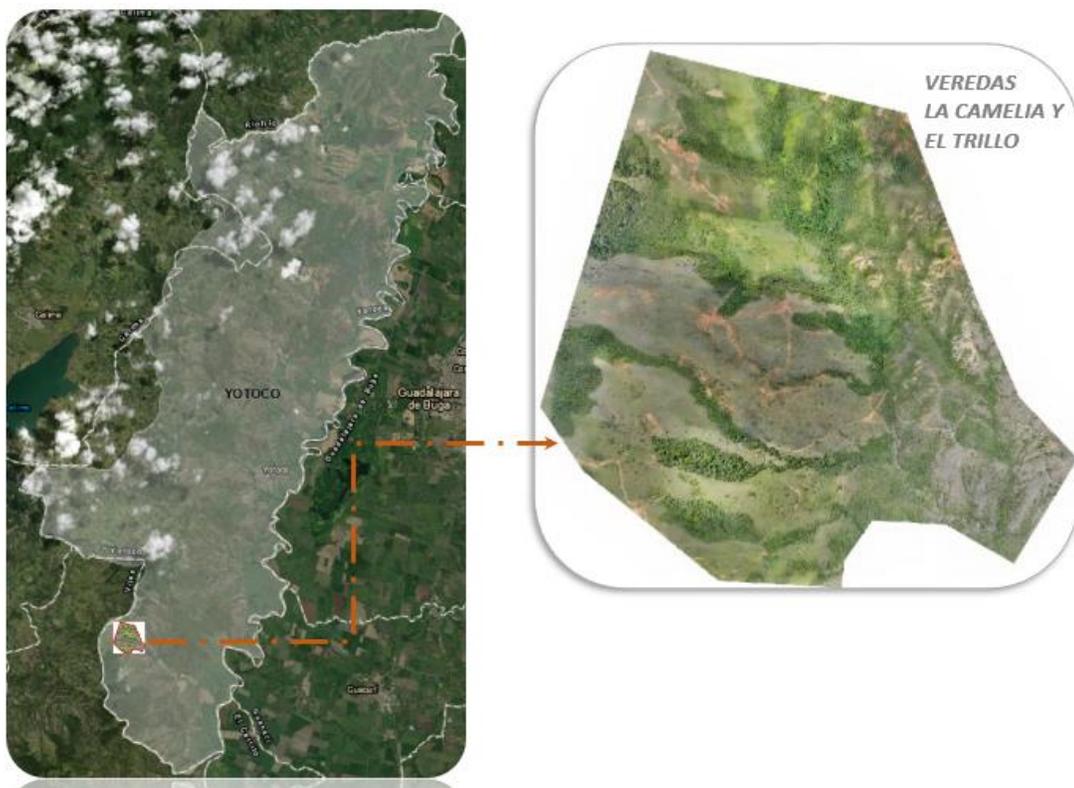


Figura de elaboración propia, 2021.

De acuerdo a la información objeto del presente estudio, el área de interés está situada en el municipio de Yotoco, cuenta con una extensión de 152.66 Ha, se ubica en la zona sur del municipio con unas coordenadas geográficas centrales que corresponden a Latitud  $3^{\circ} 47' 21.49''$  N, Longitud  $-76^{\circ} 26' 34.86''$  W, los valores de altura para el área de estudio van desde los 1.109 y 1.524 msnm.

## **6.2 ESQUEMA DE TRABAJO**

Para el desarrollo del proyecto se realizan las actividades y procesos que se describen a continuación y las cuales se pueden apreciar en la (Figura 12).

Información primaria: Se cuenta con la información primaria que contiene el área de estudio.

Diseño de vuelos: Se realiza el diseño de los vuelos con base en la información primaria para dar cobertura a la totalidad del área de interés, donde se establecen parámetros como altura de vuelo, traslapo entre otros.

Procesos de campo: Se realizan posicionamiento GPS de mojones y puntos de control y la ejecución de vuelo con dron Lidar y vuelo con dron fotogramétrico. De las actividades en campo se obtiene información de datos Rinex, Trayectorias de vuelo, nube de puntos y fotografías aéreas que deben ser procesadas.

Proceso de oficina: Se realizan los cálculos necesarios para la obtención de coordenadas de los vértices posicionados y se obtienen los MDT resultante del proceso Lidar y del proceso fotogramétrico.

Comparación de superficies: Se realiza la comparación de superficies por medio de perfiles, luego se establece el análisis de la información para emitir resultados y recomendaciones.

Figura 12: Flujo de trabajo

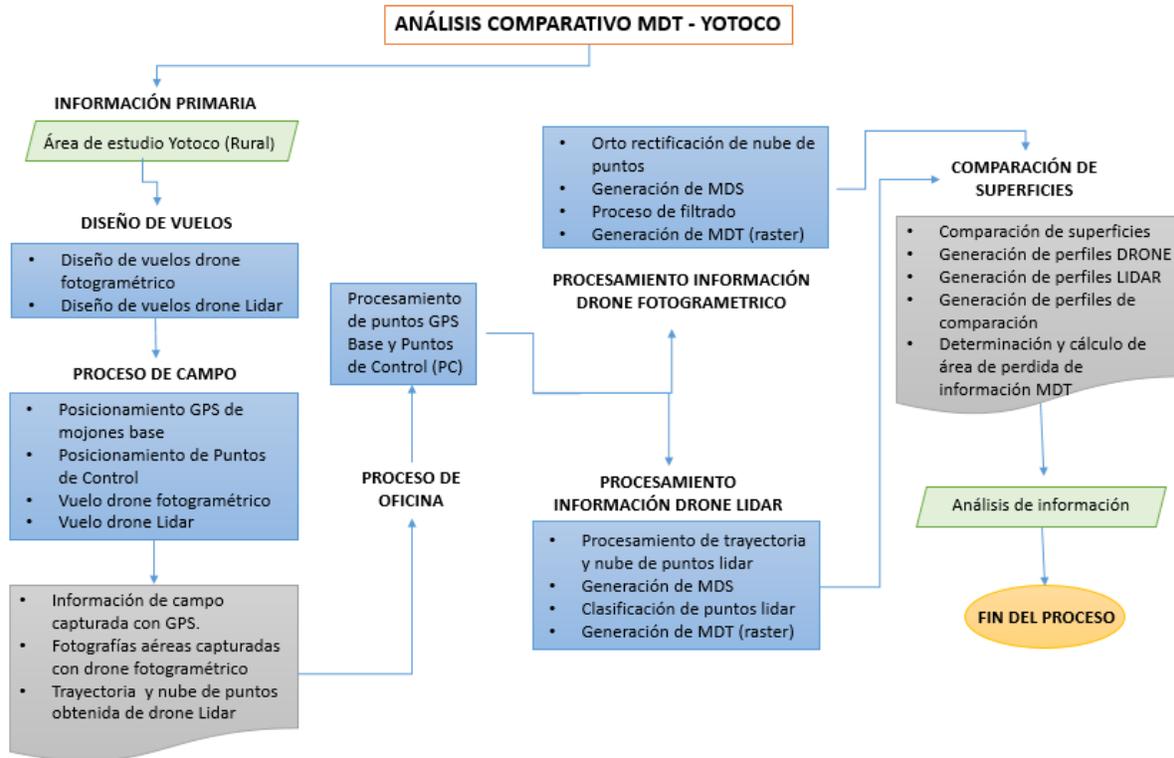


Figura de elaboración propia, 2021.

### 6.3 DISEÑO DE VUELO

De acuerdo con la extensión y características del terreno, se generan los vuelos necesarios para cubrir el área de estudio. Los parámetros fundamentales que solicita el software de diseño de vuelo se presentan en la **Tabla 1**, ítems como altura de vuelo, traslapos y sentido de vuelo determinan la cobertura, definición y duración de vuelo.

Las líneas de vuelo deben seguir la dirección de las curvas de nivel, esto permite conservar la escala en el área sobrevolada.

**Tabla 1:** *Parámetros de vuelo*

ITEM	FOTOGRAMETRÍA	LIDAR
Precisión	2 cm	100 puntos m2
Altura de vuelo sobre el terreno	80 m	150 m
Traslapo Longitudinal	80 %	80 %
Traslapo Transversal	75 %	60 %
Software planeación de vuelo	Emotion - SenseFly	UgCS
Grid de referencia	Google Earth	Google Earth

Tabla de elaboración propia, basada en parámetros de trabajo Sar Ingeniería 2021.

**Figura 13:** *Cambios de altura de las líneas de vuelos proyectadas en el terreno; Esquema típico.*

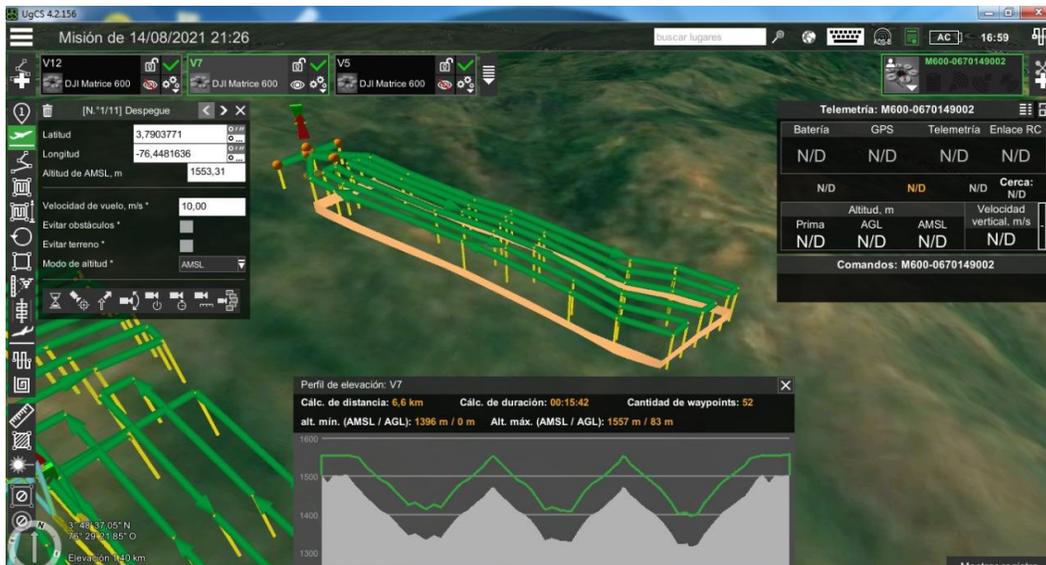


Figura de elaboración propia, 2021.

### 6.3.1 Diseño de puntos de control (GCP)

Con base en el diseño de los polígonos de vuelo, se estableció el control en tierra para el área de interés. Se generó una grilla compuesta por (GPC) ubicados de manera aleatoria conservando distancias no mayores a 700 metros para el área en general, siempre y cuando las condiciones del terreno permitan la ubicación del GCP (Figura 14).

**Figura 14:** *Diseño de puntos de control.*

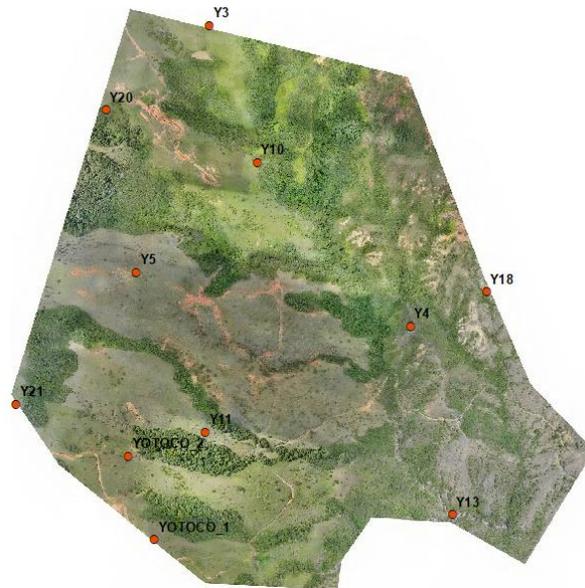


Figura de elaboración propia, 2021.

## 6.4 PROCESO DE CAMPO

El trabajo de campo se inició con la exploración de los diferentes sitios de trabajo para identificar los lugares de posible lanzamiento y aterrizaje del sensor drone LIDAR MiniVux-1 UAV y el Drone eBee, así como verificar la concordancia de los vuelos planificados con las condiciones propias del terreno.

### 6.4.1 Georreferenciación

Para este fin se emplearon los equipos GNSS de doble frecuencia por los métodos GNSS estático diferencial y Fast Static.

El sistema de coordenadas que se empleó fue Magna Sirgas Cartesiano Origen Oeste, del cual se asumieron los parámetros que se presentan en la (Tabla 2).

**Tabla 2:** Sistema de coordenadas empleado

<p>MAGNA_Colombia_Oeste WKID: 3115 Authority: EPSG</p> <p>Projection: Transverse_Mercator False_Easting: 1000000.0 False_Northing: 1000000.0 Central_Meridian: -77.07750791666666 Scale_Factor: 1.0 Latitude_Of_Origin: 4.596200416666666 Linear Unit: Meter (1.0)</p>	<p>Geographic Coordinate System: GCS_MAGNA Angular Unit: Degree (0.0174532925199433) Prime Meridian: Greenwich (0.0) Datum: D_MAGNA Spheroid: GRS_1980 Semimajor Axis: 6378137.0 Semiminor Axis: 6356752.314140356 Inverse Flattening: 298.257222101</p>
--	--

Fuente: Sistema de coordenadas ArcMap, 2021.

#### 6.4.2 Posicionamiento GPS - BASES

Para la georreferenciación de cada punto de control, se realizó un traslado de coordenadas desde la Base YOTOCO\_2. El método empleado fue GNSS estático diferencial, con periodos de rastreo adecuados, basados en la distancia entre cada lugar y los vértices en mención (Figura 15 y Figura 16).

**Figura 15:** Posicionamiento Vértice Base (YOTOCO\_1)



Fuente: SAR Ingeniería, 2021.

**Figura 16:** *Posicionamiento Vértice Base (YOTOCO\_2)*



Fuente: SAR Ingeniería, 2021.

#### **6.4.3** *Demarcación y posicionamiento de los Puntos de Control (GCP) - Pre señalización*

Los GCP se demarcaron con pintura generando contraste basados en las características del suelo. De modo que estos pudieran ser foto identificados durante el procedimiento de ajuste fotogramétrico. Estos apoyos garantizan la calidad de los trabajos, a través de la correlación del grid fotogramétrico y la nube generada con las coordenadas obtenidas del posicionamiento GNSS. En las fotografías que se presentan a continuación se aprecian las características de las marcas establecidas en campo de algunos de los puntos de control generados (Figura 17).

