

**Metodología para generación de Modelos Digitales de Terreno Topobatimétricos a partir  
de integración de datos de sensores remotos LiDAR aéreo, Ecosonda Monohaz y  
Topografía Convencional usando herramientas SIG**

Luis Enrique Arias Martínez & Jose Luis Mesa Torres  
Junio de 2020

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Ambiental  
Especialización en Sistemas de Información Geográfica  
Monografía



A Dios primeramente que con su bondad y su amor nos ha permitido recorrer este gran camino de aprendizaje y sabiduría, quien nos demuestra que con paciencia, esfuerzo, sacrificio y perseverancia se alcanzan las metas que alguna vez nos propusimos cumplir. Gracias Dios por darnos la alegría de culminar un logro más en nuestras vidas.

A mis padres, por su apoyo incondicional en cada momento, por su sacrificio y esfuerzo, por creer en nosotros y en nuestras capacidades, por su comprensión, cariño y amor.

Al director de Trabajo de grado, Dr. Juan Pablo Rodríguez gracias por el tiempo, la guía en el proceso, comprensión y colaboración al realizar el proyecto de grado el cual ha sido de gran aprendizaje.

A mi compañero y amigo José Luis Mesa, por su amistad y por la entrega en el desarrollo de este trabajo de grado. Y finalmente a todas aquellas personas que intervinieron de una u otra manera en este enriquecedor proceso, a los docentes de la Universidad Antonio Nariño por sus enseñanzas y su pasión por la actividad docente.

Luis Enrique Arias Martínez

En primer lugar, a Dios quien es mi guía y mi apoyo en los logros conseguidos en vida a nivel personal y profesional, quien me ha ayudado a superar todas las pruebas que se han presentado en el camino y me reconforta en tiempos de tribulación que actualmente estamos viviendo.

A mis padres los cuales me han brindado su apoyo incondicional en todas las decisiones que<sup>iv</sup> he tomado y que, a pesar de la distancia, no nos hemos dejado solos ni un solo momento.

A nuestro director de Tesis, Dr. Juan Pablo Rodríguez por sus comentarios y sugerencias en el desarrollo de este proyecto, los cuales fueron de gran utilidad para su culminación.

A mi compañero y amigo Luis Arias con quien hemos compartido nuestras etapas académicas de pregrado y postgrado, el desarrollo de diversos proyectos en la vida laboral y la ejecución de esta tesis para conseguir un nuevo logro a nivel profesional.

Por último, al ingeniero Cesar Pico por facilitarnos la información para el desarrollo de este proyecto. Y a todas las demás personas que nos apoyaron de inicio a fin para culminar este logro, mis compañeros de clase y los docentes de la Universidad Antonio Nariño que nos acompañaron en este proceso.

Jose Luis Mesa Torres

El siguiente proyecto presenta una Metodología para el desarrollo de Modelos Digitales de Terreno Topobatimétricos a partir de la información capturada por tecnología LiDAR aéreo, datos topográficos capturados por tecnología GNSS y datos batimétricos recopilados por Ecosonda Monohaz, los cuales fueron suministrados por la empresa INCIGE SAS. La información proporcionada tiene una extensión de aproximadamente 500 metros longitudinales y 200 metros transversales en una sección del río Bogotá, en el municipio de Cota Cundinamarca.

Inicialmente, los datos crudos capturados por el sensor remoto LiDAR se procesan, georreferencian y clasifican la nube de puntos de acuerdo con la cobertura existente en el área del proyecto y, posteriormente, transforman la elevación de tipo elipsoidal a ortométrica. La información topográfica recolectada por la técnica RTK se georreferencia a partir de una base estática y luego se calculó su altura ortométrica a partir de la metodología desarrollada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi para la determinación de alturas ortométricas, esta información se verificó a partir de trabajos de nivelación geométrica para garantizar la precisión vertical de la información recopilada. Finalmente, se filtró y determinó la profundidad de la información batimétrica capturada a través de Ecosonda Monohaz.

Los datos procesados se integraron utilizando el software Global Mapper, que permite la manipulación de la información obtenida, para obtener un MDT Topobatimétrico y lograr resoluciones espaciales de 50 cm con un error promedio de 3 cm en elevación.

Palabras Clave: MDT, LiDAR, RTK, Batimetría, Topobatimétrico

## **Abstract**

The following project presents a Methodology for the development of Digital Topobathymetric Terrain Models from information captured by airborne LiDAR technology, topographic data collected by GNSS technology and bathymetric data collected from Monohaz echo sounder, which were supplied by the company INCIGE SAS. The information provided has an extension of approximately 500 longitudinal meters and 200 transverse meters on a section of the Bogotá River, in the municipality of Cota Cundinamarca.

Initially, the raw data collected by the remote LiDAR sensor is processed, georeferencing and classifying the point cloud according to the existing coverage in the project area and subsequently transforming the elevation from ellipsoidal to orthometric type. The topographic information collected by the RTK technique was georeferenced from a static base and later its orthometric height was calculated from the methodology developed by the Agustín Codazzi Geographical Institute for the determination of orthometric heights, this information was verified from works of geometric leveling in order to guarantee the vertical precision of the information gathered. Finally, the depth of the bathymetric information captured through a Monobeam echo sounder was filtered and determined.

The processed data were integrated using the Global Mapper software, which allows manipulation of the information obtained, to obtain a Digital Topobathymetric Terrain Model with a spatial resolution of 50 cm and an average error of 3 cm in elevation.

**Key Words:** MDT, LiDAR, RTK, Bathymetry, Topobathymetric

## Tabla de Contenido

vii

Capítulo 1. Introducción .....	1
Planteamiento de Problema.....	2
Justificación .....	4
Objetivos.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos.....	5
Área de estudio .....	5
Capítulo 2. Marco Teórico.....	6
Estado del Arte.....	6
Modelo Digital de Terreno Topobatimétrico.....	8
LiDAR.....	9
Ecosonda.....	10
Levantamiento Topográfico.....	11
Levantamiento Batimétrico.....	13
Nivelación Geométrica .....	14
Capítulo 3. Metodología .....	16
Captura de Información .....	17
Topografía GNSS.....	17
Nivelación Geométrica .....	19
Batimetría.....	20
LiDAR.....	22
Procesamiento de Información .....	24
Datos GNSS .....	24
Datos de Nivelación Geométrica .....	33
Cálculo de alturas ortométricas para Levantamiento GNSS.....	36
Ecosonda Monohaz.....	38
Clasificación de Nube de Puntos LiDAR .....	45
Corrección de Altura de nube de puntos LiDAR.....	49
Generación de Modelo Digital de Terreno Topobatimétrico.....	56
Capítulo 4. Resultados y Análisis .....	68
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones .....	73
Referencias.....	76

Tabla 1. Estado del arte.....	6
Tabla 2. Coordenadas puntos de amarre del proyecto época 2018.0.....	29
Tabla 3. Coordenadas levantamiento RTK.....	30
Tabla 4. Ejemplo datos de nivelación de precisión.....	34
Tabla 5. Circuitos de nivelación con diferenciales de error.....	36
Tabla 6. Cálculo de cotas ortométricas levantamiento RTK .....	38
Tabla 7. Diferencias entre RTK y Nube de puntos LiDAR ortométrica .....	54

**Lista de Ilustraciones**

Ilustración 1. Localización de la zona de estudio .....	5
Ilustración 2. Esquema de posicionamiento estático diferencial .....	12
Ilustración 3. Esquema de levantamiento RTK .....	13
Ilustración 4. Esquema de levantamiento ecosonda .....	14
Ilustración 5. Esquema de nivelación compuesta .....	15
Ilustración 6. Diagrama de flujo Metodología para Generación de DTM Integrados .....	17
Ilustración 7. Funcionamiento de Ecosonda .....	21
Ilustración 8. Esquema de determinación de bases GPS .....	25
Ilustración 9. Esquema de determinación de Puntos GPS-01 y GPS-02 .....	27
Ilustración 10. Ventana Cálculo de Velocidades Magna Pro 4.2 .....	28
Ilustración 11. Vectores definidos entre Base y Móvil del levantamiento RTK .....	30
Ilustración 12. Localización de Líneas de nivelación.....	35
Ilustración 13. Esquema de determinación de la altura de puntos contenidos en un perfil .....	37
Ilustración 14. Interfaz de configuración en origen Magna Central .....	39
Ilustración 15. Líneas batimétricas levantadas mediante Ecosonda Monohaz .....	40
Ilustración 16. Creación de archivo de mareas .....	41
Ilustración 17. Selección de líneas de medición crudas.....	42
Ilustración 18. Importación de archivos de mareas .....	42
Ilustración 19. Ventana de proceso y edición de datos batimétricos .....	43
Ilustración 20. Suavizado de información batimétrica .....	44
Ilustración 21. Ventana de exportación .....	45
Ilustración 22. Mapa de datos LiDAR sin Clasificar.....	46
Ilustración 23. Mapa de datos LiDAR visualizado por Elevación.....	47
Ilustración 24. Clasificación de Coberturas a partir de Imágenes .....	48
Ilustración 25. Mapa de datos LiDAR Clasificado.....	49
Ilustración 26. Esquema de tipos de alturas.....	50
Ilustración 27. Mapa de Ondulaciones Geoidales Locales para la zona del proyecto .....	51
Ilustración 28. Mapa de Nube de puntos LiDAR sobrepuesta en el modelo geoidal .....	52
Ilustración 29. Nube de puntos de datos RTK junto con nube de puntos LIDAR.....	53
Ilustración 30. Superficie preliminar generada con datos LiDAR.....	54
Ilustración 31. Configuración ventana de importación de datos LiDAR.....	57
Ilustración 32. Ejemplo archivo de coordenadas batimétricas en formato plano .....	58
Ilustración 33. Configuración ventana de importación datos batimétricos.....	58
Ilustración 34. Configuración de proyección Global Mapper datos de Ecosonda.....	59

Ilustración 35. Nubes de puntos LiDAR y Batimétrica en Global Mapper .....	60ix
Ilustración 36. Acercamiento a zonas de gaps entre LiDAR y Batimetría .....	61
Ilustración 37. Delimitación de cuerpo de agua.....	62
Ilustración 38. Interfaz ventana de creación de superficie.....	63
Ilustración 39. Pestañas de Mosaico y Corte .....	64
Ilustración 40. Resultado de Triangulación Batimétrica.....	65
Ilustración 41. Ventana de exportación y definición de espaciamiento de la grilla .....	66
Ilustración 42. LiDAR con malla batimétrica.....	66
Ilustración 43. TIN generado .....	67
Ilustración 44. Configuración de exportación del MDT.....	70
Ilustración 45. MDT Topobatimétrico Final.....	71
Ilustración 46. Modelo 3D .....	72
Ilustración 47. Mapa Temático Modelo Digital de Terreno Topobatimétrico.....	72

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una herramienta primordial con la cual se puede obtener información de la superficie de la tierra y poder analizar distintas características de su morfología. Un correcto diseño de un MDT brinda una gran diversidad de variables y aspectos de análisis con los cuales es posible trabajar información relacionada con los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Existen distintos métodos o técnicas para la elaboración de los modelos; por medio de sensores remotos (tecnologías LiDAR aéreos y terrestres), datos directos obtenidos de campo (topografía convencional, posicionamientos GPS, levantamiento RTK) y levantamientos batimétricos.

Este tipo de productos permiten alcanzar resultados con una alta densidad de puntos que se obtienen con excelente precisión horizontal y vertical; logrando que la información capturada discrimine elementos finos como líneas de transmisión eléctrica e incluso las demarcaciones viales. Adicional a esto ambos sensores tanto el LiDAR como la ecosonda son clasificados como activos, ya que el primero cuenta con su propia fuente de energía y el segundo al ser un sensor acústico permiten realizar la captura de la información en cualquier momento del día.

Los modelos generados con estas tecnologías permiten obtener representaciones ideales del terreno levantado, los cuales pueden ser usados posteriormente para proyectos de ingeniería, permitiendo una facilidad en los diseños, cálculos de volúmenes más precisos comparados con información de topografía convencional y la optimización en los levantamientos de grandes extensiones que permiten analizar los cambios temporales, entre otras aplicaciones.

El presente trabajo se enfoca en la realización de una metodología para la generación de Modelos Digitales de Terreno Topobatimétricos en formato Ráster, generado a partir de la

integración de los datos de topografía convencional, batimetría a una sección del río Bogotá 2  
realizada con tecnología Monohaz y, por último, datos obtenidos por un sensor LiDAR aéreo.

Para cumplir con el objetivo del proyecto, este documento está seccionado de la siguiente manera, este primer capítulo está referido a la presentación del trabajo, la problemática existente en cuanto a la necesidad de la realización de una metodología de fácil interpretación para los usuarios que requieran crear MDT con datos de información capturada por sensores remotos a partir de software SIG de fácil acceso como Global Mapper, el propósito y los objetivos de realizar este proyecto, así como la descripción del área de estudio.

El segundo capítulo describe el marco teórico del documento, el este se encuentra el estado del arte en donde se observan los antecedentes de proyectos relacionados con el tema y los conceptos de los distintos procesos que fueron llevados a cabo para el desarrollo del proyecto.

El tercer capítulo realiza un acercamiento a la metodología que se llevó a cabo para cada uno de los procesos con el fin de obtener los insumos necesarios para realizar la integración y describir la metodología para obtener el resultado final.

El cuarto capítulo, presenta el resultado obtenido y los análisis del producto obtenido y, por último, en un quinto capítulo, se mencionan las conclusiones del trabajo y recomendaciones para posteriores proyectos en donde se empleen estos dos sensores.

## **Planteamiento de Problema**

Los modelos digitales de terreno (MDT) son una herramienta muy útil para lograr representar de manera digital las distintas características de la superficie de la tierra con precisiones muy altas. Estos generalmente son archivos que se encuentran en formato ráster y son obtenidos a

partir de la captura de datos utilizando técnicas convencionales y/o tecnologías LiDAR (sea este <sup>3</sup> terrestre y/o aéreo) y barridos batimétricos utilizando ecosondas.

Los MDT construidos a partir de datos de topografía convencional presentan dificultades en cuanto los tiempos de toma de datos y procesamiento, así como la densidad de la información capturada que es mucho menor a la suministrada por levantamientos por sensores remotos. Esto conlleva a que los modelos generados por técnicas convencionales presenten problemas de precisión ya que únicamente se garantizan los datos capturados en campo y la triangulación de dicha información en ocasiones se vuelve ficticia en cuanto a mayor sea la distancia entre los puntos capturados, y por lo tanto la resolución espacial de esta información es muy baja y puede presentar problemas para proyectos futuros en dónde los MDT sean un insumo inicial. Una solución que permite optimizar este tipo de proyectos es el de realizar la captura de la información de la superficie terrestre con tecnologías de sensores remotos con el fin de contar con una alta densidad de puntos que permitan mejorar la resolución espacial del producto.

Una vez procesados estos datos obtenidos de campo, integrarlos de la manera más adecuada se convierten en el insumo apropiado para realizar un MDT continuo, en el cual se incluyan todas estas variables y por lo tanto poder lograr un producto con alta resolución de la superficie terrestre que se haya levantado. Dicho esto, se hace necesario realizar una metodología que contenga la información necesaria para el desarrollo de MDT's continuos integrando información de datos de topografía convencional, levantamientos de batimetría por medio de ecosonda y sensor remoto LiDAR aéreo.

El propósito de este proyecto es el de realizar una metodología que comprende la manera en que se realiza un Modelo Digital de Terreno (MDT) al integrar distintas tecnologías actuales con los cuales se realizan los levantamientos de información topográfica. Entre los métodos de captura de información utilizados para la realización del MDT se encuentra el levantamiento por medio de uso de LiDAR aéreo, este a su vez se integrará con los trabajos de levantamientos topográficos convencionales (sean estos posicionamientos de puntos estáticos por medio de tecnologías de Sistemas Satelitales de Navegación Global (GNSS), adquisición de información con trabajos empleando la metodología Cinemática en tiempo Real (RTK), nivelaciones geométricas de precisión y por último, levantamiento batimétrico sobre un tramo del río Bogotá utilizando equipos de Ecosonda Monohaz.

Los MDT ofrecen unas ventajas y beneficios para diversos estudios en múltiples aéreas. La correcta realización de estos modelos repercute de manera directa en la calidad de la información obtenida. Siendo estos una integración de datos de distintos métodos de captura, sus ventajas frente a un solo método de levantamiento de información se convierten en una de sus características más relevantes, puesto que se genera información de mayor calidad y precisión factible para estudios y proyectos posteriores.

**Objetivos****Objetivo General**

Establecer una metodología para la creación de Modelos Digitales de Terreno (MDT) Topobatimétricos utilizando datos de LiDAR aéreo, Ecosonda y Topografía convencional.

Evaluar los valores de alturas obtenidas mediante tecnología LiDAR en comparación con los trabajos realizados por medio de Topografía convencional.

Analizar los datos de profundidad de una sección del río obtenidos con tecnología Monohaz.

Generar el Modelo Digital de Terreno (MDT) Topobatimétrico integrando datos capturados en campo y ajustados en oficina.

### Área de estudio

Los trabajos de topografía se encuentran delimitados en el municipio de Cota, en el límite con el municipio de Chía, ubicado en el departamento de Cundinamarca. A continuación, se muestra la localización geográfica de los trabajos:



*Ilustración 1. Localización de la zona de estudio. Fuente propia*

En este capítulo se expone lo correspondiente al estado del arte y trabajos similares realizados anteriormente. A su vez, se ahonda en las generalidades de lo que son los Modelos Digitales de Terreno (MDT), los métodos en que se realizan y sus tipos. También, se explica lo que corresponde a la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) para obtención de nubes de puntos densas y la tecnología de Ecosonda para trabajos batimétricos. Por último, se presenta la metodología que se requiere para realizar los tipos de levantamientos topográficos generales, los levantamientos batimétricos y la nivelación geométrica.

**Estado del Arte**

Los Modelos Digitales de Terreno (MDT) son métodos que son muy estudiados y analizados. A continuación, se presentan unos trabajos en los cuales se evidencia los estudios realizados sobre los mismos.

*Tabla 1. Estado del arte*

IDENTIFICACIÓN	OBJETIVO GENERAL	CATEGORÍAS/VARIABLES	INSTRUMENTOS RECOLECCION DE LA INFORMACIÓN	RESULTADOS
Baquero Osorio, Ismael. "ESTUDIO DE LA VARIABLE ALTIMETRICA (Z) SOBRE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACION POR MEDIO DE TECNOLOGIA LIDAR TERRESTRE", en Maestría en C.I.E.- Énfasis en Geomática de la Universidad Distrital Francisco José De Caldas, año 2016	Estudiar la precisión altimétrica (z) sobre un Modelo Digital de Elevación (MDE) por medio de tecnología LiDAR terrestre (TLS)	LiDAR Terrestre Modelo Digital de Terreno GPS (RTK)	Estudio bibliográfico apoyado en fuentes. Trabajo de campo	La generación del Modelo Digital de Terreno es más preciso en zonas duras, en contraste con zonas de vegetación (caso rastrojos, arbustos y pastos altos).