**Figura 17:** *Marcación y posicionamiento de puntos de control PC en campo. (PC3 – PC4).*



Fuente: SAR Ingeniería, 2021.

#### **6.4.4** *Ejecución de vuelos drone fotogramétrico*

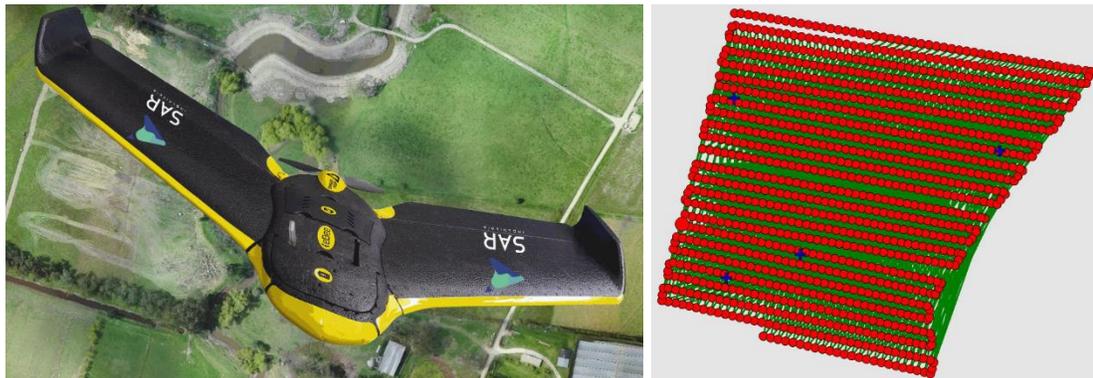
Antes de ejecutar los vuelos con drone eBee se requiere establecer los lugares de despegue y aterrizaje.

Debido a que es un drone de ala fija se deben ubicar zonas libres de vegetación, cuerdas o cualquier elemento que resulte obstructivos en un radio de mínimo 40 metros a la redonda.

El lanzamiento y aterrizaje del mismo se realizan en contra de la dirección del viento para que tenga una óptima elevación y un buen descenso y aterrizaje.

Una vez establecidos los lugares de despegue y aterrizaje se procede con la ejecución de la misión de vuelo que ha sido diseñada y posteriormente cargada al drone (Figura 18).

**Figura 18:** Drone eBee- líneas de vuelo



Fuente: SAR Ingeniería, 2021.

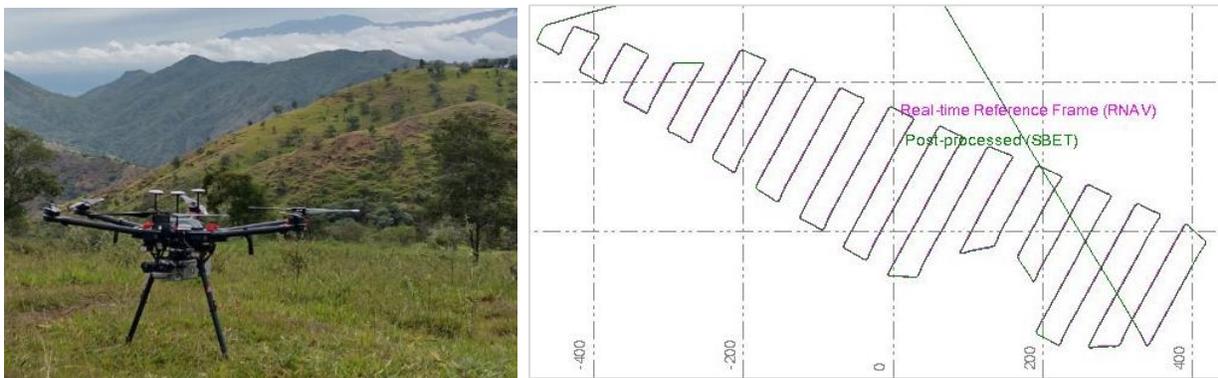
#### 6.4.5 Ejecución vuelo sensor Lidar drone - MiniVUX-1UAV

Previo a los vuelos es necesario elegir el sitio de lanzamiento y aterrizaje del Sensor Lidar MiniVUX-1UAV.

Se selecciona una zona despejada y nivelada cercana al área de vuelo para que el sensor Lidar despegue y aterrice desde el mismo punto.

El drone Matrice 600 Pro se comporta como el vehículo que transporta al sensor Lidar MiniVUX-1UAV, este drone es multirrotor lo cual hace que se eleve y aterrice de manera vertical (Figura 19).

**Figura 19:** Sensor Lidar MiniVUX-1UAV - trayectoria.



Fuente: SAR Ingeniería, 2021.

## 6.5 PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS

### 6.5.1 *Procesamiento de las observaciones GNSS - Apoyos*

Una vez finalizado el trabajo en campo, se llevó a cabo el procesamiento de las observaciones GNSS; Se realiza traslado de coordenadas desde la Base YOTOCO\_2 hasta cada uno de los puntos de PC pre-señalizados y la señal de azimut.

## 6.6 PROCESAMIENTO DE DATOS FOTOGRAMETRICOS

### 6.6.1 *Procesamiento Digital en software PIX4D*

Una vez se finalizó el trabajo en campo, teniendo las fotografías de los polígonos de vuelos y las coordenadas de los puntos de apoyo, se llevó a cabo el ajuste de los modelos fotogramétricos, el filtrado de las nubes de puntos y la generación de productos.

Las imágenes obtenidas con los vuelos del dron se procesaron en el software Pix4D, este es un software fotogramétrico profesional que genera mapas 2D y modelos 3D hasta con precisión centimétrica. (Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5)

**Tabla 3:** *Características de entrada Pix4D*

<b>Inputs</b>
Aerial (nadir and oblique) imagery support
Multi-camera support for the same project
MultisPEC 4C support
Multiple file types
Ground Control Point edit and import
Local, global and arbitrary coordinate reference system
Camera position and exterior orientation (omega, phi, kappa) support
External point cloud import
eBee RTK high precision images

Fuente: Software Pix4D, 2021.

**Tabla 4:** *Características de procesamiento Pix4D*

<b>Processing</b>
Rapid Check processing mode
Rapid NDMI map creation
Rapid Check Quality report
Camera self-calibration
Automatic Aerial Triangulation (AAT) and Bundle Block Adjustment (BBA)
Automatic point cloud densification
Automatic point cloud classification and DTM extraction (BETA)
Point cloud filtering and smoothing
Automatic brightness and color correction
Quality report
Project merging
Project area definition
Project splitting
GPU support

Fuente: Software Pix4D, 2021.

**Tabla 5:** *Características de Editor de nubes de puntos Pix4D*

<b>rayCloud Editor</b>
Project viewing
Manual tie point editing
Project reoptimization
Image annotation
Point cloud editing
Polyline object creation
Surface object creation
Stockpile object creation (volume measurement)
Digitization tools / vector object editing
Fly-through animation

Fuente: Software Pix4D, 2021.

El software se encarga de la calibración y el procesamiento necesario para brindar un alto grado de precisión en los productos.

La estructura del programa contempla tres pasos fundamentales para la obtención de los productos finales:

- Procesamiento Inicial
- Point Cloud o nube de puntos
- Filtrado, generación de MDT y Orto mosaico.

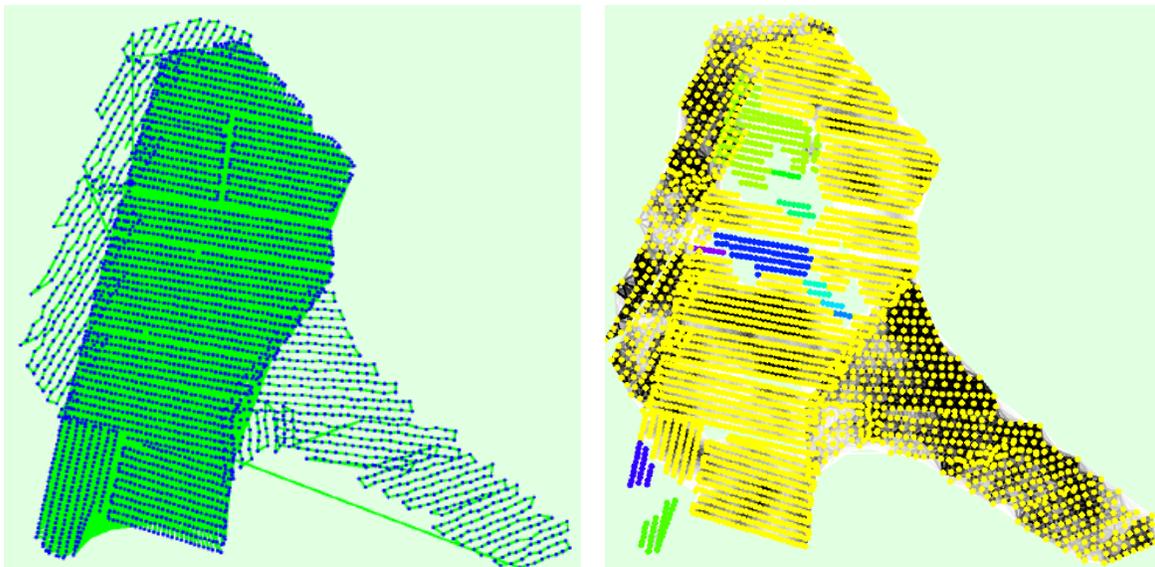
### 6.6.2 *Procesamiento Inicial*

El procesamiento inicial evalúa la orientación interna y relativa de los modelos fotogramétricos, empleando las geo etiquetas de las fotografías (Phi, Kappa, Omega) y las coordenadas del centro de proyección de estas.

En el procesamiento inicial se llevó a cabo la correlación y orto rectificación de las imágenes donde se verifica el traslape obtenido entre las mismas, luego se forma una nube de puntos general, con la cual se puede pre visualizar el modelo de superficie del área levantada.

Se da paso al proceso de densificación de la nube de puntos y la georreferenciación del modelo fotogramétrico por medio de los puntos de control, donde se identifican y se asigna la coordenada a cada punto de control por medio de la selección del punto central de la marcación generada en campo, que se visualiza en cada una de las fotografías en las cuales fueron visibles (Figura 20).

**Figura 20:** *Orientación interna, relativa y aerotriangulación*

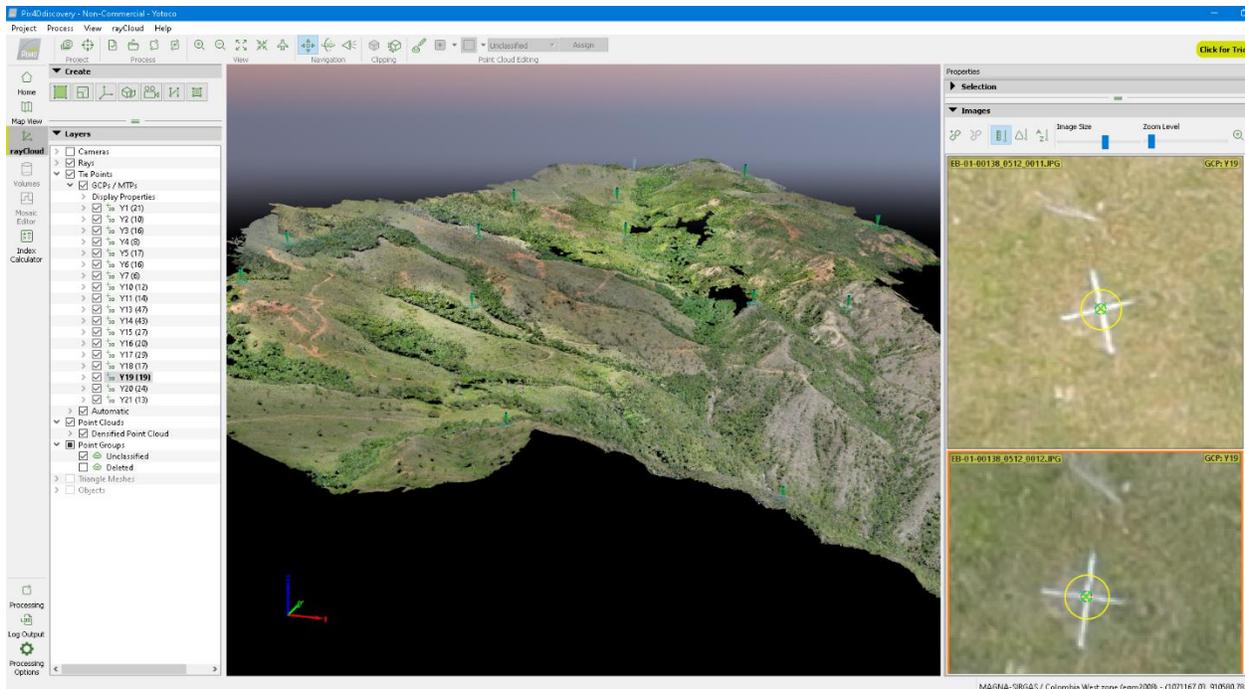


Fuente: SAR Ingeniería, 2021.

### 6.6.3 Densificación Point Cloud

Una vez se orientó cada modelo fotogramétrico, se realizó la georreferenciación, mediante los puntos de control PC importados al software de procesamiento desde archivos de texto e identificados (picados) en las fotografías visibles (automáticamente Pix4D realiza la selección de imágenes), para generar un ajuste en bloque, donde se obtuvieron los residuales para cada punto involucrado. Como el ajuste fue satisfactorio, se efectuó la densificación de la nube de puntos, a través de la cual se obtuvo un modelo de superficie del terreno, donde cada dos píxeles en las fotografías se convierten en un punto en el terreno y a través de estos, se lleva a cabo el filtrado manual para la generación del modelo digital del terreno (Figura 21).

**Figura 21:** Modelos Fotogramétricos de procesamiento con imágenes tomadas con drone – Pix4D



Fuente: SAR Ingeniería, 2021.

#### **6.6.4 Filtrado y generación de MDT**

Haciendo uso de las herramientas de edición (líneas y polígonos), se generó una nube de puntos final ajustada al terreno, proyectando los puntos altos (como árboles y construcciones) al suelo, posteriormente se asignan los parámetros para la generación de MDT y Orto mosaico en las opciones de procesamiento (Figura 22).

**Figura 22:** *MDT obtenido de proceso Fotogramétrico*

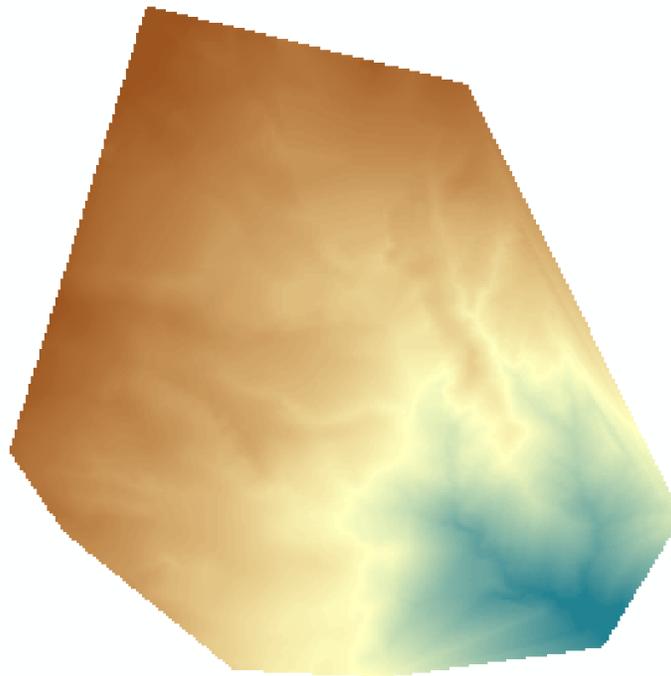


Figura de elaboración propia, 2021.

### **6.7 PROCESAMIENTO DE DATOS LIDAR**

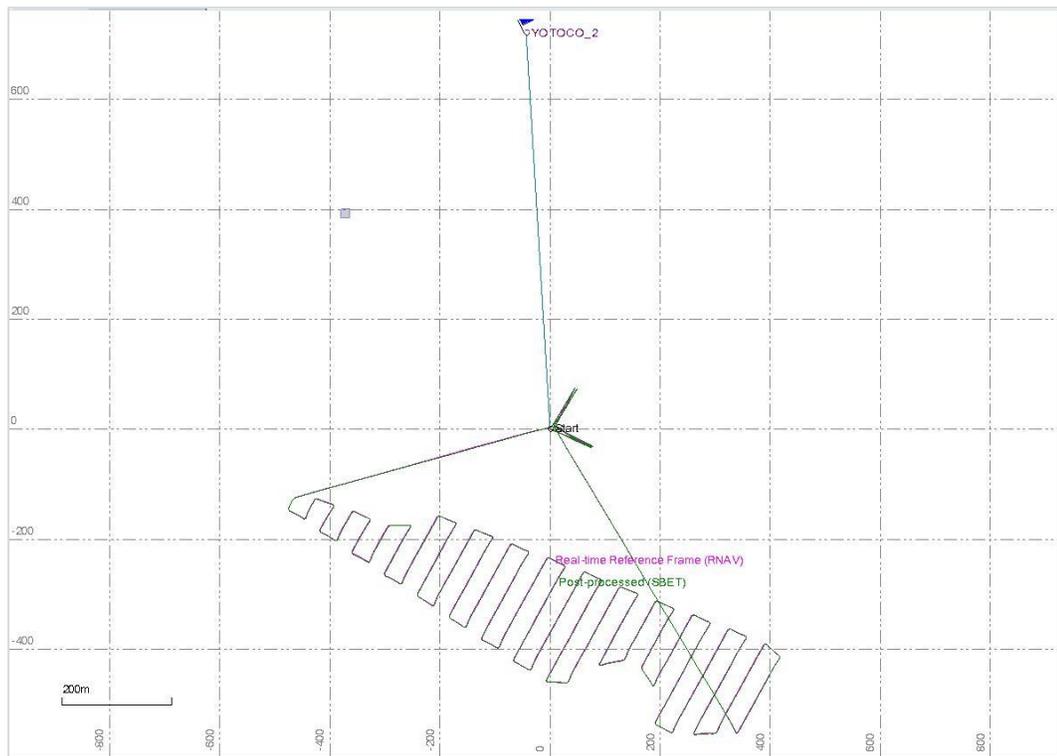
#### **6.7.1 Procesamiento Digital PosPAC 8.3, RiPROCESS 1.85, PIX4D**

Para el procesamiento de los datos obtenidos con el sensor Lidar-drone, se emplean los programas POSPac UAV 8.3 para el ajuste de trayectoria y RiPROCESS 1.85 para ajuste de datos de escaneo.

### 6.7.1.1 Ajuste de trayectoria

Para el ajuste de trayectoria se emplean los datos de campo almacenados por la unidad inercial IMU y el GPS-GNSS, en correlación con los archivos de posicionamiento colectados por el GPS-GNSS base. En el software POSPac UAV 8.3 se cargan los archivos de trayectoria (IMU-GPS-GNSS) y se corrigen con la base materializada, la cual cuenta con coordenadas de precisión (Figura 23).

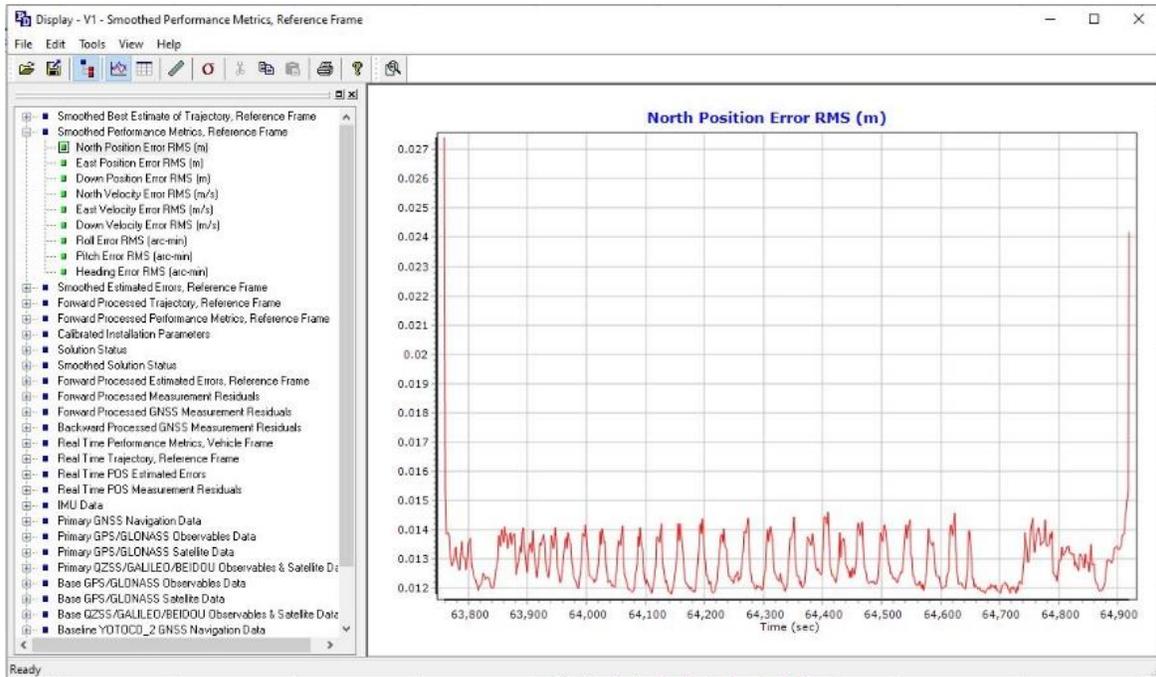
**Figura 23:** *Procesamiento trayectoria de vuelo*



Fuente: SAR Ingeniería, 2021.

Luego del procesamiento de la trayectoria, se revisan los valores de RMS obtenidas para su validación. La trayectoria ajustada se emplea en los procesos de generación de nubes (Figura 24).

**Figura 24: Valores RMS**



Fuente: SAR Ingeniería, 2021.

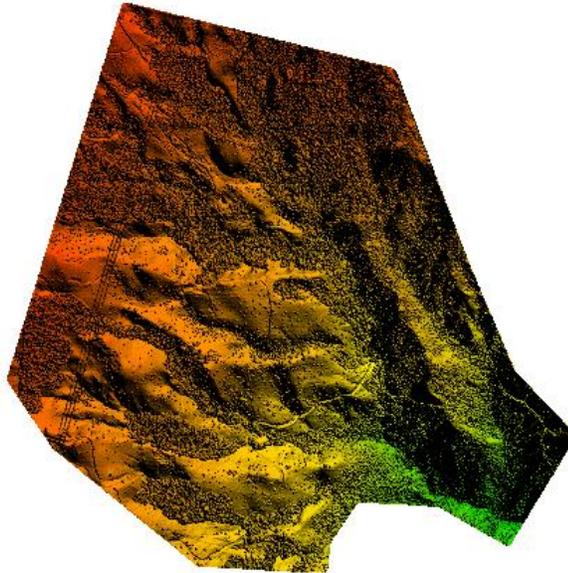
### 6.7.1.2 Procesamiento de datos de escáner

El procesamiento de los datos lidar se lleva a cabo en el software RiPROCESS 1.85, se debe definir el sistema de coordenadas de salida deseado, verificar que el archivo de calibración de trayectoria se haya importado correctamente y se deben definir los parámetros de extracción FOV, que usualmente es de 90°.

En seguida se realiza la integración o correlación de los datos del escáner con la trayectoria ajustada y se genera la nube de puntos preliminar.

Finalmente se realiza el ajuste de las diferentes líneas sobrevoladas para generar la nube de puntos del área sobrevolada (Figura 25).

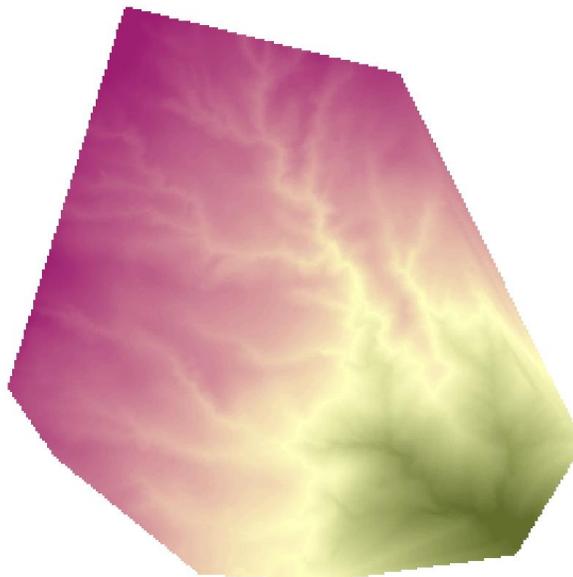
**Figura 25:** *Nubes de puntos generadas luego del ajuste de la trayectoria y el escaneo Lidar - MDS*



Fuente: Elaboración propia, 2021.

### **6.7.1.3 Clasificación de puntos Lidar y generación de MDT**

**Figura 26:** *MDT Lidar*



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se puede realizar una clasificación de los puntos de acuerdo a los retornos e índices de reflectividad, con el fin de generar los entregables finales para los proyectos. La nube de puntos coloreada se exporta y se emplea para la generación de resultados como MDT (Figura 26).

### 6.8 COMPARACIÓN DE SUPERFICIES (MDT FOTOGRAFAMÉTRICO VS MDT LIDAR)

Una vez obtenido el MDT Fotogramétrico y el MDT Lidar, se realiza un proceso de comparación o resta de superficies para obtener un nuevo modelo matemático de superficie que reflejara las diferencias que existen entre los dos modelos iniciales.

Haciendo uso de la herramienta Raster calculator de ArcGis se realiza la resta de superficies, de la cual se obtiene el nuevo MDT de Comparación que se aprecia en la (Figura 27).

**Figura 27:** *MDT Resultante (MDT Lidar – MDT Fotogrametría)*

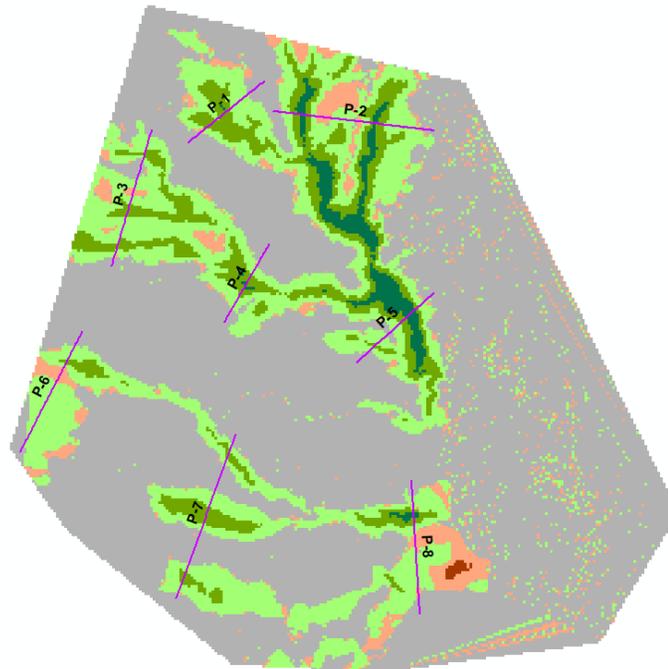


Figura de elaboración propia, 2021.

### 6.8.1 Generación de perfiles comparativos

Sobre la superficie resultante del proceso comparativo, se trazan secciones en las zonas que presentan mayor cambio. Por medio de la herramienta Profile Graph del software ArcGis se obtiene la representación gráfica de varios perfiles generados a partir del MDT Comparativo y también perfiles generados para el MDT Fotogramétrico y el MDT Lidar (Figura 28).