IDENTIFICACIÓN	OBJETIVO GENERAL	CATEGORÍAS/VARIABLES	INSTRUMENTOS RECOLECCION DE LA INFORMACIÓN	RESULTADOS
<p>Bonilla Romero, Julio Hernán. " MÉTODO PARA GENERAR MODELOS DIGITALES DE TERRENO CON BASE EN DATOS DE ESCÁNER LÁSER TERRESTRE", en Maestría en Geomática de la Universidad Nacional de Colombia, año 2016.</p>	<p>Desarrollar una metodología para generar modelos digitales de terreno a partir de datos tomados con escáner laser terrestre</p>	<p>Modelo Digital de Terreno Precisión Escáner Laser Terrestre (ELT)</p>	<p>Estudio bibliográfico apoyado en fuentes. Trabajo de campo</p>	<p>Las distancias si varían, presentándose para la resolución 1/1 una de 22.66 m, 1/8 de 22.62 m y 1/20 de 22.25 m estos datos son importantes porque si realiza el cálculo de la pendiente del terreno sería de 18.53 %, 18.56% y una leve variación para el último de 18.87%</p>
<p>Parrot, Jean-Francois., Núñez Ramirez, Carolina. "ARTEFACTOS Y CORRECCIONES A LOS MODELOS DIGITALES DE TERRENO PROVENIENTES DEL LIDAR", en Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, año 2016</p>	<p>Mejorar la precisión de los productos digitales, lo que permite realizar simulaciones eficaces y mediciones precisas.</p>	<p>Modelos Digitales de Terreno LiDAR, artefactos, exactitud, precisión y validación</p>	<p>Estudio bibliográfico apoyado en fuentes. Datos suministrados por la UNAM.</p>	<p>Se presentan enfoques que permiten la detección y eliminación de artefactos y reconstrucción de las formas para obtener una representación de superficie más cercana al terreno original. El uso de modelos digitales de elevación requiere de gran precisión, especialmente al extraer variables morfométricas de la superficie DEM o al hacer diferentes tipos de simulación tales como inundaciones.</p>

Los Modelos Digitales de Terreno (MDT) son la interpretación que se realiza de manera digital a un área específica de la tierra, levantados a partir de sensores remotos que generan una nube de puntos masiva en donde se puede caracterizar de forma precisa las condiciones del terreno. Se pueden discriminar tres tipos:

**Modelo Digital de Superficie (MDS):** Se define la superficie terrestre del área de estudio en donde sus elevaciones están referidas a los elementos que cubren el nivel del suelo como edificios, arboles, líneas de conducción eléctrica, etc.

**Modelo Digital del Terreno (MDT):** Identifican una porción de la superficie terrestre referenciados a la altura del nivel del suelo en coordenadas tridimensionales X, Y, Z, donde se discriminan los accidentes geográficos naturales.

**Modelo Digital de Elevación (MDE):** Al igual que el MDT, su altura está referido al nivel del suelo, los diferencia que el MDE contiene los datos originales capturados en campo.

Los MDT Topobatimétricos discriminan los elementos geográficos naturales como los ríos o demás cuerpos de agua y su profundidad, lo cual se consigue por medio de levantamientos batimétricos que permiten representar gráficamente tanto la superficie terrestre como del lecho de los cuerpos de agua.

Existen diversas fuentes de información que suministran MDE generados a partir de información captada por misiones satelitales, estos permiten una aproximación cercana a la realidad con excelentes precisiones horizontales, en cuanto a la exactitud vertical presenta dificultades ya que no están amarrados a bases de nivelación que permitan realizar una corrección

en elevación como es el caso de la información capturada por tecnología LiDAR. Algunas de las<sup>9</sup> misiones satelitales que permiten la obtención de estos productos se mencionan a continuación:

Space Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): Este sensor utiliza antenas de radar que captura información para generar un modelo de elevación digital a partir de la técnica de radar de apertura sintética interferométrica (inSAR). La cual permite penetrar la cubierta del dosel hasta el suelo, el Modelo generado cuenta con una resolución espacial de 30 metros y una precisión de altura vertical absoluta menor a 16 metros.

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): ASTER es el resultado de un proyecto realizado entre la NASA, Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) y Japan Space Systems (J-spacesystems). Este modelo permite una aproximación detallada en mapas de temperatura de la superficie, la reflectancia y la elevación, cuenta con una resolución global de 90 metros con una mejora en los Estados Unidos donde su resolución baja a 30 metros. Cuenta con una cobertura mayor al 80% de la Tierra, pero presenta problemas en áreas nubladas en donde se reduce la precisión considerablemente.

Advanced Land Observing Satellite Palsar (ALOS PALSAR): ALOS es un modelo de superficie digital de elevación (MDE) de 30 metros de resolución el cual puede ser remuestreado y bajar 12.5 metros, los modelos como sus imágenes satelitales se presentan multitemporalmente con una periodicidad de 46 días.

## **LiDAR**

Acrónimo de Light Detection and Ranging, es un sensor remoto el cual captura información tridimensional de los objetos, se denomina sensor activo debido a que cuenta con su propia fuente

de energía lo cual permite realizar trabajos en horario nocturno. El sistema permite medir la distancia entre el sensor y el elemento capturado midiendo la tardanza al regresar el impulso de luz, discriminando las coberturas que se encuentran en la zona escaneada. Se discriminan dos tipos de sensor LiDAR: 10

**LiDAR aerotransportado:** el sensor se instala en una plataforma aérea, el cual arroja impulsos de luz hacia la superficie de los objetos que se encuentren en la zona escaneada, estos se reflejan directamente al sensor obteniendo medidas en tres dimensiones (Coordenadas X, Y, Z).

**LiDAR terrestre:** El sistema se instala en vehículos en movimiento o trípodes en la superficie terrestre para recoger información en forma de nube de puntos masiva con datos precisos

## **Ecosonda**

Una ecosonda es un instrumento de medición acústica, la cual mediante ecos de sonido permite el cálculo de profundidad entre la superficie o nivel de agua y el fondo de un cuerpo de agua. Este sensor envía pulsos sónicos de trayectoria rectilínea que son reflejados por un objeto o superficie del cuerpo de agua. La distancia se calcula a partir del tiempo en transcurrido entre la emisión de las ondas y su retorno mediante un transductor el cual captura envía y captura la información. Las ecosondas se dividen en dos tipos:

**Monohaz:** Realizan la captura de la profundidad en un único punto, el transductor se puede configurar para tomar información en varias frecuencias dependiendo la profundidad y la limpieza del cuerpo de agua para mejorar la calidad de la información.

**Multihaz:** Realiza la captura de información a través de sondeos con múltiples haces y corrección de rumbo, cabeceo, balanceo, guiñada y velocidad del sonido, el sensor toma lecturas

tanto en forma perpendicular como con la dirección de navegación lo cual permite obtener una 11 amplia franja de información.

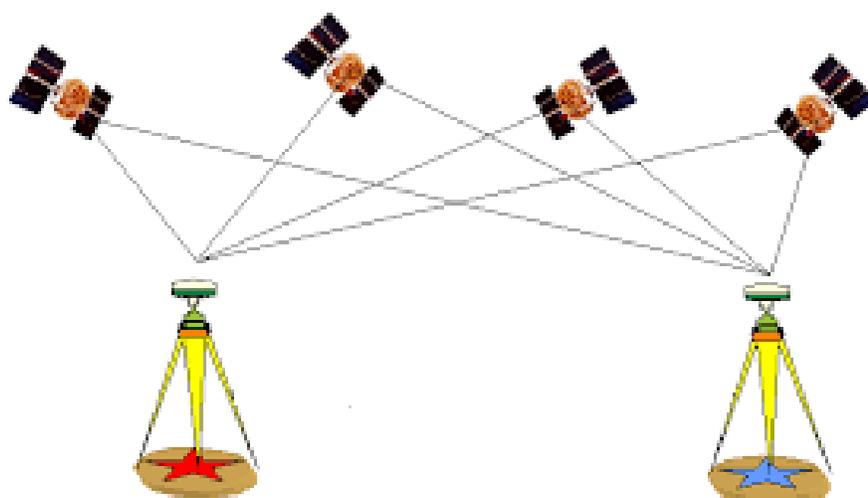
### **Levantamiento Topográfico**

Se refiere al estudio y descripción de la superficie del terreno de un área específica de estudio, la medición de la información a levantar se obtiene a partir de equipos especializados que reciben información tridimensional convirtiendo las características del terreno en nube de puntos usados para su representación.

Un proyecto topográfico requiere de una serie de cálculos y procedimientos para georreferenciar la información capturada en campo mediante equipos de recepción satelital GNSS acrónimo de Global Navigation Satellite System (Sistema Satelital de Navegación Global), entre los cuales se encuentran distintos métodos en función del trabajo a realizar como los siguientes:

Método estático: Se caracteriza por el posicionamiento de dos o más receptores de forma simultánea durante un determinado periodo de tiempo.

El método consiste en observaciones simultáneas a partir de una o varias estaciones permanentes con coordenadas conocidas las cuales se establecerán como fijas a uno o más puntos desconocidos los cuales reciben información con tiempos de observación mínimos para que se generen vectores de ángulo, distancia y diferencial de elevación además de combinaciones de líneas base entre las estaciones, los satélites y los puntos posicionados, las cuales permiten eliminar los errores sistemáticos de la observación de los puntos desconocidos.



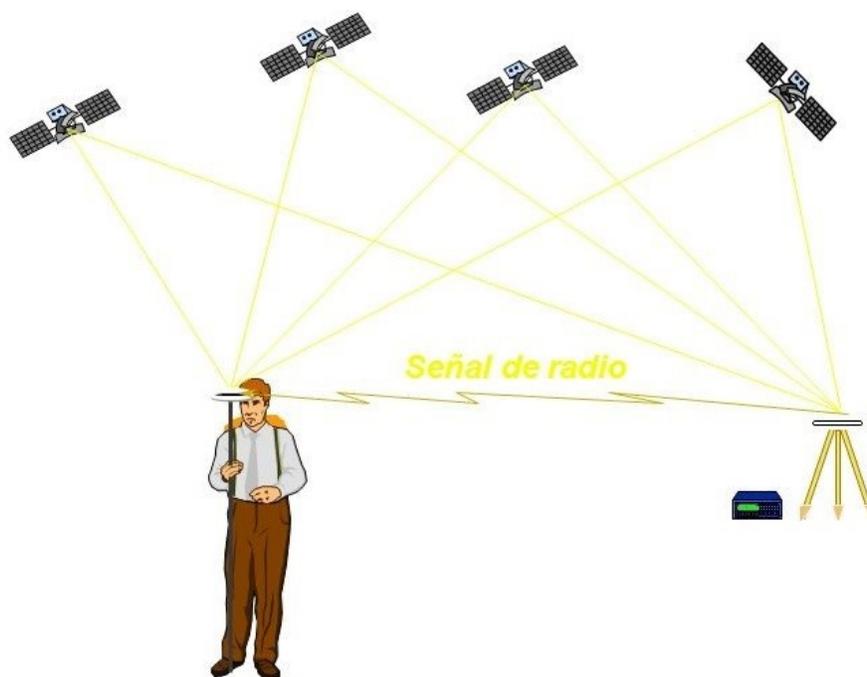
*Ilustración 2. Esquema de posicionamiento estático diferencial. Recuperado de*

<https://www.freepng.es/hd-png/sat%C3%A9lite,11.html>

Método estático rápido: El tiempo de captura de información es reducido, esta información se postprocesa a partir de una base posicionada con el método estático diferencial o una estación de rastreo continuo con el fin de obtener precisiones milimétricas.

Método RTK: Acrónimo de Real Time Kinematic (Cinemático en tiempo real); los tiempos de recepción son muy cortos, el equipo receptor móvil está ligado a una base estática que realiza la corrección diferencial de los detalles levantados en tiempo real.

Este método consiste en ubicar un receptor GNSS denominado base el cual se ubica en puntos de coordenadas conocidas el cual envía en tiempo real una serie de datos de correcciones diferenciales a otro receptor GNSS denominado Rover, el cual obtendrá posiciones de alta precisión de manera instantánea. El equipo Rover se ubica en cada punto de terreno levantado el cual posteriormente se comparará con la información capturada por el método LiDAR.

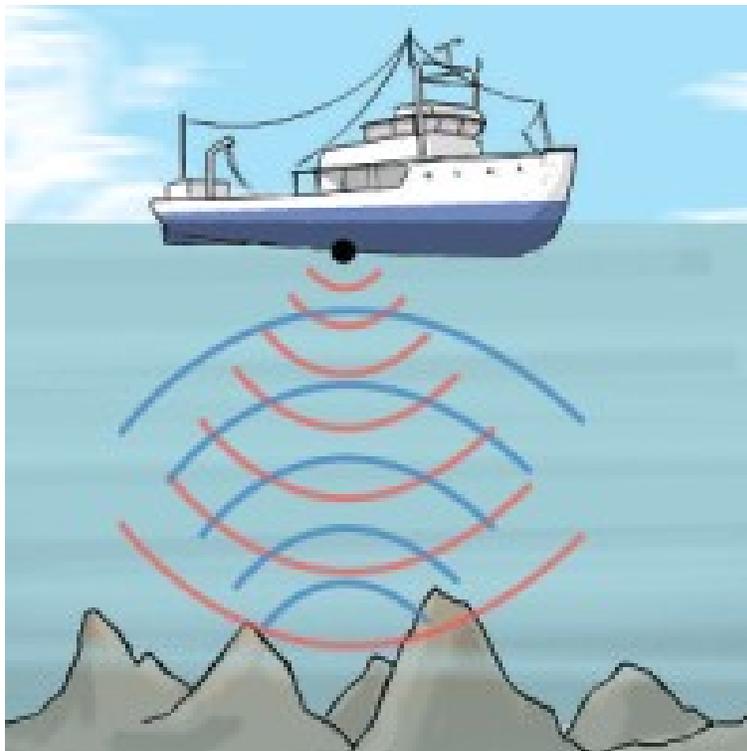


*Ilustración 3. Esquema de levantamiento RTK. Recuperado de <https://blog.tecnoceano.com/>*

### **Levantamiento Batimétrico**

Referido al levantamiento topográfico del lecho de los cuerpos de agua. La información se captura por medio de topografía convencional en agua poco profundas o con el uso de sensores acústicos como las Ecosondas en profundidades medias y altas.

La información capturada registra información tridimensional, donde la coordenada Z, corresponde a la profundidad del cuerpo de agua. Dependiendo del método y los equipos utilizados se mejora la precisión y mejora el nivel de detalle de la superficie levantada.



*Ilustración 4. Esquema de levantamiento ecosonda. Fuente Normas Técnicas Hidrográficas.*

Recuperado de <https://www.dhn.mil.pe/>

### **Nivelación Geométrica**

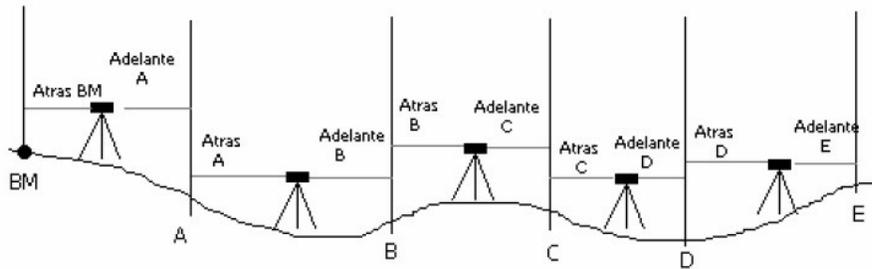
Es el proceso que radica en calcular la diferencia de elevación de uno o más puntos con referencia a otro, el procedimiento se lleva a cabo mediante equipos de precisión que permite realizar la lectura de la distancia vertical que se encuentra entre los puntos de comparación con base a un plano horizontal, se discriminan dos tipos de nivelación geométrica:

Nivelación geométrica simple: La localización del nivel se elige de tal manera que se puedan realizar las lecturas al punto de referencia y a uno o más puntos de los que se desee conocer la elevación. Se realiza este tipo de nivelación en zonas de distancia corta con pendientes mínimas.

Nivelación geométrica compuesta: Este proceso se realiza en zonas de pendientes altas y/o distancias entre los puntos de nivelación grandes, donde no se pueden nivelar todos los puntos; la

metodología consiste en varias nivelaciones simples donde cada punto nivelado se convierte en 15 el punto de referencia siguiente.

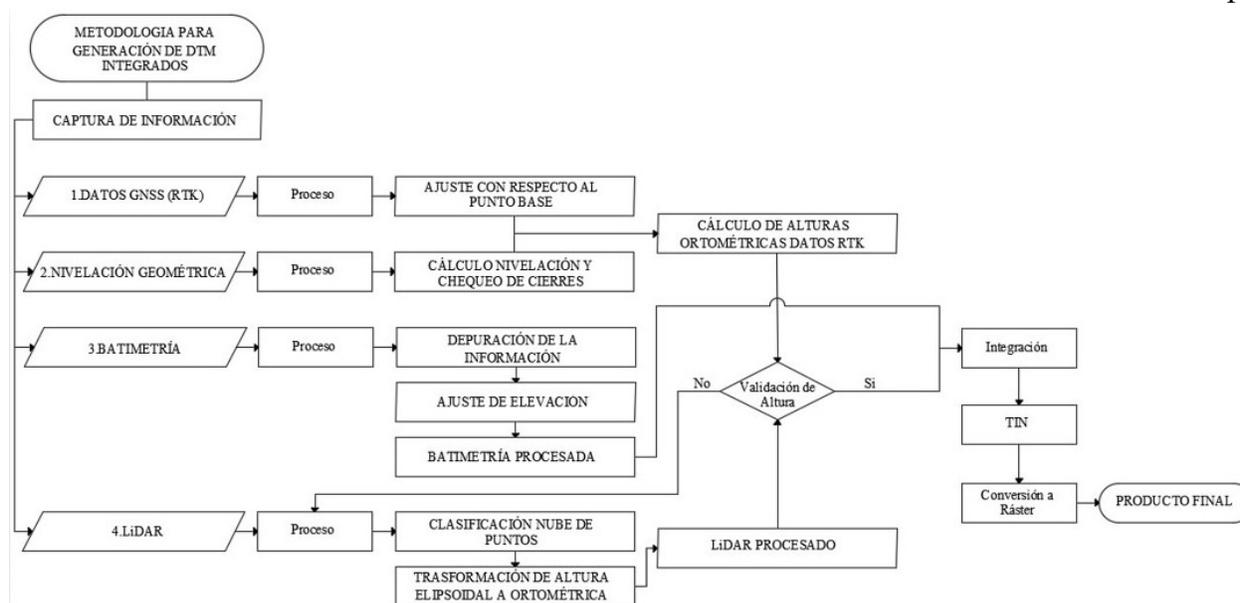
Este tipo de nivelación consiste en realizar mediciones tomando lecturas atrás (Vista +) y adelante (Vista -), buscando una posición óptima para las lecturas tanto en visual como en posición



*Ilustración 5. Esquema de nivelación compuesta. Recuperado de*

*<https://miguelriosr.wordpress.com/>*

En el capítulo correspondiente a la metodología, se explica el procedimiento utilizado para la realización del Modelo Digital de Terreno (MDT) integrado. El desarrollo consta de dos etapas: la primera trata sobre la captura de información de datos para el modelo que se realiza en las labores de campo. Los trabajos de campo a su vez, se encuentran divididos en niveles que son la captura de datos LiDAR, el levantamiento topográfico GNSS, la nivelación geométrica para obtener cotas a nivel del mar para posteriormente, asignar alturas geométricas al levantamiento y a su vez a la batimetría. La segunda fase hace alusión a las labores correspondientes en oficina, es decir, el procesamiento de la información obtenida en campo. Se determinan coordenadas para georreferenciar los trabajos, se calculan las nivelaciones para la obtención de alturas y de esta forma se corrigen las profundidades a las batimetrías realizadas. Por último, se clasifican las nubes de puntos LiDAR y se ajustan los valores de alturas para generar el MDT Topobatimétrico. A continuación, se muestra el diagrama de flujo en donde se detalla los procesos que se ejecutan en la metodología:



*Ilustración 6. Diagrama de flujo Metodología para Generación de DTM Integrados. Fuente propia*

## Captura de Información

### Topografía GNSS

Para realizar un control de calidad a la información levantada por el sensor LiDAR es factible realizar un levantamiento topográfico a partir de topografía convencional o recepción GNSS que pueda determinar las diferencias en altura de los puntos de terreno levantados con el sensor remoto.

Para realizar el ajuste de estos puntos de chequeo se requiere de unos puntos de control posicionados en el terreno, de tal manera que pueda determinar las coordenadas reales de cada uno de los puntos levantados. Para esto se realiza el posicionamiento de una pareja de vértices por metodología Estático Diferencias con equipos GNSS doble frecuencia, los cuales se ajustan mediante las estaciones permanentes pertenecientes a la Red Magna-Eco del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Esta información después de su procesamiento permite establecer las coordenadas de puntos<sup>18</sup> de control con precisiones milimétricas para realizar el ajuste de la información capturada por sensores remotos y levantamiento topográfico por otras metodologías GNSS. Para este caso se posicionaron dos puntos de control denominados GPS-01 y GPS-02.

La ocupación se llevó a cabo utilizando un equipo como Rover en cada punto, operando con observaciones continuas y simultáneas, con tiempos de rastreo de acuerdo a la Resolución 643 de 2018, la cual establece los lineamientos para levantamientos topográficos, en la cual se estableció la siguiente fórmula matemática para determinar los tiempos mínimos de rastreo para posicionamientos de puntos GNSS:

$$\textit{T tiempo de rastreo mínimo} = 65 \textit{ minutos} + (3 \textit{ minutos} * (d - 10))$$

Donde  $d$  corresponde a la distancia en kilómetros de separación entre la base y el Móvil.

Los tiempos de rastreo para cada punto también dependen de las condiciones atmosféricas, el número de satélites visibles y los obstáculos presentes, de tal manera que se cumpla con el tiempo mínimo de rastreo para obtener precisiones excelentes.

La georreferenciación implica entre otros los siguientes requerimientos:

- Mínimo de satélites visibles a asegurar: 5
- Componente geométrico de la dilución de precisión en posición PDOP < 5.
- Mascara de elevación de 10 grados.
- Exclusión de satélites descompuestos.
- Recolección de datos para tres dimensiones.

- Levantamiento en modo diferencial.
- Rata de rastreo y compactación de 1 segundos.

Una vez obtenida la información de los puntos de amarre, se procede al levantamiento de los puntos de terreno, Para este caso en particular se capturaron por medio de metodología RTK.

A diferencia de la técnica convencional (Estación Total) no es necesario que entre los puntos exista línea directa de medición, se requiere de una cantidad suficiente de satélites que permitan generar vectores entre los equipos para hallar las coordenadas tridimensionales.

Con este método y tomando como base los puntos de control georreferenciados por el método estático, se procedió a tomar datos de puntos de control en terreno realizando la medición de puntos en forma de sección transversal, con distanciamiento de aproximadamente 20 metros, a lo largo del tramo a modelar por los costados del río.

### **Nivelación Geométrica**

Para determinar las alturas de los puntos de control y posteriormente realizar un ajuste a toda la nube de puntos levantada en campo por tecnologías GNSS y/o LiDAR, y para tener una excelente precisión vertical de todo el modelo, se realizó un circuito de nivelación geométrica compuesta a partir del punto NP9-CM-10, el cual es un vértice que pertenece a la red Nacional de nivelación geométrica, localizado en el municipio de Chía, Cundinamarca, certificado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), bajo el cual se corrigen los datos obtenidos trasladando la altura a partir del vértice base y por medio de cambios numerados en un consecutivo ascendente comenzando con el cambio (C#001), hasta llegar a los puntos de control determinados como puntos de apoyo para el proyecto posicionados con tecnología GNSS posicionados con el método Estático Diferencial.

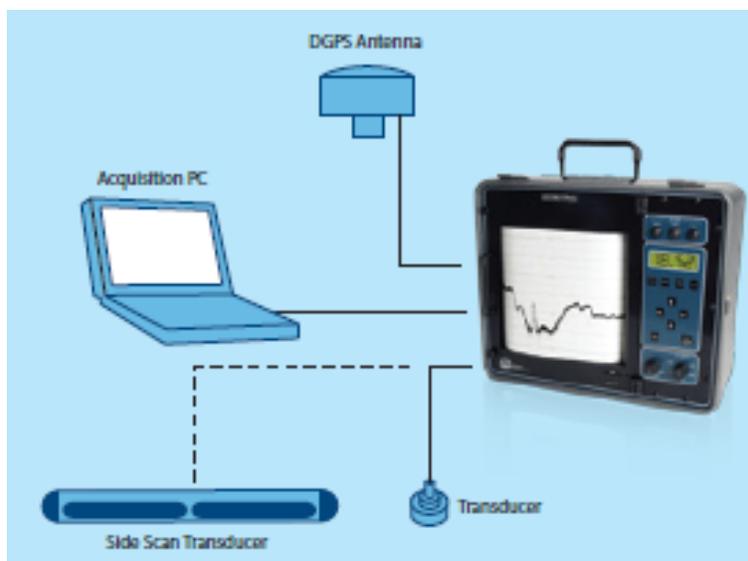
Para cumplir con la precisión requerida  $5\sqrt{K}$ , donde K es la distancia en Kilómetros de los tramos realizados (esto implica que cada tramo de 1 kilómetro tendrá un cierre máximo de 5 milímetros), se realizó la materialización de dos puntos de control vertical (BM) los cuales se ubican entre los puntos de amarre del proyecto y el NP usado como inicio de la nivelación. 20

De esta manera una vez calculados los tramos de nivelación se usaron estas alturas obtenidas para los ajustes posteriores de los demás datos capturados en campo.

### **Batimetría**

Los equipos batimétricos como las ecosondas, se sincronizan con un receptor GNSS configurado en método Cinemático, el cual esta a su vez amarrado a una antena GNSS base con coordenadas conocidas, de tal manera que se defina la posición horizontal de los datos capturados.

La sincronización del transductor con el receptor GNSS permite eliminar ruido superficial con el fin de obtener datos fiables al momento de la captura. La ecosonda cuenta con grabadora de datos y la posibilidad de conectar una computadora portátil para observar la visualización de los datos tomados.



*Ilustración 7. Funcionamiento de Ecosonda Fuente Normas Técnicas Hidrográficas. Recuperado de <https://www.dhn.mil.pe/>*

Al momento de la captura de la información se deben tener en cuenta otros factores de tal manera que se pueda calcular la profundidad real:

- Corrección de calado del transductor: Corresponde a la medida vertical desde el transductor hasta la lámina de agua del cuerpo de agua de estudio.
- Corrección de marea al cero: Corresponde a la cota de la lámina de agua de la zona levantada, esta información se puede obtener mediante topografía convencional, tecnologías GNSS método RTK, Mareógrafos o corrección mediante perfil generado a partir de miras limnimétricas y sus debidas lecturas en el día y horas iniciales y finales de la toma de información.

El montaje del equipo batimétrico se puede fijar en cualquier tipo de embarcación debido al pequeño peso del transductor y los distintos tipos de anclaje, facilitando su operación en cualquier cuerpo de agua.

Para este ejercicio se realizó la captura de información de profundidad mediante una Ecosonda Monohaz, lo cual implica que la información capturada registra una serie de puntos con una distribución lineal.

A la vez, se realizó un levantamiento de la lámina de agua mediante topografía convencional empleando la técnica RTK simultaneo con la captura de los transeptos de medición batimétrica, con el objeto de realizar la corrección de profundidad, al momento del procesamiento.

### **LiDAR**

Un proyecto que requiere el levantamiento topográfico mediante sensores Aerotransportados LiDAR, requiere varias fases para la captura de datos, entre ellas se destacan las autorizaciones de las entidades competentes en el caso de Colombia la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) y la Aerocivil, el diseño del plan de vuelo, montaje del sensor empleado para la captura de datos, control de calidad durante el momento de la captura y la integridad de los datos.

Al momento de generar el plan de vuelo para el cubrimiento de las zonas de estudio, se debe tener en cuenta las restricciones de los permisos otorgados por las entidades competentes, debido a que pueden existir zonas privadas en donde no se permite la captura de información, además de las restricciones por aspectos de seguridad de los trabajos.

El control de calidad se realiza durante la toma de datos en donde el operador del sensor debe garantizar que se cumplan con diversos parámetros que garanticen que la captura de la información se realice correctamente los cuales corresponden a los siguientes:

- Se debe comprobar de que la altura de vuelo es correcta y estable para el rango de distancias que se está midiendo con el láser.

- Comprobación de que el láser está emitiendo pulsos continuamente durante la adquisición y que estos datos se están almacenando correctamente.
- Sistema de posicionamiento de la plataforma que garantice un número mínimo de seis satélites que envíen información y el valor menor a cuatro para el PDOP.
- Ángulo de alabeo de la plataforma inferior a 15 grados durante la toma de los datos de tal manera que la cobertura de satélites no vaya a ser inferior al número de satélites mínimo.

Para una mejor calidad de la información capturada se debe analizar el estado del tiempo del lugar de estudio, garantizando que la calidad de información sea óptima para los procesos posteriores, entre ellas se tienen en cuenta:

- Condiciones óptimas de luminosidad, legalmente las aeronaves y drones se les autoriza el permiso de vuelo entre el amanecer y el ocaso.
- No existencia de nubes, niebla, bruma y concentración de vapor de agua por debajo de la altura de vuelo.
- Tiempo seco durante la toma de datos.
- No existencia de fuertes vientos o turbulencias que supongan la inestabilidad de la plataforma durante el vuelo.

Una vez capturada la información por el sensor, se realiza una codificación preliminar a los datos crudos antes del procesamiento de estos, entre los cuales se deben asegurar:

- Los tiempos indicados para el primer y último pulso enviado correspondan a tiempos dados por el informe de captura de datos obtenido automáticamente por el sensor.
- Los impactos del LiDAR hayan retornado de forma exitosa de tal manera que garanticen la no existencia de gaps (zonas sin información) sobre la superficie del terreno, esta información también es arrojada por el informe de captura, en el caso de presentarse este inconveniente es necesario repetir la línea de levantamiento.
- Los subsistemas IMU y GNSS de la plataforma debieron estar conectados durante un periodo previo y posterior y durante todo el vuelo.

Luego al garantizar la correcta captura de datos LiDAR se da por finalizada la captura de datos en campo. Esta información se valida inicialmente en los reportes de vuelo en los cuales se especifica el número de líneas voladas y la densidad de puntos capturados, el cual debe corresponder a los datos ingresados al inicio de la captura. La visualización de la información se realiza a través de software que permita la lectura de información LiDAR, como lo son las aplicaciones SIG.

## **Procesamiento de Información**

### **Datos GNSS**

Se realizó la descarga y procesamiento de la información para obtener las coordenadas y elevación de cada punto, aplicando todos los pasos de la metodología IGAC para cálculo de puntos determinados por el sistema de GNSS.

Para la determinación de los puntos de control GPS-01 y GPS-02, se realizó doble determinación de coordenadas, a partir de las estaciones 25175006 y BOGA, pertenecientes a la

red MAGNA SIRGAS, siendo la primera una estación pasiva y la segunda una activa 25  
perteneciente a la red Magna - Eco. La estación pasiva 25175006 se determinó a partir de las  
cinco estaciones pertenecientes a la red Magna Eco ubicadas en Bogotá: ABPW, ABCC, BOGT,  
BOGA y ABPD.



*Ilustración 8. Esquema de determinación de bases GPS. Fuente propia*

Una vez determinada la base se procede a realizar un ajuste de red a los puntos de control del proyecto, definiendo inicialmente el sistema de coordenadas de acuerdo al Marco Geocéntrico Nacional De Referencia “MAGNA” para Colombia desde estaciones pasivas de la red “SIRGAS”, el cual se denomina MAGNA-SIRGAS.

El tratamiento de la información se realizó a través del software Trimble Business Center el cual permite realizar ajustes de red GNSS y demás datos de información cruda de las diversas metodologías levantadas por medio de equipos Trimble.

Se llevó a cabo la solución de cada vector obtenido hecha la verificación de cada antena y 26 altura instrumental con los formatos de ocupación GNSS. Después del procesamiento se obtienen residuales, los cuales permiten evaluar la calidad de cada punto posicionado y ajustado para obtener coordenadas definitivas, las cuales pueden ser geocéntricas (X, Y, Z) o elipsoidales [ $\varphi$ ,  $\lambda$ , h].

Asumiendo una buena distribución geométrica de los satélites en el espacio (PDOP <5), más de 5 satélites comunes entre el receptor de la base y los receptores remotos, ausencia de los objetos que produzcan múltiples reflexiones de las señales y periodos de baja actividad atmosférica con receptores GPS de doble frecuencia se obtienen en modo Estático las siguientes precisiones:

- Horizontal: 0.020 m + 1.0 ppm
- Vertical: 0.050 m + 1.0 ppm
- Azimut: 0.15 + 1.5 / Long. De la línea base (Km).

La ilustración 9, presenta el esquema de determinación de los vértices base para el amarre de la información capturada por metodología RTK y batimétrica a partir de sistemas GNSS y Ecosonda Monohaz respectivamente.



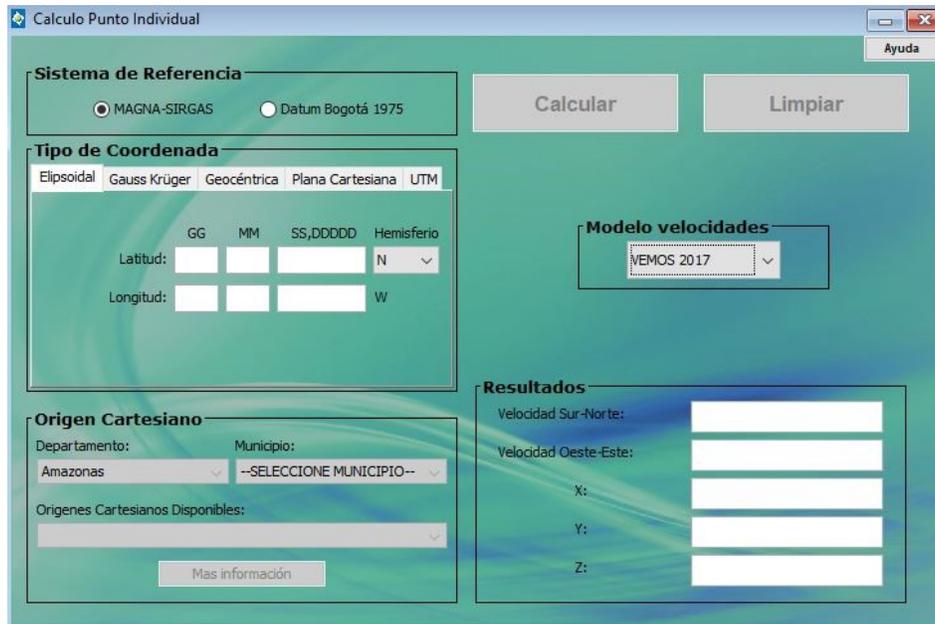
*Ilustración 9. Esquema de determinación de Puntos GPS-01 y GPS-02. Fuente propia*

De acuerdo con la resolución 715 de 2018, bajo la cual se actualizó el marco geocéntrico nacional de referencia, se realizó el traslado de época a las coordenadas de los vértices procesados vinculándolos a la época 2018.0. de acuerdo a la normativa IGAC.

Para este proceso se tiene realiza con el fin de presentar un reporte de coordenadas de los vértices posicionados al marco de referencia actual. Se usó el modelo de velocidades VEMOS 2017.

“(…) VEMOS2017 cubre la región comprendida entre  $120^{\circ}\text{W}$ ,  $55^{\circ}\text{S}$  y  $35^{\circ}\text{W}$ ,  $32^{\circ}\text{N}$  con una resolución espacial de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ . La incertidumbre promedio de VEMOS2017 se estima en  $\pm 1.0$  mm/a en la dirección norte-sur y  $\pm 1.7$  mm/a en la dirección este-oeste (...)” (Modelo de velocidades para SIRGAS: VEMOS. (s.f.) Recuperado de <http://www.sirgas.org/es/sirgas-con-network/velocity-model/>)

Este modelo permite encontrar las variaciones entre la época de rastreo y la de referencia de 28 cada uno de los puntos posicionados. El software MagnaPro 4.2 suministrado en los datos abiertos de Geodesia del IGAC, permite realizar el cálculo de velocidades para los puntos deseados.



*Ilustración 10. Ventana Cálculo de Velocidades Magna Pro 4.2. Fuente propia*

Obtenidas las velocidades en las coordenadas X, Y, Z de cada uno de los puntos se realiza la siguiente operación matemática para hallar el desplazamiento de cada coordenada:

$$\text{Velocidad en cada coordenada} * \text{Diferencial de tiempo}$$

Con estos resultados se realiza una suma algebraica de las coordenadas geocéntricas y sus desplazamientos en el tiempo de diferencia.

Por último, se realizó la conversión de coordenadas al origen correspondiente; en este caso a coordenadas Planas de Gauss-Krüger en origen CENTRAL.