**Figura 28:** Perfil sobre MDT Comparativo

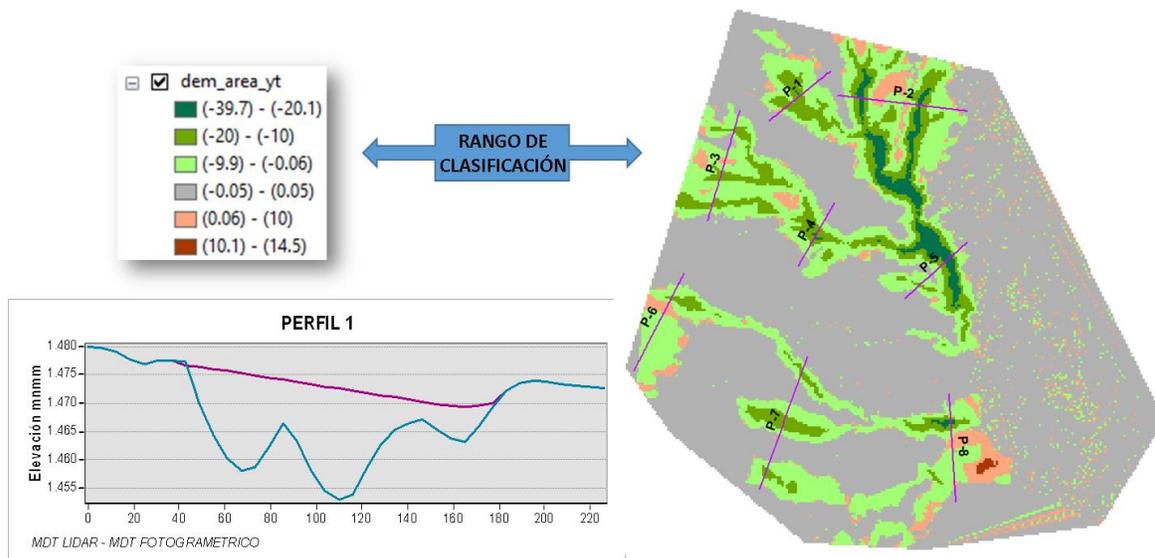


Figura de elaboración propia, 2021.

Los valores de rango de clasificación se establecen de la siguiente manera: Zonas de poco cambio de elevación se asigna valores de -0.05m hasta 0.05m de diferencia, zonas de cambio positivo se establece un rango de 0.06m hasta 10m y de 10.1 hasta 14.5, en zonas de cambio negativo se establecen rangos cada 10 metros que van de -0.06 hasta -9.9, de -10 hasta -20 y de -20.1 hasta -39.7.

El perfil muestra los cambios en función de la diferencia vertical entre modelos, la zona que se muestra en cero o cercana a cero entre los (-0.05m a 0.05m) son zonas de no cambio, los demás rangos son zonas de cambio en valor vertical del MDT Lidar con respecto al MDT Fotogramétrico.

## 6.9 PERFILES COMPARATIVOS

Sobre el modelo de superficie de comparación, se trazan ocho perfiles en las zonas de mayor cambio para evaluar el comportamiento de cada uno de los modelos digitales de terreno (Figura 29). El inicio y el final del perfil se traza sobre un área donde se encuentre expuesta la superficie, para evaluar el comportamiento en zonas de terreno sin vegetación y en zonas boscosas.

**Figura 29:** *Perfiles sobre MDT LIDAR y MDT DRONE*

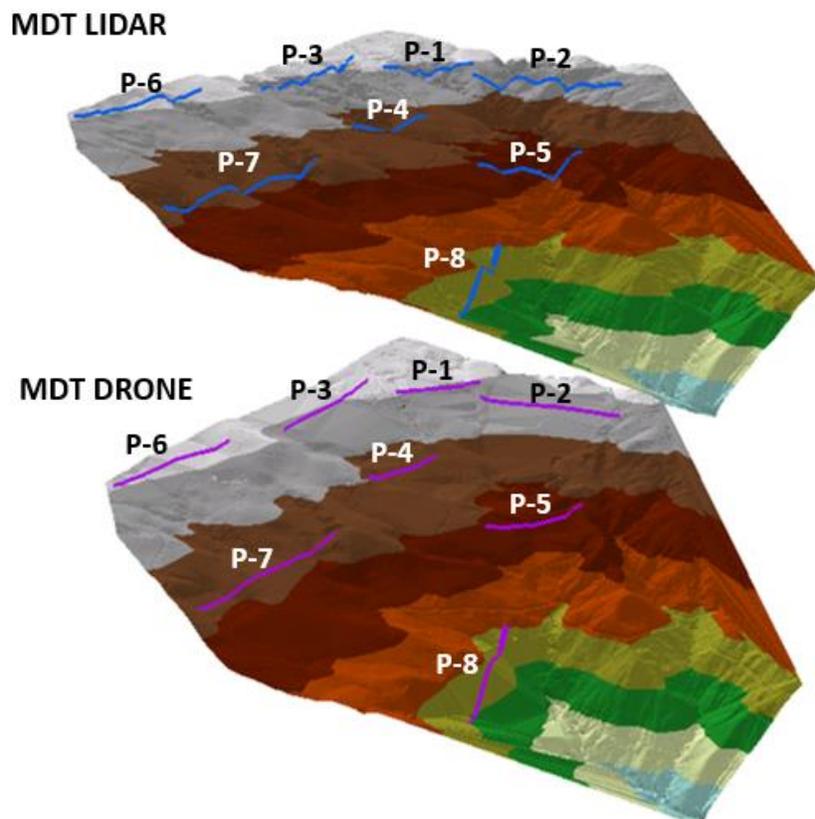


Figura de elaboración propia, 2021.

## **6.10 COMPARACIÓN DE PRESUPUESTO**

Se consulta el costo total de cada una de las metodologías, a la empresa que permitió tener acceso a la información de estudio del proyecto.

Dentro de la evaluación de costos se tienen en cuenta aspectos como:

- Escala
- Área
- Topografía (Condiciones y tipo de terreno)
- Traslados
- Precisión (Cantidad de puntos por m2 o GSD)
- Administración
- Calidad de procesamiento

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 30 hasta la Figura 37 se presentan los resultados que se tienen luego de trazar un perfil sobre el MDT resultante de proceso Lidar y se traza el mismo perfil sobre el MDT resultante del proceso fotogramétrico.

En la primera parte de la figura se encuentra la comparación de perfiles que se obtienen de la metodología Lidar versus la metodología fotogramétrica, se aprecia de color azul el perfil resultante del MDT Lidar y de color magenta el perfil resultante del MDT fotogramétrico. En el gráfico se encuentra en el eje X el valor longitudinal del perfil y en el eje Y el valor de elevación.

Posteriormente en la columna que se encuentra al costado izquierdo, se presentan dos imágenes que corresponde a la visualización de datos del perfil Lidar, la primera es una imagen que se obtiene en color verdadero de la nube de puntos capturada o MDS en formato (.las) y la segunda es la visualización del MDT luego de realizar el proceso de clasificación de puntos Lidar, esta segunda se presenta por valores de elevación (Figura 29).

Al costado derecho de la figura general se presentan dos imágenes, la primera corresponde a la nube de puntos obtenida del proceso fotogramétrico o MDS en valor de pixel y la segunda es la visualización del MDT luego de realizar el proceso de filtrado de puntos, esta segunda se presenta por valores de elevación (Figura 29).

El trazo del perfil sobre cada uno de los MDT obtenidos, permite evaluar la representación del terreno que arroja cada metodología, es un corte que se realiza con la finalidad de identificar fácilmente las variaciones que se presentan en las zonas boscosas.

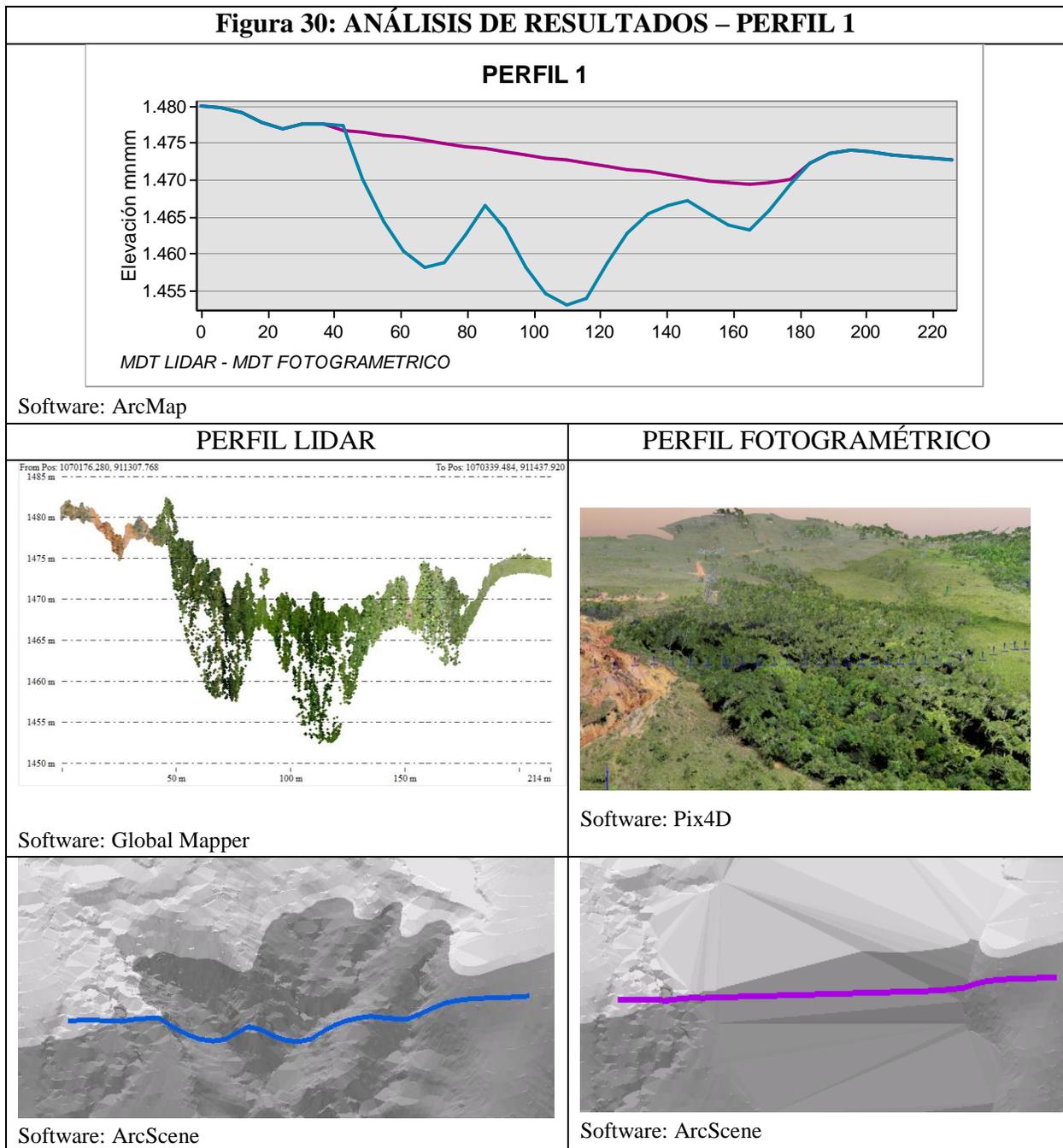


Figura de elaboración propia, 2021.

Las áreas iniciales y finales del perfil muestran que los MDT tienen bastante similitud, se debe a que la superficie del terreno se encuentra expuesta, sin presencia de vegetación. La mayor diferencia se presenta en las zonas boscosas donde la imagen capturada con el sensor Lidar muestra los diversos cambios que tiene la superficie, a diferencia del perfil que se extrae del MDT fotogramétrico que presenta una línea de pendiente continua en el área boscosa.

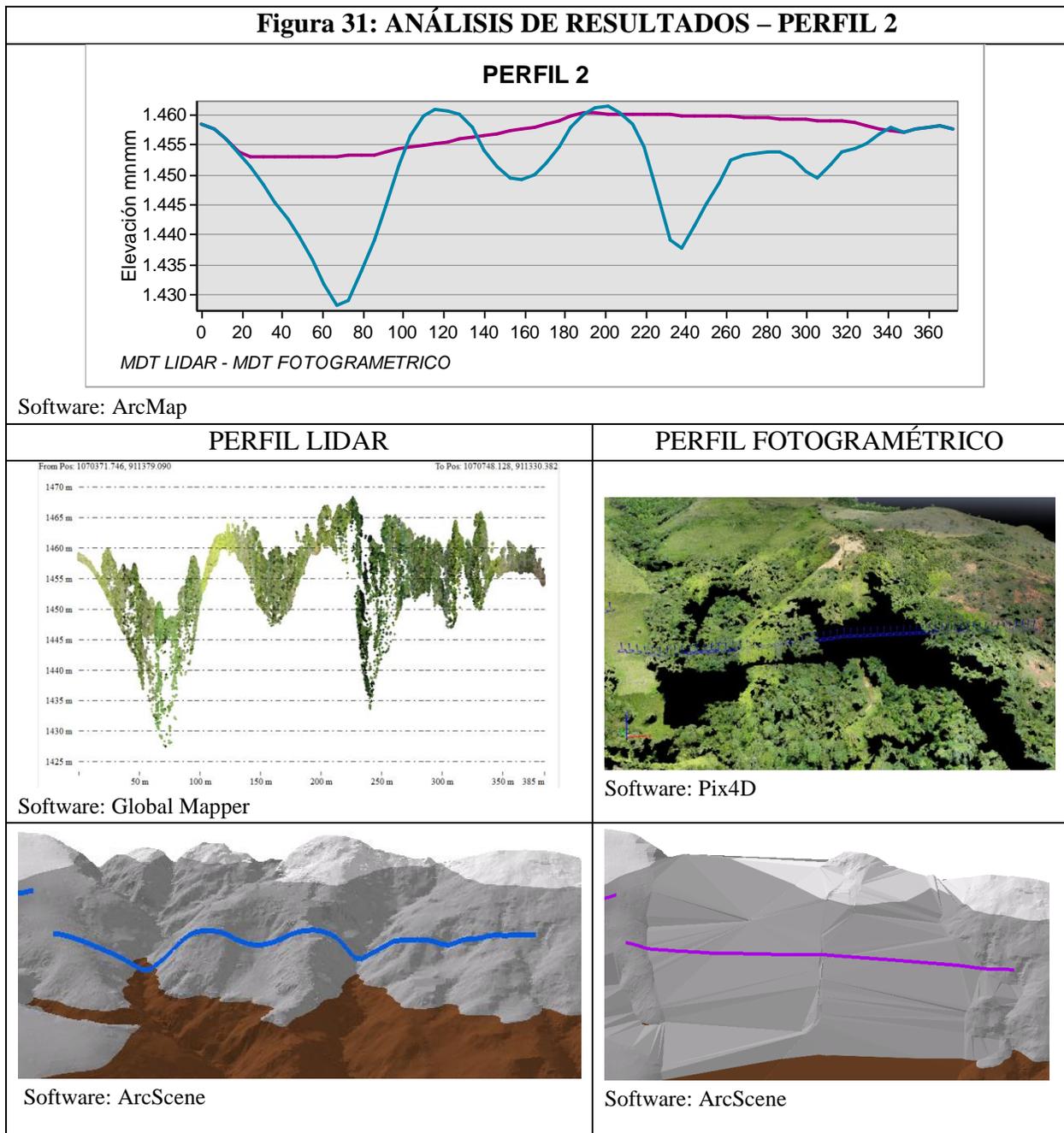


Figura de elaboración propia, 2021.