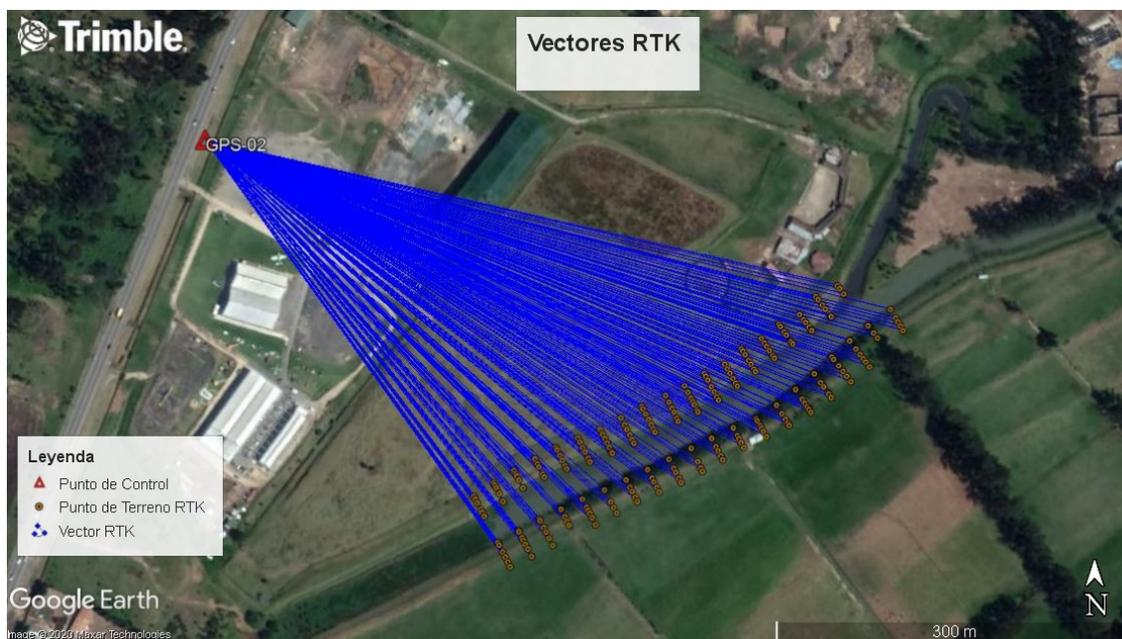
Tabla 2. Coordenadas puntos de amarre del proyecto época 2018.0

ID de punto	Coordenadas planas de Gauss Kruger Origen Bogotá		Coordenadas Geodésicas		
	Este, m	Norte, m	Latitud N	Longitud O	Altura Elipsoidal
GPS-01	998783.902	1026136.938	4°49'57.2116"	74°5'18.49568"	2581.462
GPS-02	998947.678	1026554.240	4°50'10.79694"	74°5'13.1807"	2575.412

Con las bases calculadas se procedió a verificar y postprocesar la información capturada por metodología RTK, la cual se usará como verificación de los puntos LiDAR. El levantamiento de la información se realizó a través de equipos Trimble y el proceso se llevó a cabo por el software Trimble Business Center verificando que el tipo de solución de cada punto levantado sea fija, fijando las coordenadas de la base y chequeando la altura de la antena para cada punto de acuerdo a la cartera de campo.

La información procesada arroja coordenadas tridimensionales de tipo Elipsoidales, Geocéntricas y Planas Gauss Kruger origen Central, calculadas a partir de los vectores definidos entre la base y el Rover.

La tabla 2, presenta un reporte de coordenadas planas y geográficas obtenidas por el procesamiento de la información.



*Ilustración 11. Vectores definidos entre Base y Móvil del levantamiento RTK. Fuente propia*

*Tabla 3. Coordenadas levantamiento RTK*

ID	Coordenadas Gauss Kruger		Coordenadas Elipsoidales		
	Este	Norte	Latitud	Longitud	Altura
1	999179.994	1026245.723	N4°50'00.75327"	O74°05'05.64096"	2567.301
2	999177.080	1026251.154	N4°50'00.93008"	O74°05'05.73553"	2569.308
3	999175.402	1026254.351	N4°50'01.03417"	O74°05'05.79000"	2571.379
4	999174.132	1026256.804	N4°50'01.11400"	O74°05'05.83123"	2571.579
5	999190.751	1026268.253	N4°50'01.48674"	O74°05'05.29186"	2571.787
6	999191.880	1026266.100	N4°50'01.41666"	O74°05'05.25525"	2571.426
7	999193.007	1026263.959	N4°50'01.34696"	O74°05'05.21866"	2570.140
8	999195.600	1026259.043	N4°50'01.18692"	O74°05'05.13449"	2568.003
9	999212.094	1026270.477	N4°50'01.55914"	O74°05'04.59922"	2569.276
10	999210.488	1026273.676	N4°50'01.66330"	O74°05'04.65132"	2570.177
11	999209.334	1026275.861	N4°50'01.73445"	O74°05'04.68879"	2571.596
12	999208.018	1026278.296	N4°50'01.81369"	O74°05'04.73151"	2571.806
13	999225.622	1026288.044	N4°50'02.13106"	O74°05'04.16018"	2571.619
14	999227.723	1026283.883	N4°50'01.99558"	O74°05'04.09200"	2571.609
15	999228.896	1026281.498	N4°50'01.91794"	O74°05'04.05391"	2569.997
16	999248.715	1026286.879	N4°50'02.09314"	O74°05'03.41071"	2568.138
17	999246.590	1026290.990	N4°50'02.22697"	O74°05'03.47968"	2571.413
18	999244.150	1026295.588	N4°50'02.37664"	O74°05'03.55886"	2571.320
19	999243.248	1026297.548	N4°50'02.44046"	O74°05'03.58815"	2570.933
20	999261.670	1026305.404	N4°50'02.69621"	O74°05'02.99029"	2570.174
21	999263.406	1026302.000	N4°50'02.58541"	O74°05'02.93393"	2571.188
22	999265.615	1026297.650	N4°50'02.44379"	O74°05'02.86224"	2570.924
23	999267.657	1026293.825	N4°50'02.31926"	O74°05'02.79598"	2567.775

ID	Coordenadas Gauss Kruger		Coordenadas Elipsoidales		
	Este	Norte	Latitud	Longitud	Altura
24	999280.397	1026312.618	N4°50'02.93109"	O74°05'02.38250"	2569.676
25	999282.436	1026308.698	N4°50'02.80348"	O74°05'02.31633"	2570.619
26	999284.416	1026304.896	N4°50'02.67969"	O74°05'02.25208"	2570.709
27	999286.326	1026301.261	N4°50'02.56137"	O74°05'02.19009"	2567.724
28	999288.102	1026297.797	N4°50'02.44859"	O74°05'02.13246"	2567.347
29	999305.291	1026308.062	N4°50'02.78275"	O74°05'01.57460"	2567.097
30	999302.802	1026312.727	N4°50'02.93465"	O74°05'01.65537"	2570.378
31	999300.938	1026316.547	N4°50'03.05898"	O74°05'01.71586"	2570.324
32	999297.860	1026322.364	N4°50'03.24836"	O74°05'01.81578"	2568.642
33	999315.452	1026331.951	N4°50'03.56049"	O74°05'01.24484"	2568.105
34	999316.568	1026329.770	N4°50'03.48946"	O74°05'01.20861"	2568.987
35	999318.819	1026325.439	N4°50'03.34847"	O74°05'01.13557"	2570.338
36	999321.136	1026320.999	N4°50'03.20393"	O74°05'01.06038"	2570.346
37	999323.454	1026316.647	N4°50'03.06226"	O74°05'00.98515"	2567.066
38	999335.591	1026341.047	N4°50'03.85660"	O74°05'00.59124"	2569.173
39	999338.339	1026335.429	N4°50'03.67371"	O74°05'00.50206"	2570.545
40	999340.848	1026330.214	N4°50'03.50393"	O74°05'00.42064"	2570.662
41	999342.575	1026326.968	N4°50'03.39826"	O74°05'00.36459"	2568.262
42	999359.696	1026333.281	N4°50'03.60378"	O74°04'59.80896"	2566.836
43	999358.369	1026335.808	N4°50'03.68605"	O74°04'59.85200"	2568.739
44	999356.912	1026338.583	N4°50'03.77638"	O74°04'59.89929"	2570.554
45	999354.315	1026343.579	N4°50'03.93904"	O74°04'59.98359"	2570.616
46	999351.439	1026349.106	N4°50'04.11897"	O74°05'00.07692"	2569.151
47	999368.170	1026359.314	N4°50'04.45128"	O74°04'59.53395"	2568.735
48	999369.372	1026357.097	N4°50'04.37911"	O74°04'59.49492"	2569.310
49	999371.069	1026353.916	N4°50'04.27554"	O74°04'59.43987"	2570.359
50	999374.021	1026348.394	N4°50'04.09579"	O74°04'59.34405"	2570.302
51	999376.403	1026344.043	N4°50'03.95414"	O74°04'59.26674"	2566.898
52	999392.283	1026355.142	N4°50'04.31549"	O74°04'58.75136"	2567.233
53	999389.752	1026359.519	N4°50'04.45796"	O74°04'58.83351"	2570.246
54	999387.519	1026363.364	N4°50'04.58313"	O74°04'58.90598"	2570.109
55	999385.333	1026367.164	N4°50'04.70686"	O74°04'58.97694"	2569.211
56	999399.326	1026380.229	N4°50'05.13217"	O74°04'58.52281"	2568.570
57	999400.650	1026378.165	N4°50'05.06498"	O74°04'58.47983"	2569.191
58	999402.551	1026375.122	N4°50'04.96593"	O74°04'58.41813"	2570.077
59	999405.573	1026370.281	N4°50'04.80834"	O74°04'58.32007"	2569.868
60	999407.592	1026367.187	N4°50'04.70761"	O74°04'58.25453"	2567.475
61	999422.963	1026378.652	N4°50'05.08087"	O74°04'57.75569"	2567.727
62	999420.596	1026382.128	N4°50'05.19401"	O74°04'57.83250"	2569.994
63	999418.702	1026384.888	N4°50'05.28387"	O74°04'57.89399"	2570.246
64	999416.172	1026388.683	N4°50'05.40742"	O74°04'57.97608"	2569.368
65	999430.870	1026400.366	N4°50'05.78775"	O74°04'57.49908"	2568.452
66	999432.160	1026398.631	N4°50'05.73128"	O74°04'57.45721"	2569.262
67	999435.486	1026394.032	N4°50'05.58154"	O74°04'57.34928"	2570.094
68	999437.230	1026391.586	N4°50'05.50193"	O74°04'57.29266"	2568.860
69	999440.817	1026386.598	N4°50'05.33954"	O74°04'57.17625"	2566.705
70	999456.417	1026398.136	N4°50'05.71515"	O74°04'56.66999"	2566.720
71	999453.428	1026401.989	N4°50'05.84060"	O74°04'56.76700"	2568.419
72	999451.719	1026404.240	N4°50'05.91388"	O74°04'56.82244"	2569.932
73	999448.279	1026408.688	N4°50'06.05868"	O74°04'56.93408"	2569.454
74	999462.057	1026423.553	N4°50'06.54262"	O74°04'56.48693"	2569.022

ID	Coordenadas Gauss Kruger		Coordenadas Elipsoidales		
	Este	Norte	Latitud	Longitud	Altura
75	999464.000	1026421.143	N4°50'06.46415"	O74°04'56.42388"	2569.576
76	999467.532	1026416.517	N4°50'06.31356"	O74°04'56.30926"	2569.800
77	999470.083	1026413.117	N4°50'06.20287"	O74°04'56.22646"	2568.044
78	999480.229	1026432.709	N4°50'06.84068"	O74°04'55.89720"	2568.240
79	999482.166	1026430.371	N4°50'06.76459"	O74°04'55.83432"	2567.224
80	999204.731	1026197.975	N4°49'59.19884"	O74°05'04.83816"	2566.981
81	999202.716	1026201.923	N4°49'59.32738"	O74°05'04.90353"	2567.153
82	999200.519	1026206.176	N4°49'59.46585"	O74°05'04.97483"	2569.712
83	999198.319	1026210.355	N4°49'59.60188"	O74°05'05.04623"	2569.947
84	999222.804	1026206.583	N4°49'59.47911"	O74°05'04.25162"	2567.049
85	999219.576	1026212.828	N4°49'59.68238"	O74°05'04.35638"	2567.475
86	999217.580	1026216.704	N4°49'59.80858"	O74°05'04.42116"	2569.742
87	999215.780	1026220.162	N4°49'59.92117"	O74°05'04.47955"	2570.045
88	999214.640	1026222.276	N4°49'59.98996"	O74°05'04.51657"	2568.607
89	999232.794	1026230.809	N4°50'00.26777"	O74°05'03.92738"	2569.755
90	999234.790	1026227.019	N4°50'00.14439"	O74°05'03.86263"	2569.736
91	999237.490	1026221.771	N4°49'59.97353"	O74°05'03.77498"	2567.242
92	999240.540	1026215.921	N4°49'59.78310"	O74°05'03.67600"	2567.080
93	999254.354	1026232.661	N4°50'00.32807"	O74°05'03.22768"	2566.854
94	999252.652	1026236.051	N4°50'00.43845"	O74°05'03.28291"	2569.397
95	999250.722	1026239.753	N4°50'00.55894"	O74°05'03.34555"	2569.762
96	999269.108	1026247.724	N4°50'00.81845"	O74°05'02.74886"	2569.769
97	999270.404	1026245.235	N4°50'00.73744"	O74°05'02.70682"	2570.057
98	999271.775	1026242.599	N4°50'00.65160"	O74°05'02.66232"	2569.129
99	999273.669	1026238.952	N4°50'00.53289"	O74°05'02.60084"	2567.215
100	999276.663	1026233.098	N4°50'00.34230"	O74°05'02.50368"	2566.787
101	999294.185	1026242.778	N4°50'00.65745"	O74°05'01.93500"	2566.849
102	999291.752	1026247.418	N4°50'00.80849"	O74°05'02.01396"	2567.330
103	999289.295	1026252.024	N4°50'00.95843"	O74°05'02.09374"	2569.903
104	999305.608	1026264.214	N4°50'01.35528"	O74°05'01.56430"	2569.807
105	999307.434	1026260.705	N4°50'01.24106"	O74°05'01.50504"	2570.090
106	999309.941	1026255.882	N4°50'01.08405"	O74°05'01.42368"	2567.207
107	999311.744	1026252.357	N4°50'00.96928"	O74°05'01.36514"	2566.920
108	999330.130	1026260.351	N4°50'01.22955"	O74°05'00.76848"	2566.936
109	999328.135	1026264.175	N4°50'01.35404"	O74°05'00.83320"	2567.095
110	999325.756	1026268.823	N4°50'01.50534"	O74°05'00.91043"	2569.961
111	999324.032	1026272.068	N4°50'01.61100"	O74°05'00.96638"	2570.043
112	999342.342	1026280.264	N4°50'01.87783"	O74°05'00.37213"	2570.072
113	999344.055	1026276.873	N4°50'01.76741"	O74°05'00.31655"	2570.014
114	999346.727	1026271.838	N4°50'01.60351"	O74°05'00.22982"	2567.258
115	999348.512	1026268.357	N4°50'01.49019"	O74°05'00.17189"	2566.821
116	999366.552	1026277.594	N4°50'01.79091"	O74°04'59.58642"	2566.899
117	999365.111	1026280.537	N4°50'01.88671"	O74°04'59.63321"	2567.415
118	999362.524	1026285.794	N4°50'02.05784"	O74°04'59.71715"	2570.021
119	999377.852	1026298.370	N4°50'02.46726"	O74°04'59.21971"	2570.011
120	999379.679	1026294.886	N4°50'02.35385"	O74°04'59.16041"	2570.021
121	999381.985	1026290.513	N4°50'02.21147"	O74°04'59.08558"	2567.102
122	999383.612	1026287.322	N4°50'02.10760"	O74°04'59.03276"	2566.853
123	999401.374	1026297.505	N4°50'02.43910"	O74°04'58.45631"	2567.379
124	999399.175	1026301.571	N4°50'02.57147"	O74°04'58.52770"	2567.580
125	999397.294	1026305.034	N4°50'02.68421"	O74°04'58.58873"	2569.653

ID	Coordenadas Gauss Kruger		Coordenadas Elipsoidales		
	Este	Norte	Latitud	Longitud	Altura
126	999396.017	1026307.481	N4°50'02.76388"	O74°04'58.63017"	2569.803
127	999415.330	1026315.648	N4°50'03.02974"	O74°04'58.00339"	2570.154
128	999416.367	1026313.679	N4°50'02.96566"	O74°04'57.96974"	2570.304
129	999417.960	1026310.959	N4°50'02.87712"	O74°04'57.91806"	2568.396
130	999420.462	1026306.591	N4°50'02.73492"	O74°04'57.83685"	2567.606
131	999439.577	1026316.006	N4°50'03.04142"	O74°04'57.21649"	2567.481
132	999438.340	1026317.932	N4°50'03.10412"	O74°04'57.25663"	2568.014
133	999436.448	1026320.965	N4°50'03.20287"	O74°04'57.31805"	2570.194
134	999433.381	1026325.859	N4°50'03.36217"	O74°04'57.41756"	2570.199
135	999450.489	1026337.873	N4°50'03.75332"	O74°04'56.86237"	2570.202
136	999452.692	1026334.506	N4°50'03.64368"	O74°04'56.79084"	2570.165
137	999454.772	1026331.371	N4°50'03.54163"	O74°04'56.72335"	2567.819
138	999456.143	1026329.420	N4°50'03.47810"	O74°04'56.67885"	2567.218
139	999457.903	1026326.866	N4°50'03.39498"	O74°04'56.62172"	2567.308
140	999475.038	1026339.307	N4°50'03.80000"	O74°04'56.06563"	2567.295
141	999472.918	1026342.279	N4°50'03.89675"	O74°04'56.13443"	2567.139
142	999468.621	1026348.247	N4°50'04.09104"	O74°04'56.27390"	2570.172
143	999466.041	1026351.677	N4°50'04.20271"	O74°04'56.35762"	2569.963
144	999477.144	1026371.234	N4°50'04.83936"	O74°04'55.99728"	2566.753
145	999481.329	1026365.900	N4°50'04.66573"	O74°04'55.86148"	2569.828
146	999484.945	1026361.144	N4°50'04.51091"	O74°04'55.74410"	2569.860
147	999488.086	1026357.085	N4°50'04.37874"	O74°04'55.64218"	2567.323
148	999491.577	1026352.483	N4°50'04.22893"	O74°04'55.52889"	2567.372
149	999507.203	1026364.980	N4°50'04.63580"	O74°04'55.02176"	2567.054
150	999504.088	1026368.989	N4°50'04.76631"	O74°04'55.12286"	2567.195
151	999501.948	1026371.772	N4°50'04.85689"	O74°04'55.19232"	2567.411
152	999499.253	1026375.331	N4°50'04.97277"	O74°04'55.27977"	2569.651
153	999495.701	1026379.904	N4°50'05.12161"	O74°04'55.39505"	2569.570
154	999510.665	1026393.253	N4°50'05.55621"	O74°04'54.90939"	2569.386
155	999513.939	1026388.996	N4°50'05.41763"	O74°04'54.80316"	2569.464
156	999535.446	1026395.261	N4°50'05.62159"	O74°04'54.10517"	2566.974
157	999533.262	1026398.951	N4°50'05.74172"	O74°04'54.17605"	2569.268
158	999531.141	1026402.453	N4°50'05.85570"	O74°04'54.24488"	2569.481
159	999529.151	1026405.808	N4°50'05.96493"	O74°04'54.30946"	2567.129

### Datos de Nivelación Geométrica

A partir del vértice NP-9CM-10, localizado en el municipio de Chía (Cundinamarca), el cuál fue nivelado geoméricamente y está certificado por el IGAC, se trasladó cota hacia los vértices posicionados y denominados como puntos de control, pasando por los vértices de la red pasiva del IGAC 25175006 y 25175007 siendo el primero uno como punto de amarre para el cálculo de los puntos de control con el fin de encontrar su cota geométrica. Para mejorar la calidad del

trabajo se ubicaron dos puntos de nivelación intermedios denominados BM y así realizar

tramos de nivelación que permitan obtener precisiones de máximo 5mm por cada kilómetro nivelado.

El trabajo de campo se realizó usando un nivel de precisión electrónico Leica Sprinter, el cual registra la información de lecturas atrás (Vista +) y adelante (Vista -) y la distancia horizontal desde el equipo a la mira, este tipo de niveles permiten minimizar los errores humanos en las lecturas que usualmente se presentan usando niveles convencionales. La tabla 3 presenta un ejemplo de un archivo crudo de una nivelación, en donde los puntos impares corresponden a las lecturas atrás y los pares a las lecturas adelante.

*Tabla 4. Ejemplo datos de nivelación de precisión*

<b>Sprinter Data Listing Report</b>				
Ht/Dist				
<b>ArrayNo</b>	<b>PtNo</b>	<b>Height [m]</b>	<b>Distance [m]</b>	<b>Staff Type</b>
1	1	1.1302	48.954	Upright
2	2	1.8345	57.274	Upright
3	3	0.4243	43.932	Upright
4	4	2.7014	43.790	Upright
5	5	0.1168	34.801	Upright
6	6	2.6015	33.525	Upright
7	7	0.2818	60.001	Upright
8	8	1.0701	42.636	Upright
9	9	1.1385	57.502	Upright
10	10	0.6221	37.199	Upright
11	11	1.7289	47.116	Upright
12	12	1.9763	41.041	Upright
13	13	1.1897	30.114	Upright
14	14	1.6352	40.633	Upright
15	15	1.6680	40.655	Upright
16	16	1.2222	30.098	Upright
17	17	2.0012	41.050	Upright
18	18	1.7204	38.936	Upright
19	19	0.7386	51.160	Upright
20	20	1.3425	37.982	Upright
21	21	1.1715	49.519	Upright
22	22	0.8616	37.360	Upright
23	23	2.5756	47.404	Upright
24	24	0.0817	36.042	Upright

Sprinter Data Listing Report				
Ht/Dist				
ArrayNo	PtNo	Height [m]	Distance [m]	Staff Type
25	25	2.6427	37.328	Upright
26	26	0.2965	36.640	Upright

El cálculo de la información se realizó a través de hojas de cálculo de Excel en las cuales se realiza la corrección para cada uno de los cambios realizados y de esta manera determinar la altura de los puntos nivelados y así obtener una cota final.

La nivelación se dividió en seis tramos con el fin de obtener la precisión requerida a la propuesta, a continuación, se presenta la distribución de las líneas de nivelación, los resultados de los cierres de los circuitos y las alturas de cada uno de los puntos nivelados.



*Ilustración 12. Localización de Líneas de nivelación. Fuente propia*

PUNTO	COTA GEOMÉTRICA	TRAMO DE CÁLCULO	LONGITUD NIVELACIÓN – CONTRANIVELACIÓN (Km)	ERROR PERMITIDO (m)	ERROR DE CIERRE (m)
NP-9-CM-10	2548.440	RED IGAC	-	-	-
BM#1	2554.869	NP9-CM-10 _ BM1	1.236	0.006	-0.004
25175006	2557.742	BM1 _ 25175006	1.129	0.005	-0.005
BM#2	2560.003	25175006 _ BM2	1.354	0.006	-0.006
25175007	2559.171	BM2 _ 25175007	1.279	0.006	-0.006
GPS-02	2553.087	25175007 _ GPS02	1.126	0.005	-0.005
GPS-01	2559.135	GPS-02 _ GPS-01	0.900	0.005	0.000

### Cálculo de alturas ortométricas para Levantamiento GNSS

La información capturada por sistema GNSS y su posterior procesamiento permite calcular la elevación elipsoidal de cada uno de los puntos levantados en campo; debido a que los productos finales de un proyecto se deben manejar alturas sobre el nivel medio del mar, es indispensable calcular la cota ortométrica de todos los puntos levantados en campo.

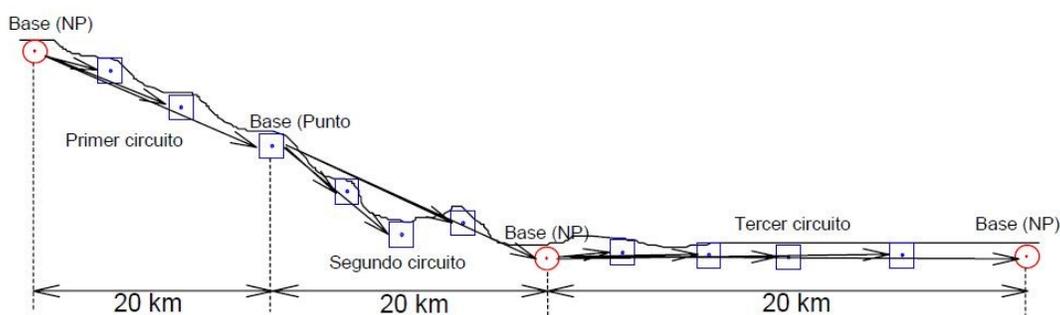
El IGAC desarrolló la guía para el cálculo de alturas sobre el nivel medio del mar a partir de posicionamiento GPS, para poder realizar el cálculo de la altura ortométrica de cada uno de los puntos capturados por sistema GNSS teniendo en cuenta puntos de control o bases con altura geométrica nivelada y la ondulación geoidal obtenida por el modelo geoidal GEOCOL 2004 vigente para Colombia.

La guía metodológica se divide en tres casos: Punto, Superficie y Perfil, siendo esta última a utilizada para realizar el cálculo de los puntos de terreno levantados en campo. Para este caso se sigue la siguiente metodología:

El primer paso es identificar el punto más cercano al proyecto que pertenezca a la red MAGNA-SIRGAS.

Se debe seleccionar un punto de nivelación (NP) al cual se le determina coordenadas horizontales y verticales a partir del punto inicial con el fin de obtener coordenadas de latitud, longitud, altura elipsoidal, altura nivelada y ondulación geoidal GEOCOL2004. Este punto de nivelación se convierte en el nuevo punto base para continuar con el perfil.

La longitud del perfil realizado no debe exceder los 20 km, en caso contrario, se debe dividir en varios circuitos; cuya base inicial corresponde al último punto del perfil anterior..



*Ilustración 13. Esquema de cálculo de la altura de puntos en perfil. Fuente Instituto Geográfico*

*Agustín Codazzi IGAC, 1997*

El último punto debe corresponder a un vértice que tenga altura geométrica. Si se presentan más NPs dentro al área del proyecto lo recomendable es involucrarlos como base para los circuitos.

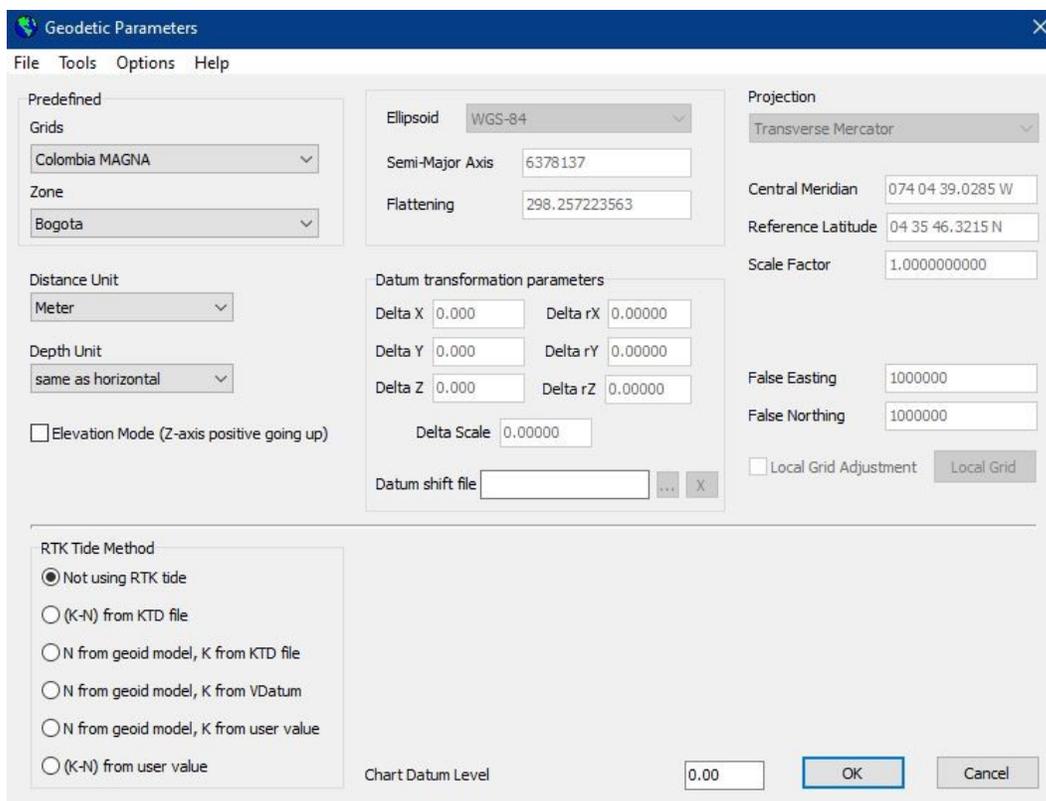
En este caso se utilizó el NP 9-CM-10 como base del cálculo, el punto de control 25175006 de la red pasiva del IGAC y los vértices GPS-01 y GPS-02 que pertenecen a nuestros puntos de control del proyecto como NPs con altura nivelada geoméricamente.

CÁLCULO Y AJUSTE DE ALTURAS GNSS, UTILIZANDO GEOCOL 2004 AJUSTE MÉTODO DE PERFIL										
Punto	Altura Elipsoidal	Altura Geoidal	Altura Nivelada	Dhi = hri-hBase	DNi = NRi-NBase	DHGP Si = Dhi-DNi	H°GPSi = HBase + DHGPSi	ΔH°G PS = ΔHi - ΔHi-1	H°GPSi = Hbase+ DHi	HGPS Final
NP9-CM-10	2570.709	25.42	2548.440	0.0000	0.0000	0.0000				2548.440
25175006	2580.007	25.39	2557.742	9.2980	-0.0300	9.3280	2557.768	9.3280	9.3276	2557.768
1	2567.301	25.38		-3.4080	-0.0400	-3.3680	2545.072	-12.696	-12.6964	2545.071
2	2569.308	25.38		-1.4010	-0.0400	-1.3610	2547.079	2.0070	2.0066	2547.078
3	2571.379	25.39		0.6700	-0.0300	0.7000	2549.140	2.0610	2.0606	2549.138
4	2571.579	25.39		0.8700	-0.0300	0.9000	2549.340	0.2000	0.1996	2549.338
5	2571.787	25.38		1.0780	-0.0400	1.1180	2549.558	0.2180	0.2176	2549.556
GPS02	2575.412	25.39	2553.087	4.7030	-0.0300	4.7330	2553.173	8.5810	8.5806	2553.129
116	2566.899	25.38		-3.8100	-0.0400	-3.7700	2544.670	-8.5030	-8.5034	2544.625
117	2567.415	25.38		-3.2940	-0.0400	-3.2540	2545.186	0.5160	0.5156	2545.141
118	2570.021	25.38		-0.6880	-0.0400	-0.6480	2547.792	2.6060	2.6056	2547.746
119	2570.011	25.38		-0.6980	-0.0400	-0.6580	2547.782	-0.0100	-0.0104	2547.736
120	2570.021	25.38		-0.6880	-0.0400	-0.6480	2547.792	0.0100	0.0096	2547.746
GPS01	2581.462	25.39	2559.135	10.753	-0.0300	10.783	2559.223	15.999	15.9986	2559.135

### Ecosonda Monohaz

La Ecosonda Monohaz utilizada para la captura de la información batimétrica corresponde a un equipo ODOM HYDROTRAC. El registro de los datos exporta un archivo crudo en extensión \*.raw al final de cada línea levantada y un archivo de extensión \*.log el cual contiene todos los transectos de medición en un solo archivo.

El equipo utilizado está vinculado al software HYPACK, el cual permite la visualización, procesamiento, edición y exportación de la información cruda. Al iniciar el software se presenta una interfaz en blanco en donde una vez creado el proyecto se debe configurar el sistema de coordenadas al que está amarrado el levantamiento, en este caso MAGNA ORIGEN CENTRAL.



*Ilustración 14. Interfaz de configuración en origen Magna Central. Fuente propia*

Una vez configurado el origen de coordenadas, se procede a la importación de los datos, para optimización del proceso se importa el archivo con extensión \*.log el cual contiene todas las líneas de extensión \*.raw en un solo archivo, de esta manera si se tienen una gran cantidad de líneas levantadas no es necesario importarlas individualmente.

Para una visualización de los datos y su localización espacial, se realiza una primera exportación de información cruda a formatos \*KML, para observar su ubicación en la zona del proyecto. Para este trabajo con el fin de capturar la mayor cantidad de información, se realizaron cuatro líneas de información longitudinal y una en forma de zigzag, como se presenta a continuación:



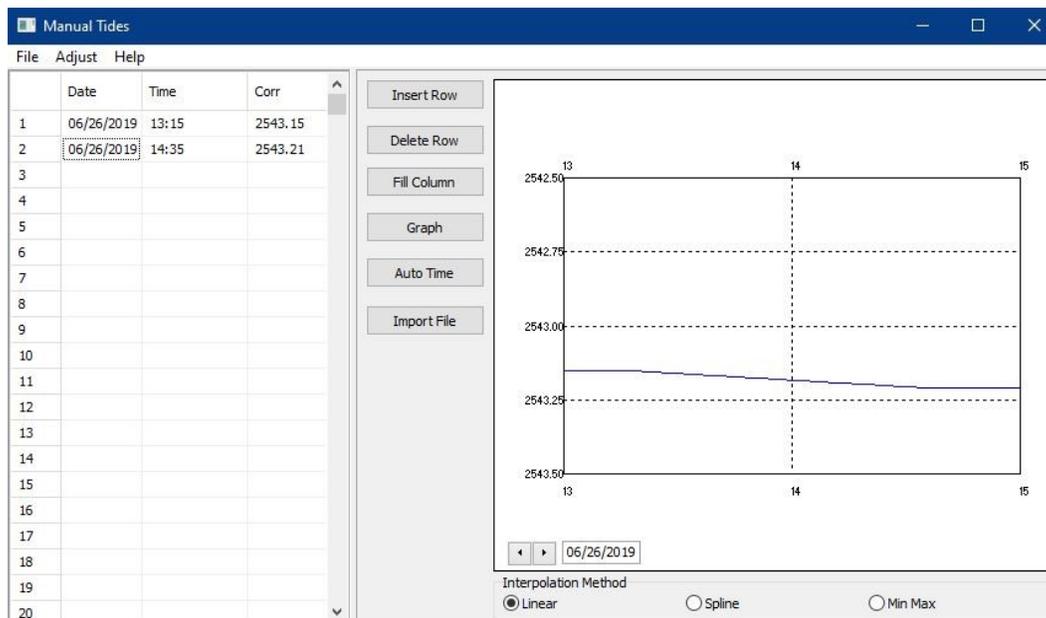
*Ilustración 15. Líneas batimétricas levantadas mediante Ecosonda Monohaz. Fuente propia*

El sensor registra para cada línea la fecha, hora y la profundidad cruda capturada. Debido a que el equipo batimétrico está vinculado a una antena GNSS usada como Rover y que a su vez está conectada con una antena base con coordenadas conocidas y fijadas, los datos de ecosondeo registran coordenadas geodésicas (Latitud y longitud) y planas en el origen correspondiente de la zona del proyecto (Este y Norte) para establecer la posición exacta de cada punto capturado.

En el panel superior de la interfaz del software se presentan una serie de herramientas que nos permiten realizar los ajustes de marea y posteriormente el ajuste de los datos de calado de cada una de las líneas levantadas, esta información corresponde a datos capturados en campo al momento de la ejecución de la batimetría.

Como primer dato de corrección, se procede a realizar un archivo de mareas el cual permita editar el valor de la elevación que posee el espejo de agua de cada una de las líneas levantadas. Se usa la herramienta Tides (Mareas), en la cual se pueden crear distintos tipos de archivo de mareas de tipos posibles, el primero basado en datos de predicciones de modelamientos

hidráulico y el segundo a partir de datos manuales. Debido a que para este ejercicio en campo 41 se procedió a tomar información de la altura de la lámina de agua en campo simultaneo a la captura de batimetría, se creó un archivo de mareas con la información de la cota de lámina de agua previamente procesada en el ajuste de puntos RTK y su altura determinada por la metodología para calcular alturas ortométricas usando el caso de perfil desarrollada por el IGAC.



*Ilustración 16. Creación de archivo de mareas. Fuente propia*

Posteriormente una vez definido el archivo de mareas, se procede a la depuración de información capturada por el sensor. Con la herramienta de edición, se importa nuevamente el archivo seleccionando todas las líneas levantadas, en esta ocasión se incluye el archivo de mareas previamente creado para que se realice automáticamente el ajuste de altura de lámina de agua para cada una de las líneas levantadas. Las ilustraciones 17 y 18 presentan las ventanas de importación de esta información.