Las zonas iniciales y finales del perfil muestran que los MDT tienen bastante similitud, se debe a que la superficie del terreno se encuentra expuesta, sin presencia de vegetación. En las distancias de 90, 140, 190 y 210 metros, los perfiles se interceptan lo cual quiere decir que presentan información en común que corresponde a suelo descubierto de vegetación. En las demás zonas no se presenta similitud en la representación del terreno y corresponde a las áreas de mayor vegetación. El perfil azul representa la forma que tiene el terreno, se debe a la captura de información de puntos Lidar que penetran sobre la vegetación densa y alta.

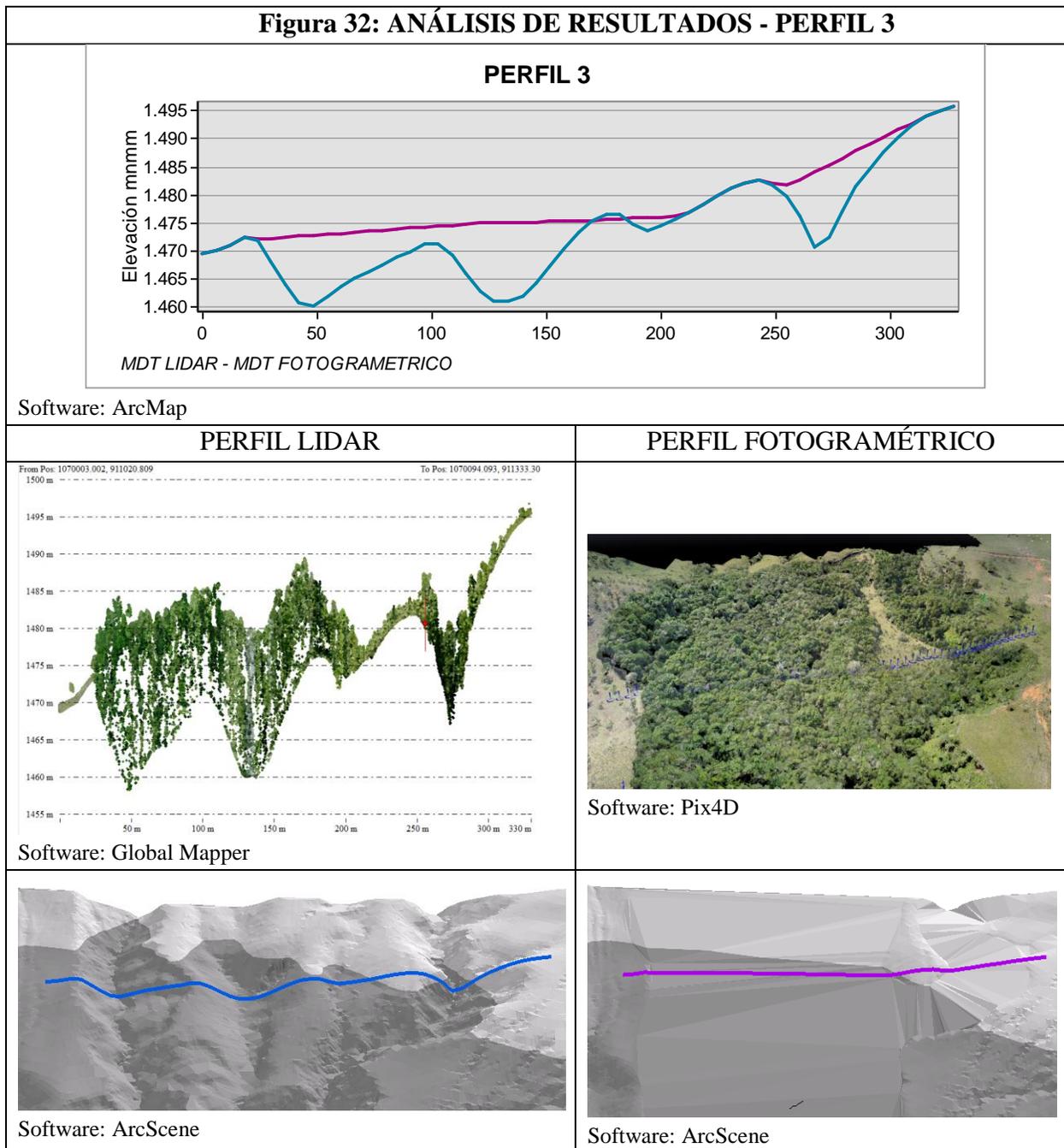


Figura de elaboración propia, 2021.

Las zonas iniciales y finales del perfil muestran que los MDT tienen bastante similitud, se debe a que la superficie del terreno se encuentra expuesta, sin presencia de vegetación. En las distancias de 210 hasta 250 metros, los perfiles se interceptan porque se encuentra terreno libre de vegetación, en las demás zonas el perfil magenta muestra líneas rectas que no representan el terreno, esto se visualiza en zonas de vegetación alta y densa. El perfil azul representa el MDT lidar que se genera en la zona boscosa, se logra gracias a la incidencia de puntos Lidar en vegetación alta y densa.

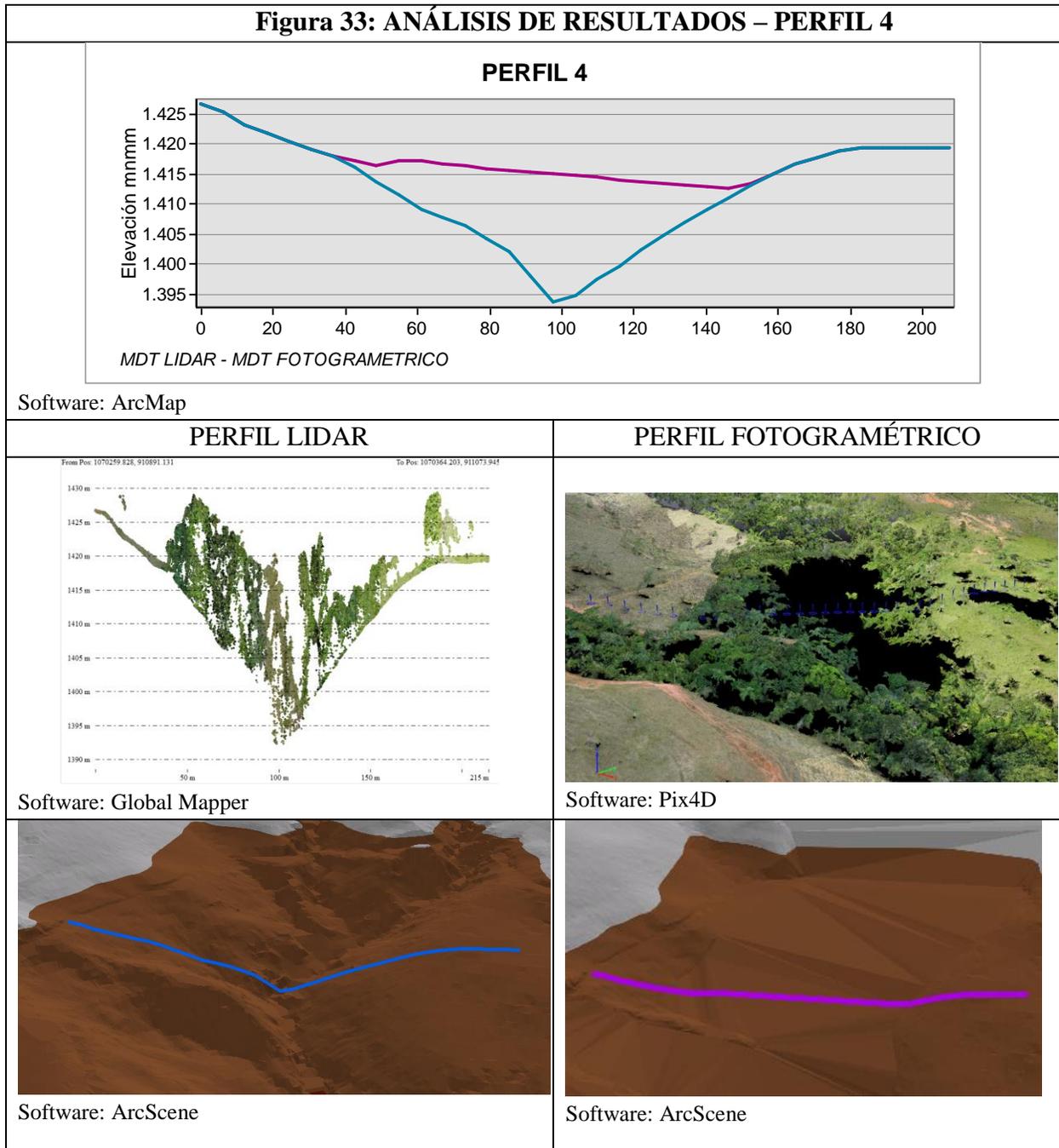


Figura de elaboración propia, 2021.

Las zonas iniciales y finales del perfil muestran que los MDT tienen bastante similitud, se debe a que la superficie del terreno se encuentra expuesta, sin presencia de vegetación. En las distancias de 40 hasta 160 metros los perfiles no se interceptan, en esta zona el perfil magenta resultante del MDT fotogramétrico no representa la convergencia de montañas, también coincide con presencia de vegetación alta y densa. El perfil azul resultante del MDT Lidar representa de manera clara la convergencia que forman las montañas, se logra gracias a la cantidad de puntos Lidar capturados incluso en zonas de vegetación alta y densa.

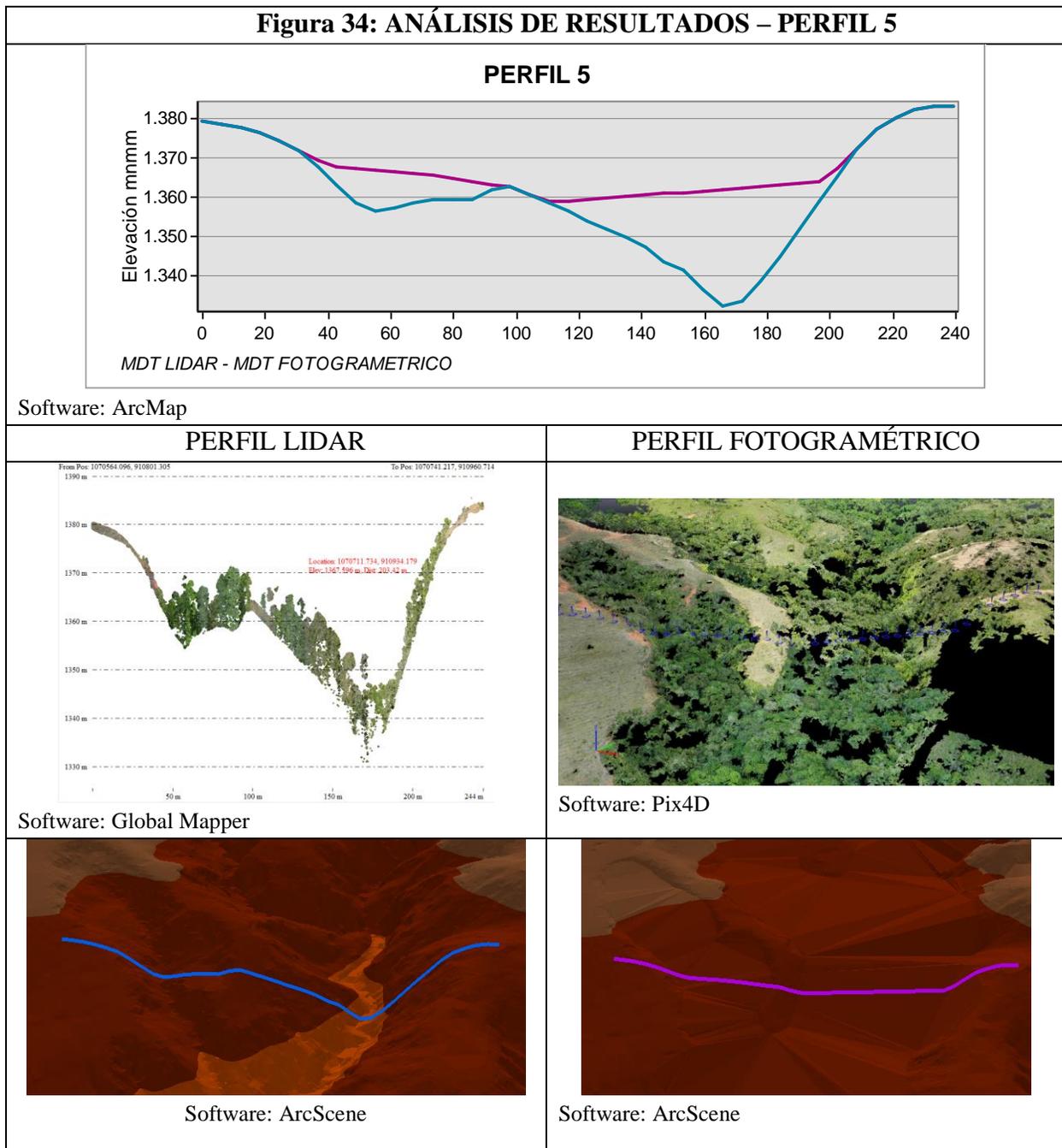


Figura de elaboración propia, 2021.

Las zonas iniciales y finales del perfil muestran que los MDT tienen bastante similitud, se debe a que la superficie del terreno se encuentra expuesta, sin presencia de vegetación. En las distancias de 90 hasta 110 metros los perfiles se interceptan porque no hay presencia de vegetación. El perfil azul generado a partir del MDT Lidar muestra las variaciones que presenta el terreno, se logra gracias a la captura y densidad de puntos Lidar en áreas boscosas. El perfil magenta resultante del MDT fotogramétrico no representa los cambios de pendiente que tiene el terreno en áreas de cobertura vegetal.