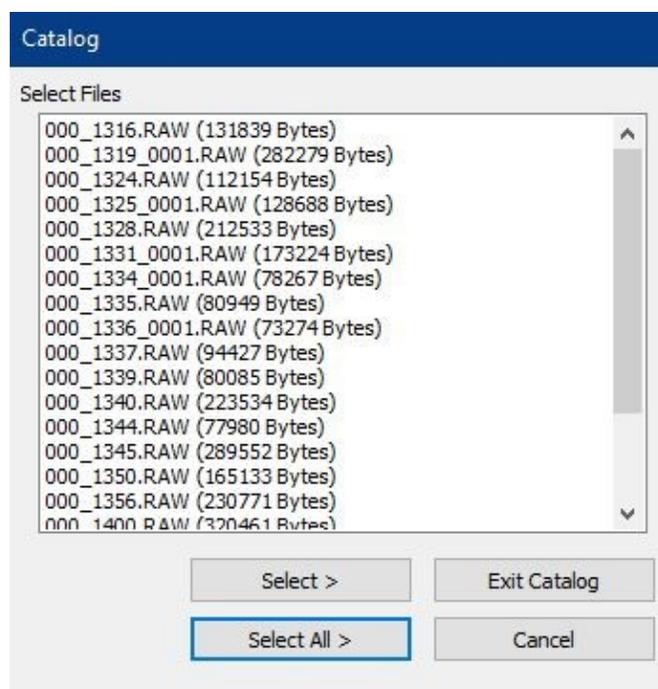


Ilustración 17. Selección de líneas de medición crudas. Fuente propia

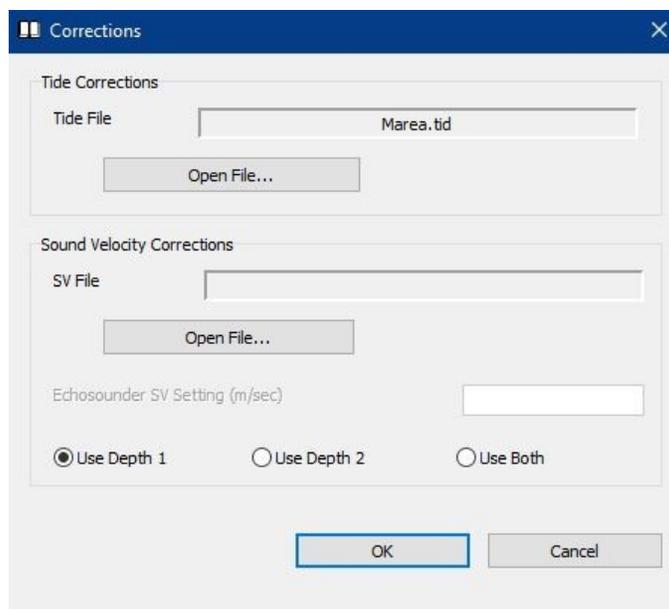
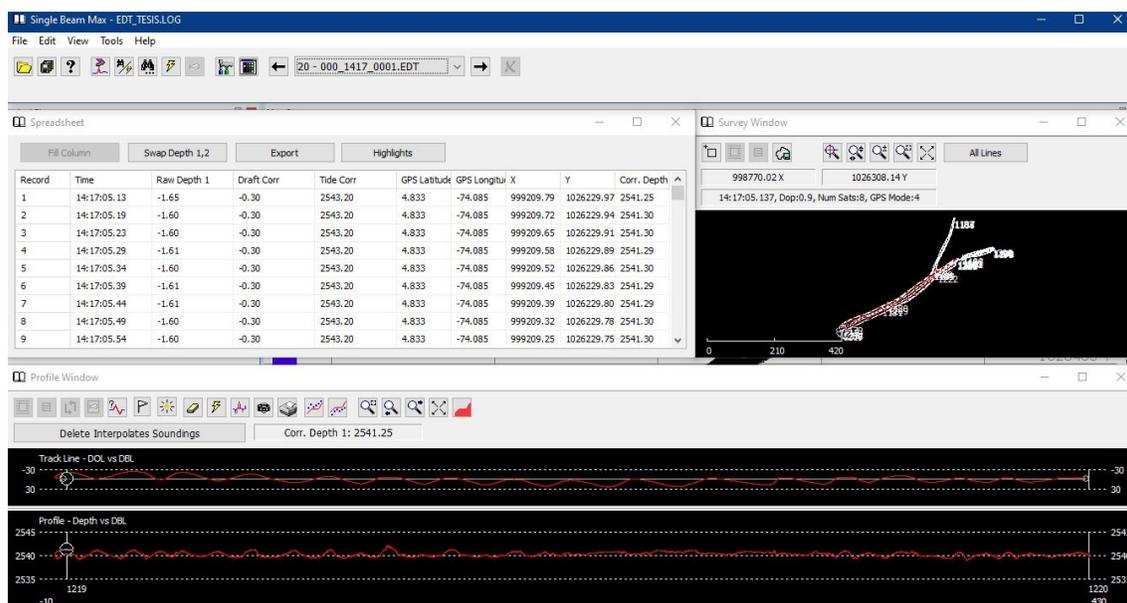


Ilustración 18. Importación de archivos de mareas. Fuente propia

Esta misma ventana permite definir el tipo de profundidad que se está trabajando. Esta información depende de la configuración de las frecuencias al momento de realizar el levantamiento, en este caso, la Ecosonda se configuró de tal manera que se tomara únicamente una profundidad razón por la cual se selecciona la opción Usar profundidad 1. Una vez importados los datos se continua con el proceso de edición de la información.



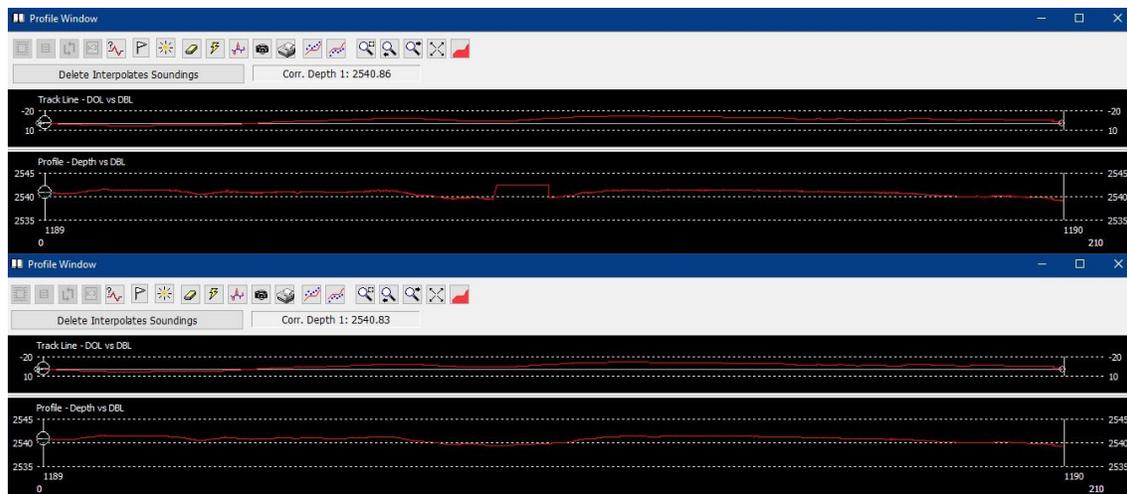
*Ilustración 19. Ventana de proceso y edición de datos batimétricos. Fuente propia*

La siguiente corrección que se debe realizar a cada línea, es la altura de calado medida desde la lámina de agua hasta la profundidad del transductor, de acuerdo a la información capturada en campo, se debe realizar el ajuste en cada línea para que se calcule la profundidad real de los datos. Esta información se puede ingresar directamente en los parámetros del levantamiento en campo, de ser así al momento de importar la información no es necesario realizar esta modificación.

Con esta información se calcula a través de una operación de sumatoria algebraica la profundidad corregida de cada uno de los puntos:

$$\text{Profundidad Corregida} = \text{Cota de Nivel de Agua} - (\text{Profundidad Cruda} + \text{Altura de Calado}) \quad 44$$

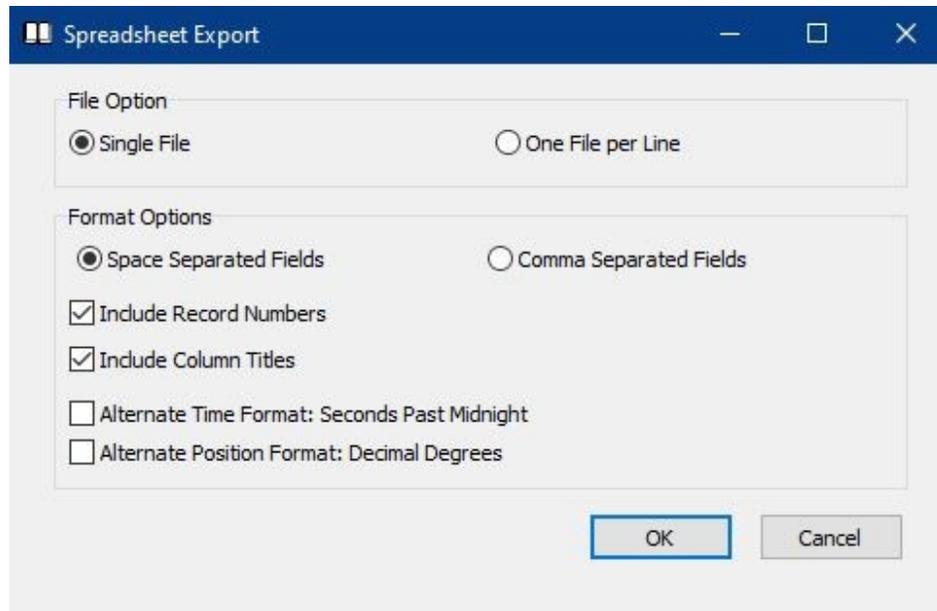
Por último, antes de realizar la exportación de los datos, se realiza una depuración de la información capturada para minimizar el ruido en la nube de puntos de cada línea debido al movimiento de la plataforma por la corriente de agua, en algunos casos se presenta información errada, la cual es necesario depurar para obtener profundidades más precisas. Para esto se selecciona el área que abarque la sección en la ventana de perfil y se hace un suavizado por un determinado número de muestras, este valor corresponde al promedio de muestras que va a tomar el software para promediar los datos y eliminar el ruido, entre menor sea el valor del número de muestras menos se verá alterado el valor de la profundidad. Para este caso en particular se definió un valor de 10 muestras de tal manera que la profundidad no se vea afectada y se obtengan las profundidades reales del cuerpo de agua levantado y tener un suavizado de la información para mejorar el resultado del MDT Integrado.



*Ilustración 20. Suavizado de información batimétrica. Fuente propia*

Con la información de profundidad corregida y el suavizado de las líneas se exportan los datos en un archivo en formato ASCII que registre la información de la hoja de cálculo del software, en

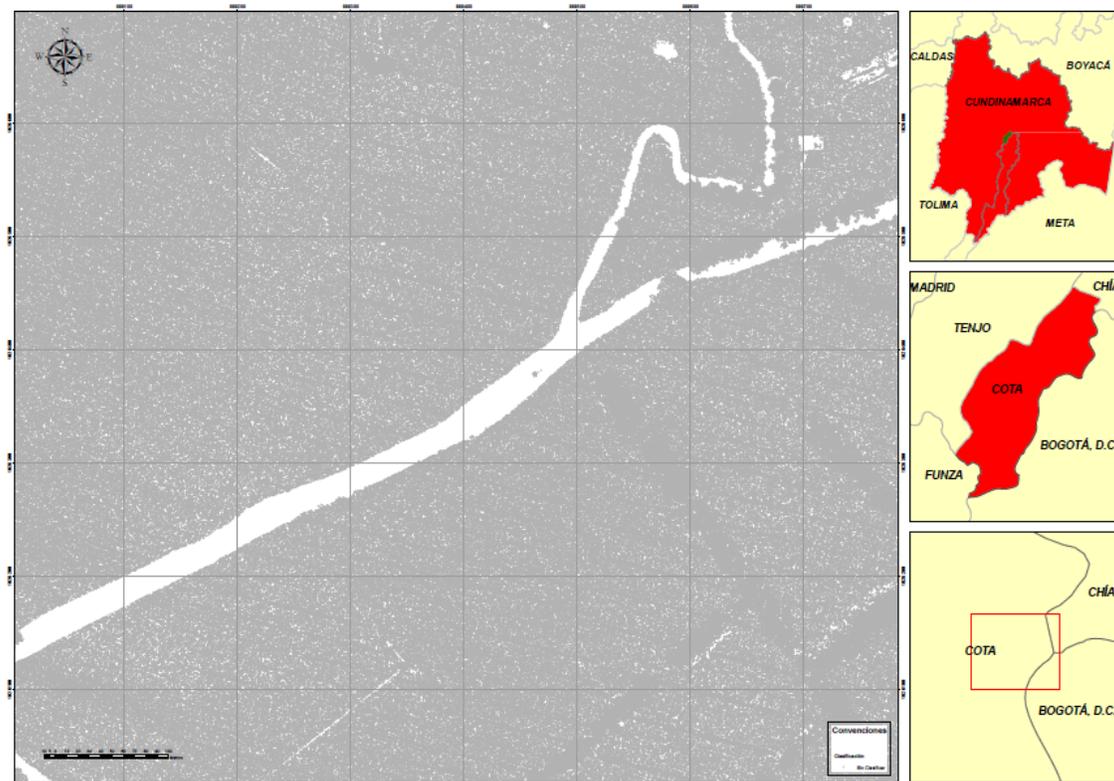
esta ventana se escogen las opciones de exportación de acuerdo a la preferencia del usuario, se 45 puede generar archivos por línea levantada o en un solo archivo exportar toda la información.



*Ilustración 21. Ventana de exportación. Fuente propia*

### **Clasificación de Nube de Puntos LiDAR**

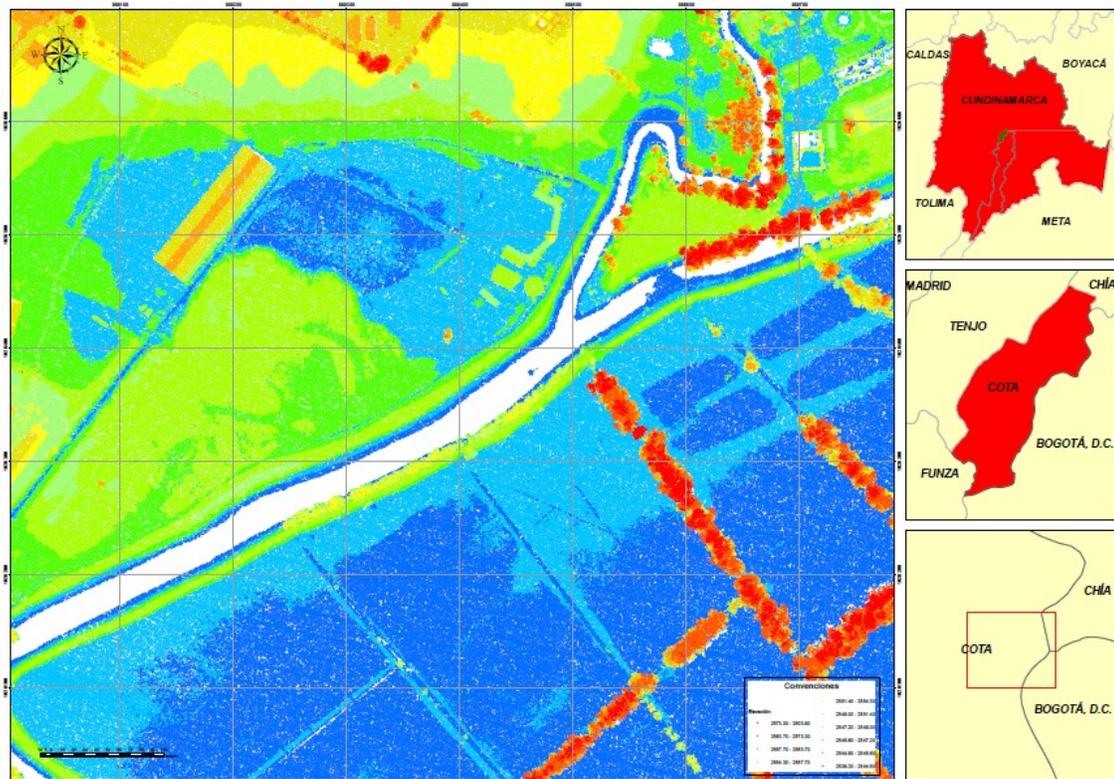
Los datos obtenidos por el sensor LiDAR, se pueden describir como una nube de puntos tridimensional que captura las diversas coberturas existentes en el área de estudio. Para el caso de este proyecto en donde se plantea generar un MDT, la información específica para su desarrollo es únicamente la referida al nivel del suelo. Para esto es necesario clasificar cada uno de los puntos capturados por el sensor para asignarle la cobertura correspondiente y así continuar con el desarrollo del proceso. La ilustración 22 presenta la nube de puntos sin clasificar obtenida por el sensor LiDAR.



*Ilustración 22. Mapa de datos LiDAR sin Clasificar. Fuente propia*

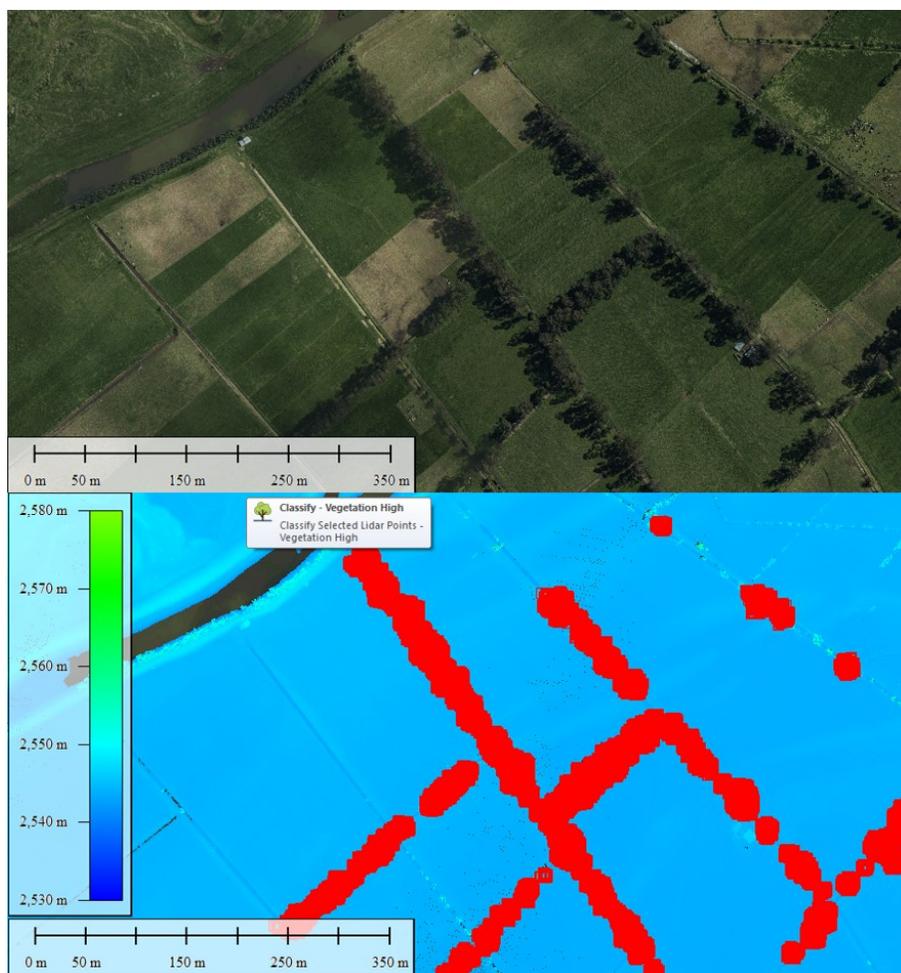
Existen múltiples aplicaciones y software especializados para realizar la clasificación y procesamiento de la información capturada por el sensor remoto, el problema radica en que dichos software como MicroStation y sus aplicaciones complementarias TerraModel y TerraScan o LasTools para software ArcGis, requieren de licencias de alto costo económico que pueden llegar a ser de difícil acceso para muchos usuarios; una posible solución son las herramientas que el software Global Mapper ofrece para asignar, a partir de criterios como elevación de la información, sobreposición de la información con Ortofotomosaicos y/o Imágenes Satelitales y conocimiento de la zona de estudio por trabajos de campo, la clasificación correspondiente a cada punto.

Inicialmente se realiza una clasificación preliminar a partir de las elevaciones de cada dato, 47 este método permite visualizar si existen cambios abruptos de elevaciones entre puntos contiguos los cuales representan dos o más coberturas en una misma zona, la ilustración 23 presenta la visualización por elevación de la nube de puntos LiDAR.

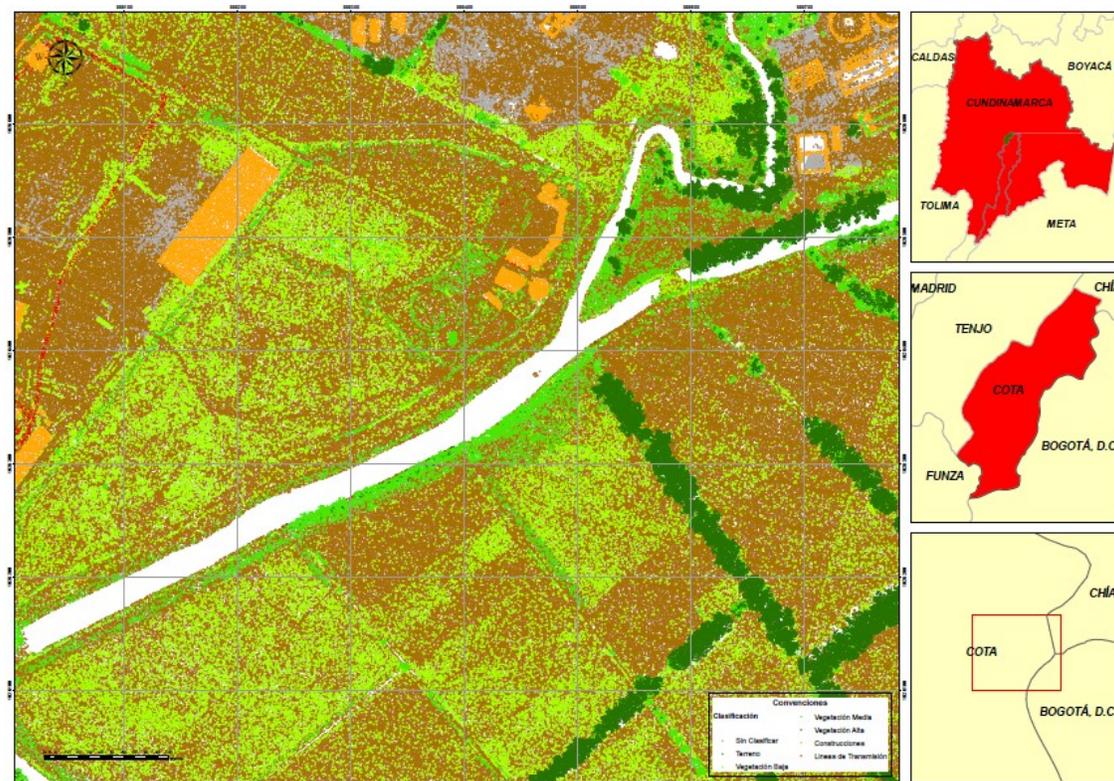


*Ilustración 23. Mapa de datos LiDAR visualizado por Elevación. Fuente propia*

Posteriormente a partir de sobreposición de información como imágenes satelitales y/o ortofotomosaicos se realiza la selección de grupos de puntos y se le asigna la clasificación correspondiente, de esta manera se obtiene la clasificación de la información capturada por el sensor remoto para la generación de productos como los MDS y MDT.



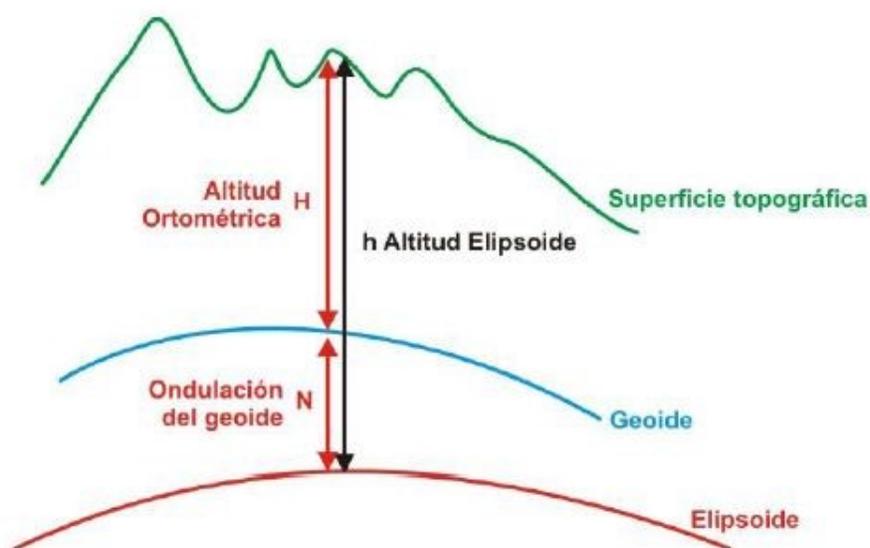
*Ilustración 24. Clasificación de Coberturas a partir de Imágenes. Fuente propia*



*Ilustración 25. Mapa de datos LiDAR Clasificado. Fuente propia*

### **Corrección de Altura de nube de puntos LiDAR**

El último paso del procesamiento de la información capturada por el sensor LiDAR es convertir la altura de la nube de puntos elipsoidal a ortométrica, esto debido a que la información del MDT final se presenta en relación a la elevación sobre el nivel medio del mar. La ilustración 26 presenta los tipos de alturas existentes, en donde la altura elipsoidal es la obtenida a partir de sistemas GNSS y los vinculados a estos como los sensores remotos LiDAR.

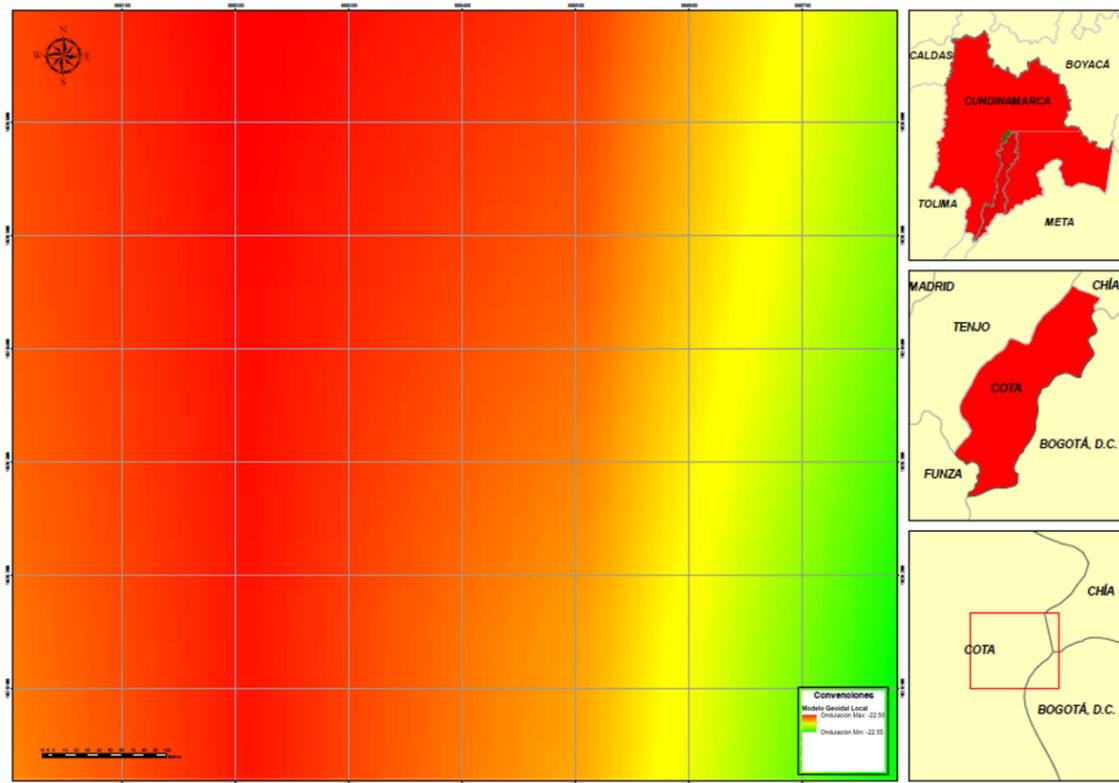


*Ilustración 26. Esquema de tipos de alturas. Fuente (Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 1997)*

El cálculo de la altura ortométrica está definida como la diferencia entre la Altura Elipsoidal calculada a partir de los sistemas GNSS y la Ondulación Geoidal. Esta última se refiere a la suministrada a partir de un modelo geoidal estructurado a partir de redes de nivelación, gravimétricas y de posicionamiento. Debido a que el modelo geoidal GEOCOL 2004 determinado por el IGAC está definido como cuasi-modelo y algunas de sus líneas de nivelación y red geodésica requieren un ajuste, la ondulación suministrada presenta errores de precisión y por lo tanto se requiere el uso de la guía para el cálculo de alturas ortométricas, desarrollada por la misma entidad.

Puesto a que la nube de puntos tiene una resolución espacial de 10 puntos por metro cuadrado no es fiable utilizar esta metodología debido a la densidad de puntos. En este caso se utilizó un modelo geoidal local único para la zona del proyecto, el cual fue desarrollado con base a los

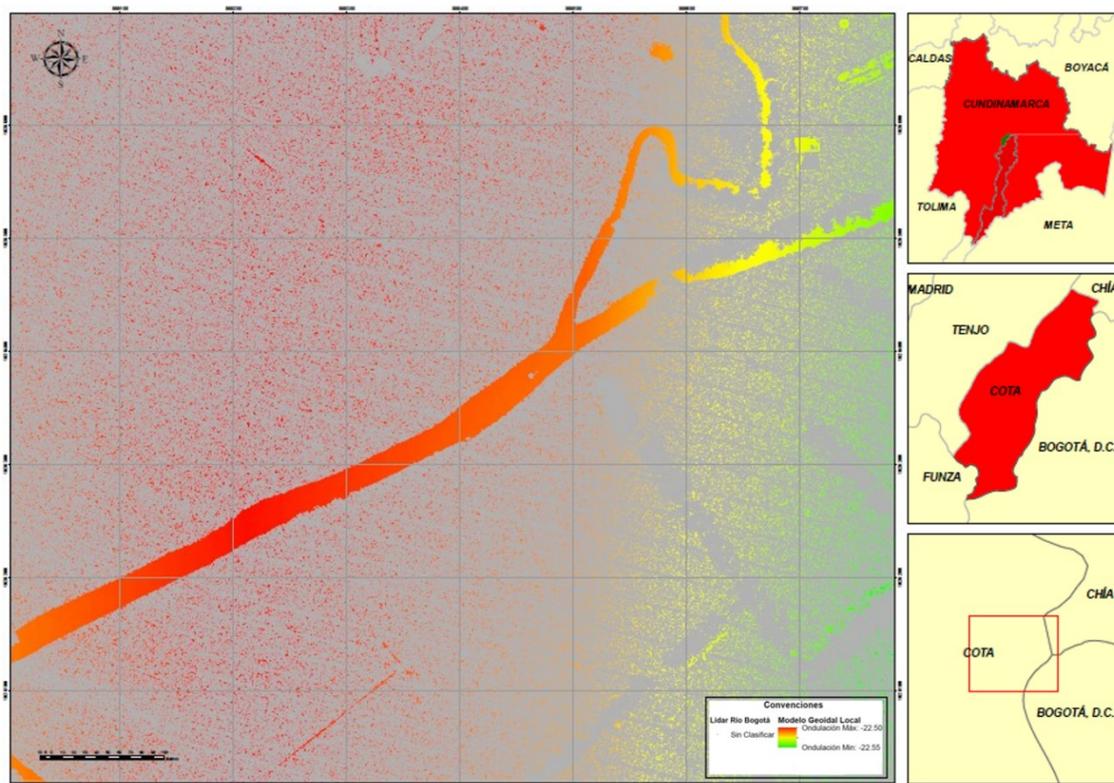
puntos de nivelación del proyecto y facilitado por la dependencia de cartografía de la empresa 51  
INCIGE SAS, la ilustración #22 presenta el modelo geoidal usado para la zona del proyecto.



*Ilustración 27. Mapa de Ondulaciones Geoidales Locales para la zona del proyecto. Fuente propia*

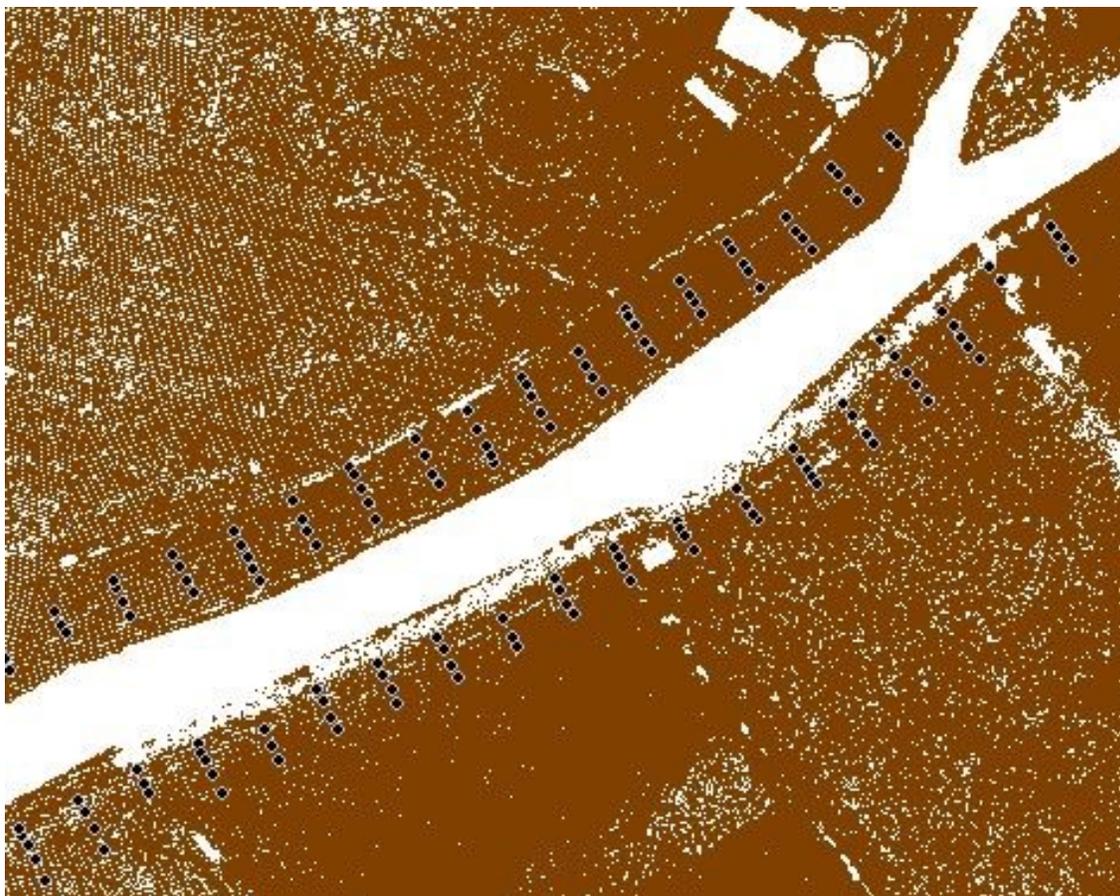
La aplicación de un modelo geoidal local facilita el cálculo de alturas ortométricas con una excelente precisión que minimiza los errores arrojados por la aplicación de la metodología determinada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

En este caso al contar con una nube de puntos masiva con altura elipsoidal extraída del sensor LiDAR, se realiza una sobreposición de la información con el modelo geoidal local y por medio de una operación matemática de sustracción se calculan las alturas ortométricas de cada uno de los puntos.



*Ilustración 28. Mapa de Nube de puntos LiDAR sobrepuesta en el modelo geoidal. Fuente propia*

Una vez procesada la nube de puntos se realiza un control de calidad entre la información de terreno levantada por metodología RTK y LiDAR procesada, la primera con altura ortométricas determinada a partir de la metodología IGAC y la segunda con la aplicación del modelo geoidal local para encontrar las diferencias y el error medio de la nube LiDAR y así mismo del MDT finalmente generado.



*Ilustración 29. Nube de puntos de datos RTK junto con nube de puntos LIDAR. Fuente propia*

Para realizar la verificación de alturas, se genera una triangulación preliminar únicamente con la información LiDAR, generando una superficie a la cual se le hará comparación con la información RTK, este proceso se realiza aplicando las elevaciones de la superficie generada a los puntos de comparación, posteriormente se exporta la información y se calcula la diferencia entre los puntos con altura ortométrica a los puntos con altura LiDAR, los resultados se presentan en la tabla 7.



*Ilustración 30. Superficie preliminar generada con datos LiDAR. Fuente propia*

*Tabla 7. Diferencias entre RTK y Nube de puntos LiDAR ortométrica*

<b>ELEVACIÓN RTK</b>	<b>ELEVACIÓN LIDAR</b>	<b>RESIDUAL</b>	<b>ELEVACIÓN RTK</b>	<b>ELEVACIÓN LIDAR</b>	<b>RESIDUAL</b>
2545.071	2545.076	-0.005	2544.721	2544.668	0.053
2547.078	2547.064	0.014	2544.893	2544.889	0.004
2549.138	2549.142	-0.004	2547.452	2547.481	-0.029
2549.338	2549.219	0.119	2547.686	2547.812	-0.126
2549.556	2549.459	0.097	2544.788	2544.677	0.111
2549.194	2549.194	0.000	2545.213	2545.297	-0.084
2547.908	2547.909	-0.001	2547.480	2547.476	0.004
2545.771	2545.772	-0.001	2547.783	2547.646	0.137
2547.043	2547.044	-0.001	2546.344	2546.296	0.048
2547.944	2547.950	-0.006	2547.492	2547.387	0.105
2549.362	2549.362	0.000	2547.472	2547.477	-0.005
2549.572	2549.490	0.082	2544.978	2544.918	0.060
2549.385	2549.322	0.063	2544.816	2544.813	0.003
2549.374	2549.276	0.098	2544.589	2544.590	-0.001
2547.762	2547.674	0.088	2547.132	2547.131	0.001
2545.903	2545.971	-0.068	2547.497	2547.373	0.124
2549.177	2549.042	0.135	2547.503	2547.503	0.000
2549.084	2549.083	0.001	2547.791	2547.795	-0.004
2548.696	2548.682	0.014	2546.862	2546.744	0.118
2547.937	2547.877	0.060	2544.948	2544.950	-0.002
2548.951	2548.812	0.139	2544.520	2544.511	0.009
2548.686	2548.552	0.134	2544.581	2544.562	0.019
2545.537	2545.671	-0.134	2545.062	2545.065	-0.003
2547.438	2547.439	-0.001	2547.635	2547.646	-0.011