**Figura 35: ANÁLISIS DE RESULTADOS – PERFIL 6**

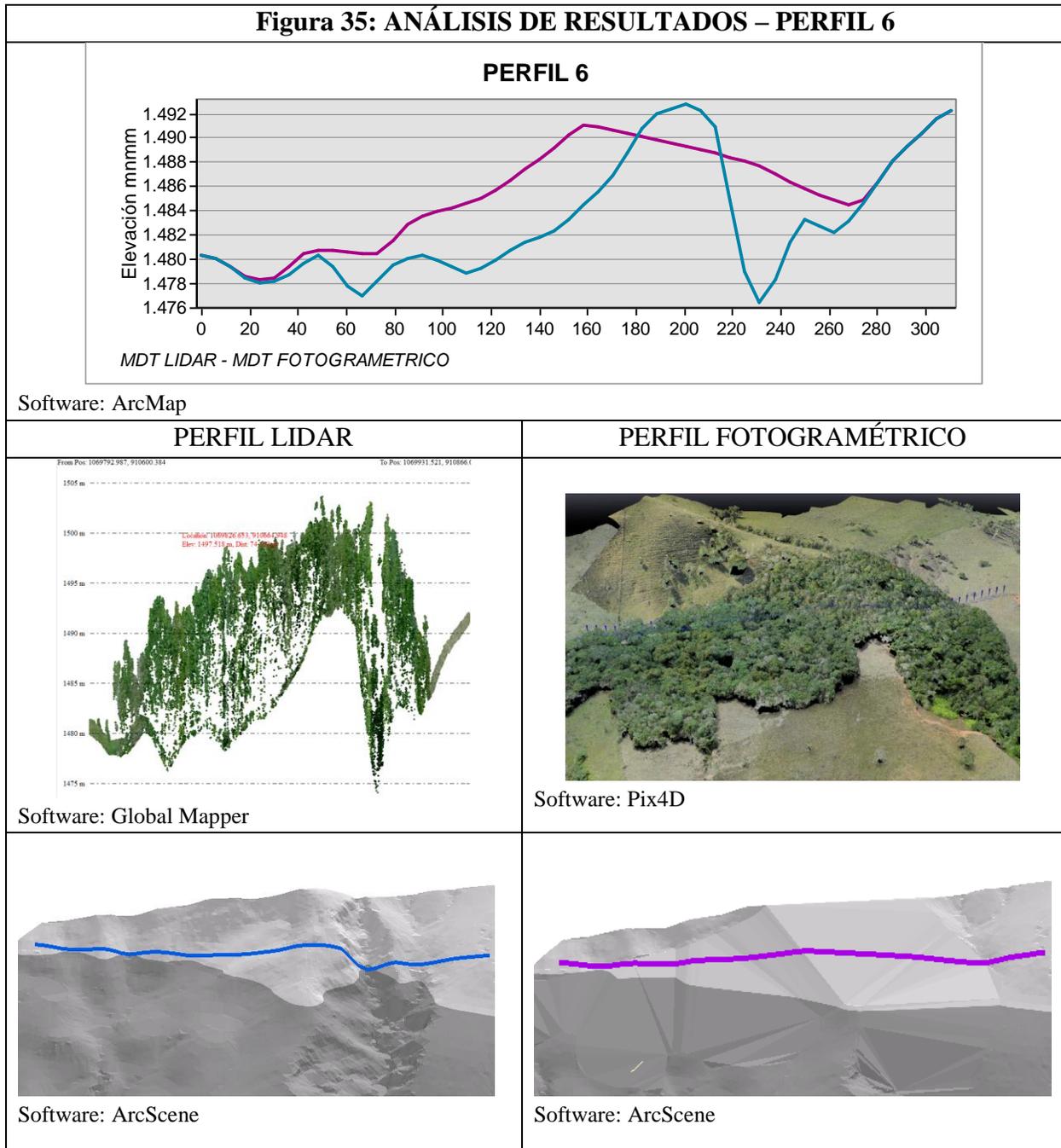


Figura de elaboración propia, 2021.

Las zonas iniciales y finales del perfil muestran que los MDT tienen bastante similitud, se debe a que la superficie del terreno se encuentra expuesta, sin presencia de vegetación. El perfil 6 se traza sobre una zona de bosque denso y de una altura considerable. El perfil azul obtenido del MDT Lidar permite evidenciar los puntos de terreno que se capturaron por medio de la tecnología Lidar aun en zonas de alta montaña. El perfil magenta que se obtiene del MDT fotogramétrico muestra un falso donde usa los píxeles de vegetación como si fueran terreno, las variaciones entre los perfiles se presenta en áreas boscosas.

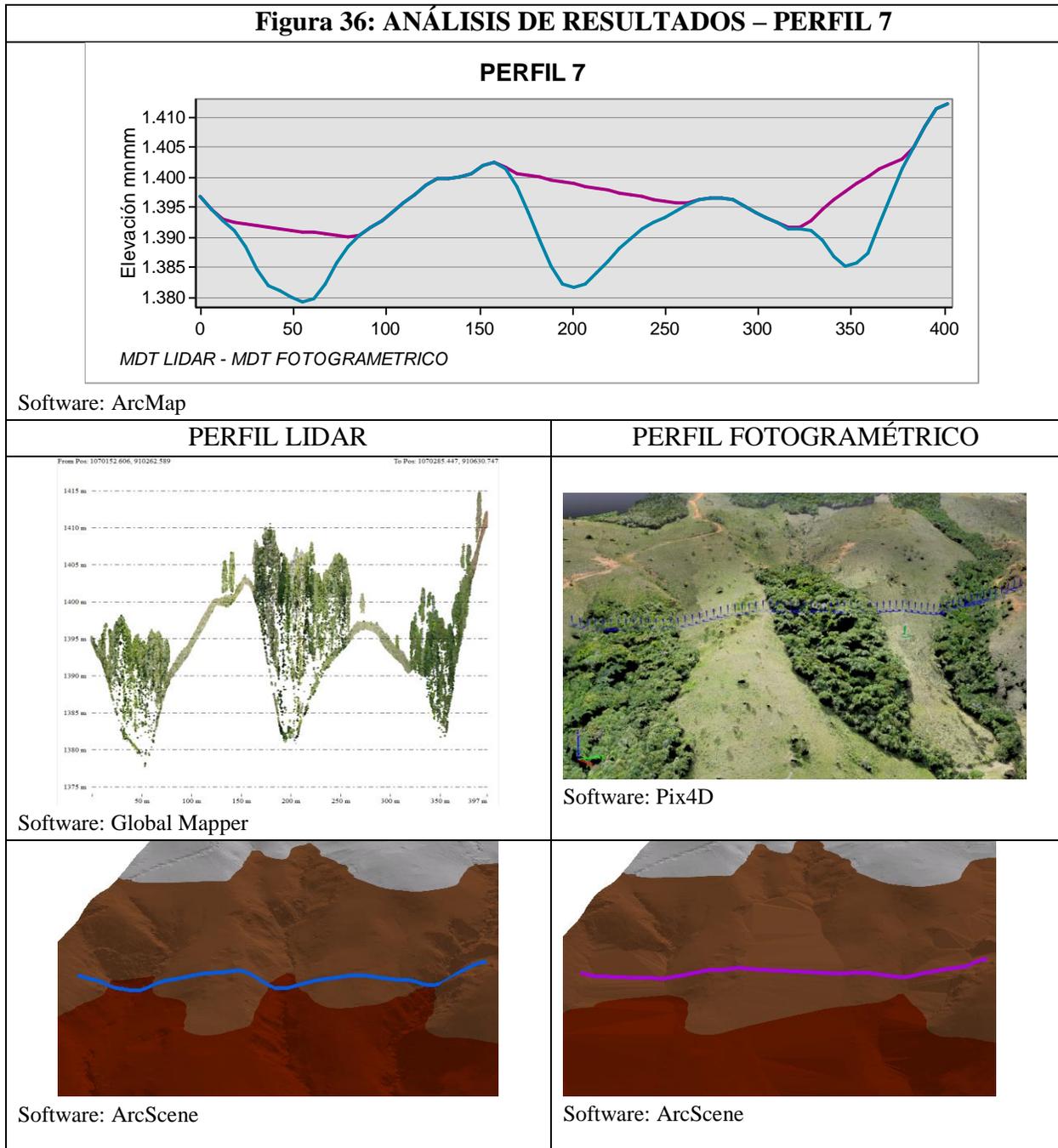


Figura de elaboración propia, 2021.

Las zonas iniciales y finales del perfil muestran que los MDT tienen bastante similitud, se debe a que la superficie del terreno se encuentra expuesta, sin presencia de vegetación. El perfil 7 se traza sobre una zona que presenta bosque denso y suelo descubierto. Los perfiles presentan similitud en las zonas de suelo descubierto. El perfil azul obtenido del MDT Lidar permite evidenciar la cantidad de puntos registrados tanto en áreas descubiertas como en áreas boscosas, a diferencia del perfil azul que se obtiene del proceso fotogramétrico, en este se evidencia un falso terreno por medio de la unión de los últimos puntos encontrados de suelo descubierto.

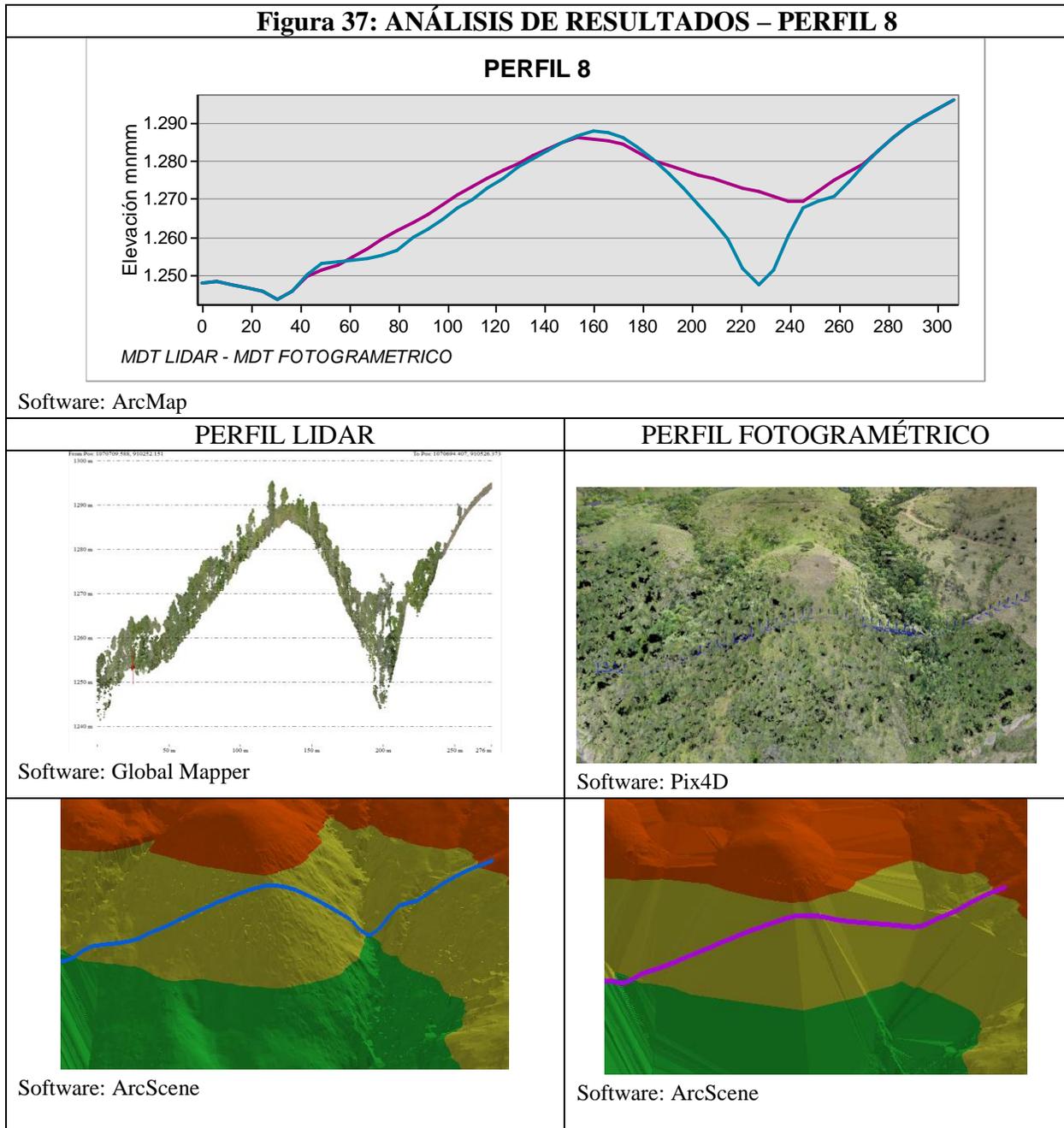


Figura de elaboración propia, 2021.

Las zonas iniciales y finales del perfil muestran que los MDT tienen bastante similitud, se debe a que la superficie del terreno se encuentra expuesta, sin presencia de vegetación. En las distancias de 40 hasta 190 metros, los perfiles presentan una cercanía más no una similitud, se debe a que es un área que presenta bosque medianamente alto y menos denso. En las distancias de 190 hasta 270 metros, se presenta la mayor diferencia entre los perfiles, se debe a la presencia de bosque denso y alto que se presenta en la zona de convergencia de las montañas. El perfil azul resultante del MDT Lidar permite evidenciar la cantidad de puntos capturados por el sensor incluso en la zona más difícil que resulta ser la zona de convergencia de la montaña.

**En las ocho figuras** comparativas se observa de color azul el perfil obtenido del procesamiento de datos Lidar y de color magenta se representan los perfiles obtenidos por procesos fotogramétricos.

En todas las capturas que se realizan a la información Lidar se puede apreciar la gran definición que se obtiene en cuanto a MDT generado, conservando las pendientes, crestas y valles que conforman las áreas montañosas de estudio. Se evidencia el gran número de puntos capturados en terreno y sobre todo aquellos que representan el ground.

Los cinco retornos con los que cuenta el sensor Lidar (Riegl Minivux-1UAV) y la incidencia del láser en la vegetación permite la captura de puntos en el de fondo que representan los cuerpos de agua que se encuentran bajo las zonas montañosas. La obtención de densas nubes de puntos LIDAR que se aprecian en cada una de las figuras que fueron objeto de análisis (Figura 30 a Figura 37) permite evidenciar la representación del terreno.

(Fernández Lozano & Gutiérrez Alonso) Concluyen que la metodología Lidar “permite la generación de modelos digitales de alta resolución con los que analizar la superficie del terreno, facilitando las labores de prospección arqueominera” todo ello debido a la gran cantidad de puntos que se tiene.

En los perfiles de color azul que son extraídos del MDT Lidar es evidente la presencia de vegetación densa y de gran altitud, en cada uno de estos perfiles se obtiene información de terreno, lo cual indica que la tecnología Lidar se puede emplear incluso en aquellas zonas que presentan exceso de vegetación y fuertes pendientes.

**Jairo Díaz Villarraga y Yeismi Paola Galindo** recomiendan “garantizar que los datos LiDAR ajustados tengan una consistencia posicional y altimétrica mediante los puntos de control

geodésicos”, de esta manera se garantiza la confiabilidad de la información dado que presenta una gran densidad de puntos y gran cobertura de área.

Una de las principales empresas en productos de Geomática en Colombia, define los resultados de la tecnología Lidar como: “Eso se debe a que es el mejor método para contabilizar la elevación, la vegetación y las condiciones actuales. La integración de LiDAR con datos GNSS y el hecho de que se trata de una medición directa (que dispara miles de pulsos láser desde arriba) garantizan que su mapa del terreno digital final tenga una precisión vertical extrema. (GEOSYSTEM INGENIERÍA, 2020)

En los perfiles de color magenta que son extraídos del MDT fotogramétrico, se representa muy bien las áreas que se encuentran libres de vegetación, en los lugares que hay presencia de bosque la información que arroja el MDT es errada, se debe al principio fotogramétrico del cual se obtiene la información en formato de pixel. El modelo se obtiene de la triangulación e interpolación que se realiza entre los últimos puntos que se capturaron de terreno, para este caso los últimos puntos de terreno son aquellos próximos a la vegetación.

De esta manera se evidencia que los procesos fotogramétricos no son los más óptimos para generar un MDT en zonas de bosque.

Los procesos incorrectos de filtrado también generan un MDT que no corresponde a la realidad, debido a la incidencia de cualquier pixel que no haya sido filtrado correctamente, el modelo tendrá en cuenta todos los puntos altos y generará un falso terreno donde existe la copa de un árbol.

Uno de los principales limitantes en el proceso fotogramétrico es la vegetación, lo mencionan (Fernández Lozano & Gutiérrez Alonso) en el estudio que realizan para el estudio de interés Geominero donde concluyen que si bien la fotogrametría a partir de drones es novedosa,

presenta algunos aspectos técnicos que comprometen la resolución de los datos y el procesamiento de los mismos. El estudio de este tipo de yacimientos en alta montaña presenta varios desafíos: los rápidos cambios en las condiciones meteorológicas en esas altitudes de trabajo (1.200-2.000 m), la escala del proyecto a realizar, la topografía irregular del área y el exceso de vegetación. (Fernández Lozano & Gutiérrez Alonso)

También recomiendan el uso de tecnología GPS RTK para complementar la información que es capturada por drone fotogramétrico. Diferente de **Katherine Ruth Lesparre** quien menciona como muy buenos los resultados obtenidos de procesos fotogramétricos, en apoyo a análisis de escurrimientos superficiales y se debe a que el vuelo con drone fotogramétrico se realizó sobre una zona urbana donde se tiene plena identificación de la vías y no se cuenta con cobertura vegetal densa.

Dentro de la aplicación de procesos fotogramétricos **Jairo Díaz Villarraga** y **Yeismi Paola Galindo** afirman que “la topografía con dron no es recomendable para trabajos que requieran una alta precisión como lo son los proyectos de infraestructura vial.”

## **7.1 RESULTADO DE ÁREAS DE PÉRDIDA DE INFORMACIÓN**

En las gráficas que se presentan a continuación (Figura 38) se evidencia que del total de la información resultante de MDT Lidar, el 33% corresponde a pérdida de información obtenida por MDT fotogramétrico. Ese 33% equivale a 54.065 Ha de información que no corresponde con la representación matemática del terreno, lo cual implica que no representa de una manera fiable el terreno.

**Figura 38:** Graficos de pérdida de información en MDT Fotogramétrico

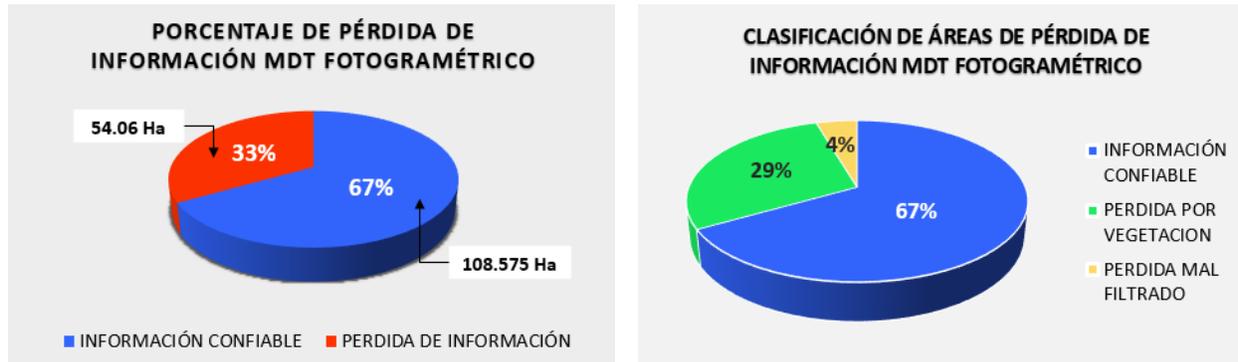


Figura de elaboración propia, 2021.

En el diagrama de barras que se aprecia en la Figura 39, se representan las áreas que se encuentran dentro de los rangos de precisión establecidos. Cada una de las barras corresponde al mismo valor RGB que se tiene en el modelo resultante de la comparación realizada entre MDT Lidar y MDT Fotogramétrico.

En el rango de precisión que se estableció sobre el MDT de comparación, se determinó que los valores que estuvieran entre (-0.05m y 0.05m) eran los valores más cercanos al MDT Lidar, información representada por la barra de color gris; los valores que se encuentran por encima del MDT Lidar son representados por las barras de colores tierra y los valores que se encuentran por debajo del MDT Lidar se representan por las barras de tonalidades verdes, al igual que se encuentra en el MDT obtenido de la comparación.

Las áreas en verde corresponden a zonas de convergencia de terreno, zonas bajas que representan causas de río, cuerpos de agua o laderas entre otros, los cuales se encuentran cubiertas por vegetación y dentro del modelo fotogramétrico esta información suele ser errada.

Las zonas de colores tierra son errores que se cometen a la hora de realizar el proceso de filtrado, corresponde a algunos pixeles altos de vegetación los cuales no son depurados y hace que el MDT a generar los tome como superficie.

**Figura 39:** Cantidad de área por rango de precisión

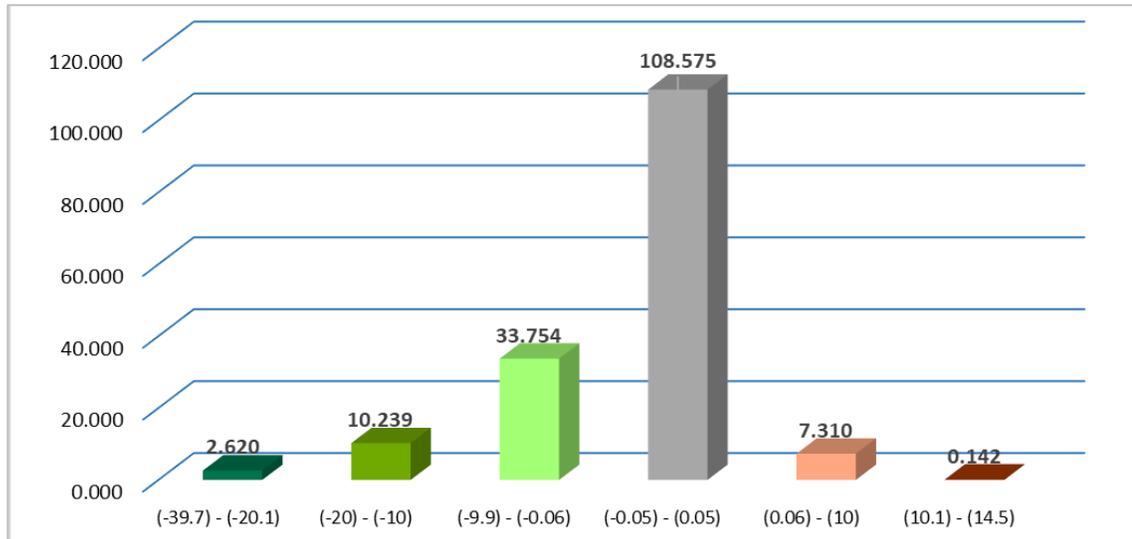


Figura de elaboración propia, 2021.

## 7.2 IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA SEGÚN LA ETAPA DE UN PROYECTO

En la Tabla 6 se sugiere la implementación de cada tecnología según las etapas de un proyecto y tomando como referencia los análisis realizados entre las figuras 30 a 37, al igual que los análisis realizados en el ítem (7.1 RESULTADO DE ÁREAS DE PÉRDIDA DE INFORMACIÓN).

**Tabla 6:** Implementación de tecnología según la etapa de un proyecto.

FASES DE UN PROYECTO	DESCRIPCIÓN DE FASE	APLICABILIDAD DE TECNOLOGIA	
1. PREFACTIBILIDAD	Es el análisis preliminar de la idea de proyecto, donde se evalúa la viabilidad, basados en información secundaria.		Fotogrametría (Drone)
2. FACTIBILIDAD	Etapa de evaluación de proyecto en base a argumentos técnicos y económicos de la cual se define la mejor alternativa, basado en información primaria.	Sensor Lidar no tripulado	Fotogrametría (Drone)
3. INGENIERIA BÁSICA	Análisis detallado de las interrelaciones e interacciones entre los componentes principales, en esta etapa se afirma la compatibilidad y coherencia entre todos los componentes. (Estructuración de planos)	Sensor Lidar no tripulado	Fotogrametría (Drone) + Metodologías convenciones
4. INGENIERIA DETALLE	Planificación y ejecución de la obra basados en la ingeniería básica.	Sensor Lidar no tripulado	Fotogrametría (Drone) + Metodologías convenciones

Tabla de elaboración propia, 2021.

## 8. INDICADORES

### 8.1 EVALUACIÓN DE PRESUPUESTO

Se tiene en cuenta los aspectos mencionados en el numeral (6.10).

**Tabla 7:** *Evaluación de presupuesto*

EMPRESA	COSTO PROYECTO DRONE LIDAR	COSTO PROYECTO DRONE FOTOGRAFOMETRICO	DIFERENCIA EN PRECIO	DIFERENCIA EN %
SAR INGENIERIA	\$29'000.000	\$20'000.000	\$9'000.000	31%

Figura de elaboración propia, 2021.

La diferencia en costo de la obtención de MDT Lidar versus MDT Fotogramétrico es tan solo del 31%, siendo más costoso el MDT Lidar.

Según el análisis económico que realizan **Jairo Díaz Villarraga** y **Yeismi Paola Galindo** “entre la topografía convencional y la topografía con dron la diferencia en precio varía entre el 11.0 % al 30.0% estas diferencias no son significativas en precio para un kilómetro, pero es importante mencionar que la diferencia en cuanto precisión entre estos dos metodologías es considerable” y el resultado de “La comparación de los costos entre topografía convencional y LiDAR es considerable y está en un rango entre el 217% y el 350% para un kilómetro de vía”.

Se debe acotar que la metodología Lidar expuesta por ellos se lleva a cabo en una aeronave tripulada, la cual tiene costos más elevados.

### 8.2 EFECTIVIDAD, PRECISIÓN Y EXACTITUD - LIDAR

Debido a la altura de vuelo que se emplea en los vuelos Lidar se cuenta con más pasadas sobre el terreno, lo cual se traduce en mayor cobertura de nubes de puntos Lidar y a su vez permite tener menos pérdida de información en el área de interés.

Contar con referenciación GPS GNSS, corrección con efemérides precisas, IMU de diversas fuentes, hace que se tenga una similitud del modelo matemático con respecto al terreno real.

### 8.3 TIEMPOS

Para la realización de los trabajos de campo con Sensor Lidar Drone se requiere de una base en tierra para instalar una antenas GNSS, luego de ello se realizan los vuelos. Cada vuelo requiere de una base en campo, pero la misma base se puede emplear en varios vuelos, depende de la distancia que hay entre base y diseño de vuelo.

El drone que soporta al sensor Lidar drone es lo suficientemente robusto para poder transportarlo y realizar la misión sin ningún contratiempo, consta de seis batería las cuales después de cada misión deben ser cargadas, ello requiere de tiempo y una fuente para poder realizar la recarga. Las seis batería son empleadas en un vuelo y se cuenta con dos juegos de baterías ellos hace que las operaciones en zona de montaña sean un poco dispendiosas.

Para la realización de los vuelos Fotogramétricos se requiere de un control en campo, para ello se realiza una marcación que requiere de tiempo y desplazamiento hacia cada uno de los lugares establecidos como PC. Dadas las condiciones difíciles del terreo es un aspecto que afecta los tiempos para el desarrollo del proyecto. El drone eBee se alimenta de una batería por cada vuelo y el equipo cuenta con 7 baterías, eso sumado a que es muy liviano y fácil de transportar hace que la realización de los vuelos sea más factible.

En procesamiento de datos se requiere menos tiempo para la clasificación de datos Lidar, ya que las macros que se emplean permiten reconocer los retornos del sensor, posteriormente se realiza un proceso de control de calidad.

En cuanto al filtrado de información fotogramétrica se tiene que es un proceso más lento, ya que se deben tener en cuenta todos los píxeles que se encuentran por encima del terreno, se deben cubrir con un polígono que hace las veces de superficie y logra que esos píxeles no se tengan en cuenta a la hora de generar el MDT. No se recomiendan procesos de filtrado automático para nubes de puntos fotogramétricos ya que genera bastantes errores en la información final, de emplearse se debe realizar un chequeo exhaustivo de la superficie de terreno generada.

**Figura 40:** *Estimación de tiempos*



Figura de elaboración propia, 2021.

Como se muestra en la figura anterior, las actividades son similares pero en definitiva arroja menor tiempo de ejecución los vuelos con sensor Lidar.

## 9. CONCLUSIONES

Se obtiene un MDT de vuelo Lidar, el cual presenta gran cantidad de puntos capturados que a su vez se ven reflejados en la gran definición que tiene el modelo matemático, también el MDT resultante del proceso fotogramétrico y este presenta menor definición y menor similitud con el terreno real.

La cantidad de retornos en un sensor Lidar, representa una mayor captura de puntos que a su vez representa mayor definición en la información recolectada y mayor precisión. Es el caso de los 8 perfiles generados y expuestos, donde se evidencia la gran cantidad de puntos Lidar recolectados aun en zonas de bosque alto y de gran densidad, que permiten obtener un MDT confiable el cual representa el terreno real.

Una vez se realiza la comparación entre el MDT Lidar versus el MDT Fotogramétrico se evidencia gran pérdida de información en la nube de puntos fotogramétrica que corresponde a un 33% con respecto a la nube de puntos Lidar. Esta pérdida de información se da principalmente en las zonas que presentan área de bosque denso o vegetación arbustiva que corresponde al 29%, y un pequeño porcentaje de pérdida de información que corresponde a lugares mal filtrados con un 4%.

La comparación por medio de perfiles, permitió identificar las diferencias que se tienen entre los dos modelos cuando hay presencia de bosque. Se evidenció una pérdida significativa de información en los perfiles que se generaron sobre el MDT fotogramétrico, esto se traduce en un MDT que contiene información errada; diferente de los perfiles que se obtuvieron del MDT Lidar, los cuales presentaron gran definición en la modelación del terreno y no se encontraron zonas sin información debido a la gran cantidad de puntos capturados por el sensor Lidar.

En la toma de información Lidar se capturan aproximadamente 100 puntos por metro cuadrado y la incidencia de los retornos en medio de la vegetación permite tener una muy buena representación del terreno, diferente del proceso fotogramétrico donde se cuenta con valores de pixel extraídos de una fotografía, donde la información que predomina es el pixel superficial y en zonas boscosas genera vacíos en la información que corresponde a la superficie del terreno.

La implementación del objeto de uso de la información es la que permite determinar si esa pérdida de información es relevante o no, también es importante conocer la etapa del proyecto en la cual se va a emplear el insumo MDT para saber si la metodología empleada es la adecuada o no.

Como se evidenció en cada uno de los análisis explicativos que se realizaron a las figuras en mención, se logra definir que la información obtenida por medio de Sensor Lidar no tripulado resulta ser muy precisa, veraz, confiable y que además permite la generación de un MDT muy cercano a la realidad en un menor tiempo a un costo mayor que finalmente se verá reflejado en ganancia de tiempo y calidad de información.

Si bien el análisis de los costos arrojó que el procedimiento con sensor Lidar tiene un mayor costo, también presenta mayores beneficios en tiempos y uso de la información para otras etapas de un proyecto, lo que finalmente se puede reflejar como un beneficio económico y productivo dentro de un proyecto.

## 10. RECOMENDACIONES

1. La escogencia de la tecnología se debe basar en el objeto de uso y/o estudio que se desee realizar con ayuda del MDT.
2. Si se desea obtener MDT por procesos Fotogramétricos de una zona boscosa o que tenga algún tipo de cobertura sobre el suelo que no permita la plena identificación del mismo, se deben emplear metodologías complementarias para la fiabilidad de la información. Se puede emplear topografía convencional o si es posible RTK.
3. Para vuelos fotogramétricos que se realicen en zonas de montaña, se recomienda marcar los puntos de control en zonas altas y bajas del terreno para poder generar un buen ajuste a la nube de puntos.
4. Realizar buenas prácticas a la hora de implementar la tecnología Lidar en cualquier tipo de terreno, permitirá la obtención de un MDT muy confiable y que puede ser empleado en varias etapas de un proyecto.
5. El punto base empleado donde se coloca la antena GNSS en tierra para el desarrollo de los vuelos Lidar, no debe estar a más de 3 Km de radio de distancia con respecto al área de vuelo. En tal caso que exceda la distancia se debe emplear un nuevo punto base y realizar un segundo vuelo complementario.
6. Realizar un control a la información obtenida después de ejecutar procesos automáticos que ofrecen diferentes software, más si se trata de información resultante de vuelo fotogramétrico.
7. En los dos casos se requieren de condiciones climáticas favorables ya que no se pueden realizar vuelos si se presentan lloviznas o niebla.

8. Para realizar los vuelos, cualquiera que sea la metodología escogida, se deben contar con los permisos pertinentes por arte de la aeronáutica civil de Colombia.
9. Ejercer buenas prácticas de trabajo, donde se establecen los parámetros de vuelo de acuerdo a aspectos como escala, precisión y condiciones topográficas del terreno, permiten obtener una gran definición en la nube de puntos resultante.

## 11. REFERENCIAS

- Aerial-insights. (2019). *Aerial-insights*. Obtenido de <https://www.aerial-insights.co/blog/puntos-de-control/>
- AeroEXPO. (2021). *Tubo de Pitot recto*. Obtenido de <https://www.aeroexpo.online/es/prod/uav-factory-ltd-europe/product-174156-28143.html>
- Alcaldía municipal de Yotoco. (2 de 11 de 2021). *Alcaldía municipal de Yotoco*. Obtenido de <http://www.yotoco-valle.gov.co/>
- Alonso, F. (2006). *Sistemas de Información Geográfica*. Obtenido de <https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node53.html>
- Alvarez, D. A. (2008). *Sistema GNSS (GLOBAL NAVIGATION STELLITE SYSTEM)*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- ARISTA SUR. (12 de Abril de 2019). *Que es el sistema de posicionamiento GLONASS*. Obtenido de <https://www.aristasur.com/contenido/que-es-el-sistema-de-posicionamiento-glonass>
- CEMEX. (2020). *Oferta de valor BIM*. Obtenido de <https://www.cemexcolombia.com/bim>
- Coatza Drone. (01 de 09 de 2019). *Para que sirve el traslape en Fotogrametría con RPAS*. Obtenido de <https://medium.com/@coatzadroneoficial/para-que-sirve-el-traslape-en-fotogrametr%C3%ADa-con-rpas-2949b2ddf21b>
- Collector for ArcGIS. (2018). *Receptores de alta precisión*. Obtenido de Receptores de alta precisión: <https://doc.arcgis.com/es/collector/android/create-maps/gps-high-accuracy-receivers.htm>
- Conde, D. (2021). *APD Profesionales en drones*. Obtenido de <https://apd.org/capitulo-1-que-es-un-drone/>
- Definicion.de. (2021). *Definición de RGB*. Obtenido de <https://definicion.de/rgb/>

Díaz Villarraga, J., & Galindo, Y. (s.f.). *CRAIUSTA*. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/10739>

DJI ENTERPRISE. (09 de 08 de 2019). *Que es el famoso RTK y para que sirve*. Obtenido de <https://www.djienterprisemexico.com/post/qu%C3%A9-es-el-famoso-rtk-y-para-qu%C3%A9-sirve>

ESRI. (2016). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de Acerca de la exactitud: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/editing-parcels/about-accuracy-in-the-parcel-fabric.htm>

ESRI. (2019). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de ¿Que son los datos Lidar?: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>

ESRI. (2019). *Tipos de LIDAR*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/types-of-lidar.htm>

Felicísimo, A. M. (2019). *La utilización de los MDT en los*. Obtenido de [https://www6.uniovi.es/~feli/pdf/ITGE\\_150a.pdf](https://www6.uniovi.es/~feli/pdf/ITGE_150a.pdf)

Fernández Lozano, J., & Gutiérrez Alonso, G. (s.f.). *Actas de las v Jornadas de Jóvenes Investigadores del valle del Duero*. Obtenido de [file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Dialnet-UsodeLidarYAeronavesNoTripuladasParaLaCartografiaY-6049806%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Dialnet-UsodeLidarYAeronavesNoTripuladasParaLaCartografiaY-6049806%20(2).pdf)

FisicaLab. (2021). *FisicaLab*. Obtenido de <https://www.fisicalab.com/apartado/medidas-precision>

Geo Innova. (28 de 01 de 2021). Obtenido de <https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sistema->

lidar/?gclid=Cj0KCQjwu7OIBhCsARIsALxCUaOVR4L139iDBoY16f6F\_lc8QOV01dG  
Nr2bepLGAgrdIOqIQW\_hf\_-8aAoxWEALw\_wcB

Geograf. (13 de 02 de 2006). *5 Aplicaciones de los MDT*. Obtenido de  
<https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node53.html>

GEOMATICA. (1 de Noviembre de 2015). *Geomática*. Obtenido de  
<http://geomaticssearch.blogspot.com/2015/11/correlacion-de-imagenes-en.html>

GEOSYSTEM INGENIERÍA. (2020). *LIDAR VS FOTOGRAFIA PARA TOPOGRAFIA  
AEREA*. Obtenido de [https://www.geosysteming.com/sistemas-uav/lidar-vs-  
fotogrametria-para-topografia-aerea/](https://www.geosysteming.com/sistemas-uav/lidar-vs-fotogrametria-para-topografia-aerea/)

Global. (s.f.). *Aerotriangulación en cartografía*. Obtenido de  
<https://www.globalmediterranea.es/aerotriangulacion-en-cartografia/>

Glosarios.servidor-alicante. (07 de 01 de 2018). *Glosarios.servidor-alicante*. Obtenido de  
[https://glosarios.servidor-alicante.com/topografia-geodesia-gps/estacion-de-control-  
estacion-base](https://glosarios.servidor-alicante.com/topografia-geodesia-gps/estacion-de-control-estacion-base)

Gobernacion del Valle del Cauca. (2020). *Valle Invencible*. Obtenido de  
<https://www.valledelcauca.gov.co/>

ICGC. (2020). *Gencat Instituto Cartografico y Geografico de Catalunya*. Obtenido de  
[https://www.icgc.cat/es/Web/Ayuda/Preguntas-frecuentes/Diferencias-entre-fotografia-  
aerea-y-ortofoto](https://www.icgc.cat/es/Web/Ayuda/Preguntas-frecuentes/Diferencias-entre-fotografia-aerea-y-ortofoto)

IDECA. (2018). *Red Geodesica*. Obtenido de [https://www.ideca.gov.co/recursos/glosario/red-  
geodesica](https://www.ideca.gov.co/recursos/glosario/red-geodesica)

IDS. (18 de 11 de 2020). *Diferencias entre modelos digitales de terreno*. Obtenido de  
<https://www.idstopografia.com/diferencias-entre-los-modelos-digitales-de-terreno/>

Inegi.org.mx. (s.f.). *Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (22 de 02 de 2018). Obtenido de <https://www.igac.gov.co/es/contenido/que-es-la-fotogrametria>

JSAIZ. (18 de Septiembre de 2019). *Historias de un piloto ULM*. Obtenido de Elevación, Altura y Altitud: <http://ulm.informaticacotidiana.com/2019/09/18/elevacion-altura-y-altitud-diferencias/>

Juarez, J. A. (2019). *USAC*. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/13962/>

Lesparre Almada, K. R. (2020). *Colibri*. Obtenido de <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/23852>

Lesparre, K. R. (Marzo de 2020). *Universidad de la República*. Obtenido de <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/23852/1/Les20.pdf>

Mejia Gutierrez, A. O. (2007). *Cuaderno de Altimetria*. Medellin: Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellin.

Mercedes Farjas, E. M. (Mayo de 2011). *La realidad virtual y el análisis científico: De la nube de puntos al documento analítico*. Obtenido de Universidad Politecnica de Madrid España: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/139382/Farjas%3bMoreno%3bGarc%c3%ada%20-%20La%20realidad%20virtual%20y%20el%20an%c3%a1lisis%20cient%c3%adfico%3a%20De%20la%20nube%20de%20puntos%20al%20docu....pdf?sequence=1&isAllowed=>

y

- Ortega, I. J. (2019). *Comparacion de modelos digitales de terreno generados a traves de tecnologia lidar y topografia convencional en proyectos de infraestructura vial en Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- PEÑA, J. S., & SANS, T. (2005). *Manual de prácticas de topografía y cartografía*. España: Universidad de La Rioja.
- Perez Cruz, F. (2019). *Aplicación del uso de RPA'S (drones) en la explotacion de canteras y explotaciones a cielo abierto*. Santander: Universidad de Cantabria.
- Recalde, E. (s.f.). *Metodologia de Planificación Minera a Corto Plazo y Diseño Minero a Mediano Plazo en la Cantera Pifo*. Obtenido de Revista Tecnologica de la ESPOL:  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/218/1/340.pdf>
- RIEGL. (06 de 10 de 2020). *RIEGL\_miniVUX-1UAV\_Datasheet*. Obtenido de [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/RIEGL\\_miniVUX-1UAV\\_Datasheet\\_2020-10-06.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_miniVUX-1UAV_Datasheet_2020-10-06.pdf)
- RIEGL. (2021). *RIEGL Laser Measurements System*. Obtenido de <http://www.riegl.com/products/unmanned-scanning/riegl-minivux-1uav/>
- Rodriguez, U. (Febrero de 2021). Definición de conceptos. Bogotá.
- Sánchez García, J. (2012). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Universidad de Sevilla*. Obtenido de [https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/40346/PFC\\_Jesus\\_Sanchez\\_Garcia.rar?sequence=1](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/40346/PFC_Jesus_Sanchez_Garcia.rar?sequence=1)
- Sensefly. (2021). *my.sensefly.com*. Obtenido de <https://my.sensefly.com/>
- Space-Based positioning Navigation & Timing. (s.f.). *GPS.GOV*. Obtenido de <https://www.gps.gov/spanish.php>

Suarez, J. C. (2018). *LAGE*. Obtenido de [https://www.lage.com.mx/equipo-de-computo-para-empresas#6\\_workstation\\_o\\_estaciones\\_de\\_trabajo](https://www.lage.com.mx/equipo-de-computo-para-empresas#6_workstation_o_estaciones_de_trabajo)

Villen, N. G. (9 de Septiembre de 2014). *Sistemas GNSS. Introducción a los sistemas de posicionamiento global*. Obtenido de <https://nagarvil.webs.upv.es/sistemas-gnss-introduccion/>

Wikipedia. (12 de 08 de 2018). *wikipedia.org*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Apulo>

Wikipedia. (08 de 06 de 2021). *Precision y exactitud*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n\\_y\\_exactitud](https://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n_y_exactitud)

Wikipedia. (2 de Julio de 2021). *Unidad de medicion incercial*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Unidad\\_de\\_medici%C3%B3n\\_inercial](https://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_de_medici%C3%B3n_inercial)