ELEVACIÓN RTK	ELEVACIÓN LIDAR	RESIDUAL	ELEVACIÓN RTK	ELEVACIÓN LIDAR	RESIDUAL
2548.380	2548.379	0.001	2547.538	2547.677	-0.139
2548.470	2548.446	0.024	2547.821	2547.826	-0.005
2545.484	2545.573	-0.089	2544.937	2544.938	-0.001
2545.107	2545.039	0.068	2544.650	2544.640	0.010
2544.857	2544.851	0.006	2544.666	2544.644	0.022
2548.137	2548.065	0.072	2544.824	2544.948	-0.124
2548.083	2548.083	0.000	2547.690	2547.653	0.037
2546.400	2546.277	0.123	2547.772	2547.749	0.023
2545.863	2545.864	-0.001	2547.800	2547.818	-0.018
2546.745	2546.625	0.120	2547.742	2547.751	-0.009
2548.095	2548.092	0.003	2544.985	2544.984	0.001
2548.103	2547.984	0.119	2544.548	2544.545	0.003
2544.823	2544.834	-0.011	2544.625	2544.610	0.015
2546.929	2546.816	0.113	2545.141	2545.139	0.002
2548.301	2548.299	0.002	2547.746	2547.740	0.006
2548.417	2548.298	0.119	2547.736	2547.706	0.030
2546.017	2545.950	0.067	2547.746	2547.761	-0.015
2544.591	2544.596	-0.005	2544.826	2544.830	-0.004
2546.493	2546.500	-0.007	2544.577	2544.552	0.025
2548.308	2548.291	0.017	2545.103	2545.091	0.012
2548.370	2548.258	0.112	2545.303	2545.293	0.010
2546.904	2546.830	0.074	2547.376	2547.489	-0.113
2546.488	2546.379	0.109	2547.525	2547.542	-0.017
2547.062	2547.064	-0.002	2547.876	2547.878	-0.002
2548.111	2547.975	0.136	2548.016	2548.013	0.003
2548.054	2547.954	0.100	2546.107	2546.109	-0.002
2544.649	2544.743	-0.094	2545.317	2545.214	0.103
2544.984	2544.941	0.043	2545.192	2545.090	0.102
2547.997	2547.947	0.050	2545.724	2545.693	0.031
2547.859	2547.859	0.000	2547.904	2547.777	0.127
2546.961	2546.962	-0.001	2547.908	2547.909	-0.001
2546.319	2546.337	-0.018	2547.911	2547.913	-0.002
2546.940	2546.931	0.009	2547.874	2547.874	0.000
2547.826	2547.726	0.100	2545.527	2545.599	-0.072
2547.616	2547.592	0.024	2544.926	2544.927	-0.001
2545.223	2545.224	-0.001	2545.016	2544.890	0.126
2545.464	2545.475	-0.011	2545.002	2544.888	0.114
2547.741	2547.737	0.004	2544.846	2544.841	0.005
2547.993	2547.879	0.114	2547.878	2547.765	0.113
2547.114	2547.056	0.058	2547.669	2547.664	0.005
2546.188	2546.285	-0.097	2544.459	2544.481	-0.022
2546.998	2546.914	0.084	2547.533	2547.531	0.002
2547.829	2547.865	-0.036	2547.565	2547.426	0.139
2546.595	2546.662	-0.067	2545.027	2545.030	-0.003
2544.439	2544.375	0.064	2545.076	2544.938	0.138
2544.454	2544.361	0.093	2544.758	2544.758	0.000
2546.153	2546.059	0.094	2544.898	2544.895	0.003
2547.665	2547.611	0.054	2545.114	2545.029	0.085
2547.187	2547.090	0.097	2547.354	2547.276	0.078
2546.755	2546.644	0.111	2547.272	2547.270	0.002
2547.308	2547.312	-0.004	2547.088	2547.089	-0.001

ELEVACIÓN RTK	ELEVACIÓN LIDAR	RESIDUAL	ELEVACIÓN RTK	ELEVACIÓN LIDAR	RESIDUAL
2547.532	2547.409	0.123	2547.165	2547.167	-0.002
2545.775	2545.773	0.002	2544.675	2544.676	-0.001
2545.971	2545.879	0.092	2546.969	2546.969	0.000
2544.955	2544.954	0.001	2547.181	2547.177	0.004
			2544.829	2544.828	0.001

Después de realizado el control de calidad, los resultados de los residuales entre la nube de puntos RTK con la nube de puntos LiDAR, se obtuvo un error promedio de 3 cm, una vez aprobado el control de calidad se procede a realizar la integración de la información.

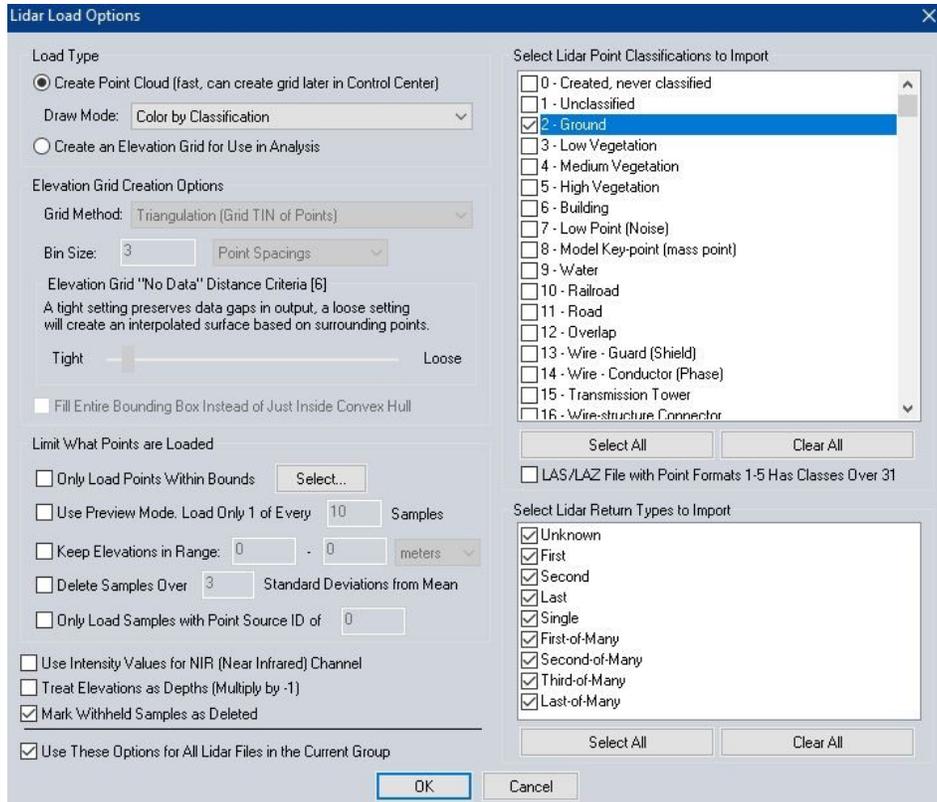
### **Generación de Modelo Digital de Terreno Topobatimétrico**

A través de un software SIG que permita importar nubes de puntos LiDAR se puede realizar la triangulación de la información capturada por los sensores remotos; ArcGIS es un uno de ellos, pero está limitado a que se debe contar con un equipo de cómputo con características ideales que permitan cargar y procesar una gran cantidad de información como es el caso de este ejercicio. Para realizar el modelamiento se utilizó el software Global Mapper, el cual permite importar diversos tipos de formatos y brinda mayor celeridad en el procesamiento de la información.

El software permite realizar una unificación de la información de cada uno de los puntos generando una malla de triángulos irregulares (TIN) los cuales interpolan la información en las zonas de gaps (espacios sin información) entre las nubes de puntos LiDAR y Batimétricas para la generación del modelo digital de terreno.

Al cargar la información del sensor LiDAR aparece la ventana de opciones de importación de datos, en esta ventana se configura que el tipo de importación sea tipo nube de puntos, el modo de representación sea por clasificación y que la información de puntos sea Ground (Terreno), si en el procesamiento de la información no se definió la proyección, se configura el sistema de

coordenadas proyectado en el cual se encuentra la zona de estudio, por otro lado, si esta información está definida en la nube de puntos, los datos se cargarán automáticamente.



*Ilustración 31. Configuración ventana de importación de datos LiDAR. Fuente propia*

Para la importación de la información batimétrica exportada del software HYPACK, se requiere crear un archivo de coordenadas en formato plano (txt, csv, etc.) el cual tendrá la configuración de coordenadas Este, Norte y la Cota de profundidad, como se presenta a continuación:

```

999209.860 1026250.610 2539.32
999209.910 1026250.580 2539.30
999209.800 1026250.640 2539.31
999209.750 1026250.670 2539.32
999209.700 1026250.700 2539.32
999209.650 1026250.730 2539.32
999209.600 1026250.760 2539.32
999209.540 1026250.790 2539.32
999209.490 1026250.820 2539.33
999209.440 1026250.850 2539.33
999209.390 1026250.880 2539.34
999209.340 1026250.910 2539.34
999209.230 1026250.970 2539.36
999209.180 1026251.000 2539.37
999209.130 1026251.030 2539.38
999209.070 1026251.060 2539.39
999209.020 1026251.090 2539.41
999208.980 1026251.130 2539.42

```

*Ilustración 32. Ejemplo archivo de coordenadas batimétricas en formato plano. Fuente propia*

Al importar el archivo se abre una ventana en donde se realiza una configuración básica de acuerdo a su estructura.

**Generic ASCII Text File Import Options (Batimetria.txt)**

**Import Type**

- Point Only (All Features are Points)
- Point, Line, and Area Features
- Area Only (All Features are Polygons / TINs)
- Elevation Grid from 3D Point Data
- Lidar Point Cloud (3D Points + Optional Intensity/Color)

**Coordinate Order:** X / Easting / Longitude Coordinate First

**Coordinate Format:** Default (Decimal or Separated)

**Coordinate Layout**

Fields to Skip at Start of Line: 0

Rows to Skip at Start of File: 0

Coordinate Pairs Per Line: 1

**Coordinate Line Prefix**

- None. Coordinates appear immediately at the start of any lines in the text file that they appear in.
- For example, some ASCII formats may begin a coordinate line with XY.

Select Coordinate Offset/Scale...

Use Selected Options for All ASCII Files

**Coordinate Delimiter**

Select the characters that are used to separate the coordinates in a coordinate line from the file. Select the Auto-Detect option if you are not sure.

- Auto-Detect
- Comma
- Space or tab
- Semi-colon
- Tab

**Feature Classification**

Assign Loaded Area Features the Classification: Unknown Area Type

Assign Loaded Line Features the Classification: Unclassified Line Feature

Assign Loaded Point Features the Classification: Unknown Point Feature

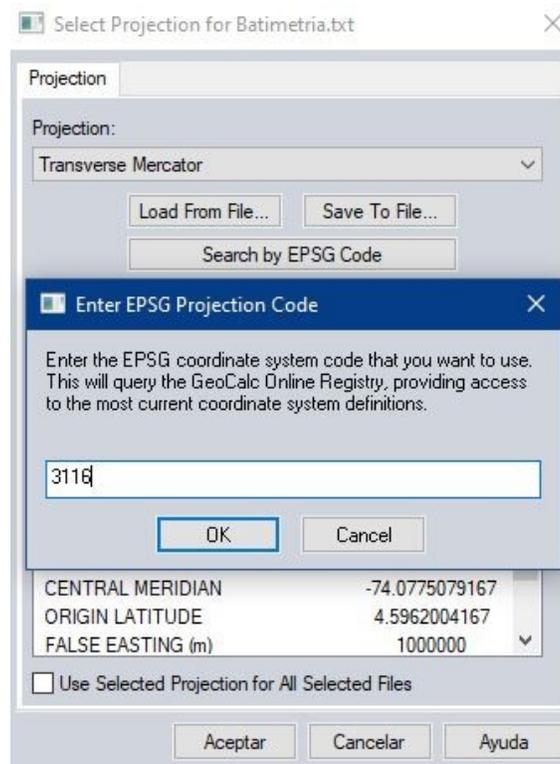
Assign Loaded Lidar Samples the Classification: 0 - Created, never classified

- Include attributes from lines with coordinate data
- Column headers in first row of file (points/WKT only)
- Treat 3rd coordinate value as elevation. No Data = -999999
- Treat coordinate values 4-8 as fly-through path data
- Break Line/Area Features on Change in Field 3
  - Break Field is Pen Up/Down (0/1)
- Create Areas from Closed Lines

Buttons: OK, Cancel, Help

*Ilustración 33. Configuración ventana de importación datos batimétricos. Fuente propia*

Posteriormente se define el sistema de coordenadas del proyecto. Global Mapper cuenta con<sup>59</sup> la información de los códigos EPSG (European Petroleum Survey Group), los cuales contienen la información de los parámetros geodésicos de cada uno de los sistemas de referencia geocéntricos del mundo, en este caso corresponde al sistema Magna Origen Bogotá, con código EPSG 3116.



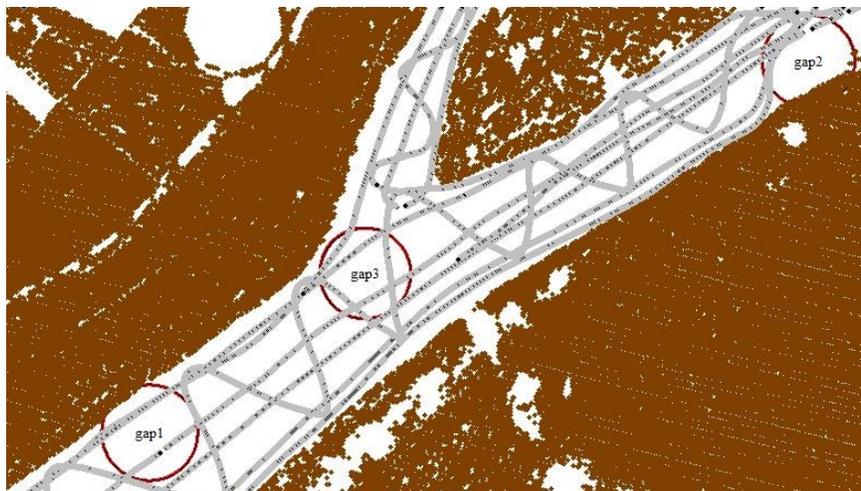
*Ilustración 34. Configuración de proyección Global Mapper datos de Ecosonda. Fuente propia*

Finalizando la importación de la información capturada por los sensores remotos y procesada se observa de la siguiente manera:



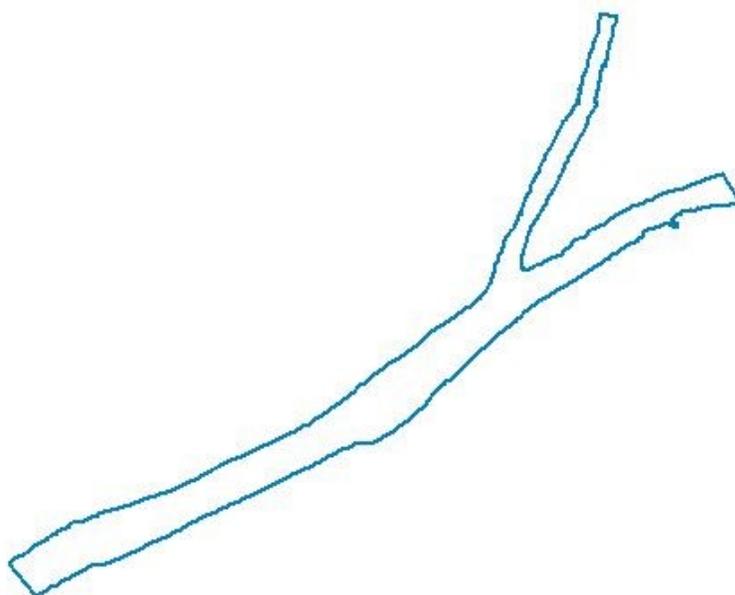
*Ilustración 35. Nubes de puntos LiDAR y Batimétrica en Global Mapper. Fuente propia*

Como se realizó el levantamiento Batimétrico empleando una Ecosonda Monohaz, se presentan zonas vacías de información entre la nube de puntos LiDAR clasificada y la zona del cuerpo de agua, lo cual genera triangulaciones de mayor longitud a la implementada en las zonas de terreno y por lo tanto la presentación del modelo podría verse antiestético.



*Ilustración 36. Acercamiento a zonas de gaps entre LiDAR y Batimetría. Fuente propia*

Para solucionar el problema y generar un modelo más suavizado sin que pierda la precisión, se genera inicialmente una triangulación de la información batimétrica con el fin de generar una grilla de puntos que cubran las zonas faltantes. Para este proceso, se requiere la delimitación del borde del cuerpo de agua, el cual se puede definir mediante puntos de levantamiento topográfico levantados a través de métodos convencionales, GNSS, tecnologías LiDAR o una restitución si se cuenta con una imagen satelital o fotografías aéreas.

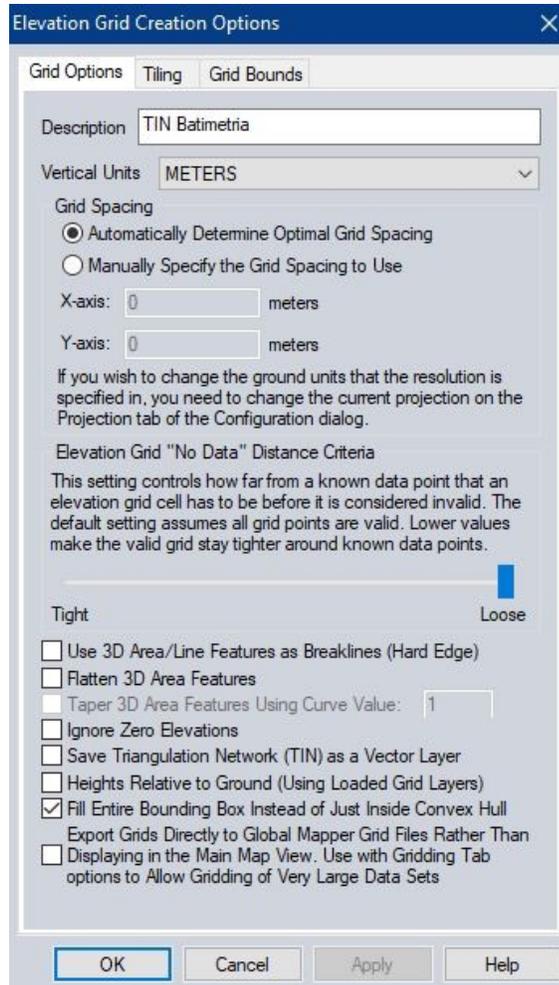


*Ilustración 37. Delimitación de cuerpo de agua. Fuente propia*

Seleccionando el polígono de delimitación del cuerpo de agua y la nube de puntos batimétrica se genera la superficie inicial del fondo del lecho del río, a través de la herramienta Generate Elevation Grid from 3D Vector/LiDAR Data. Al abrir la herramienta, se despliega una ventana con tres pestañas, en la primera se configuran los parámetros de la superficie a generar:

- Nombre de la superficie
- Unidades verticales: en este caso son métricas
- Método de generación de la grilla: corresponde a una superficie de triangulación entre la información procesada (TIN). Es posible definir el espaciamiento de la triangulación, pero por recomendación con el fin de obtener la mejor interpolación de los datos se selecciona la opción de Espaciamiento por defecto, la cual determina el espaciamiento óptimo de acuerdo a la distribución de los puntos.

- En la parte inferior se debe activar la Casilla Fill Entire Bounding Box Instead of Just Convex Hull, con el fin de llenar todos los espacios sin información. 63



*Ilustración 38. Interfaz ventana de creación de superficie. Fuente propia*

La segunda pestaña permite generar archivos en forma de mosaico, de tal manera que la información resultante este fragmentada en archivos de un tamaño específico a criterio del usuario, para los casos de generación de superficies no se tendrá en cuenta, para esto se activa la opción No Tiling – Just One Export File.

Por último, en la tercera pestaña permite realizar el recorte de la superficie de tal manera 64

que no realice triangulaciones inexistentes, este recorte se realiza con el polígono de delimitación del borde del cuerpo de agua; en este caso se selecciona la opción Crop to Selected Area Feature(s).

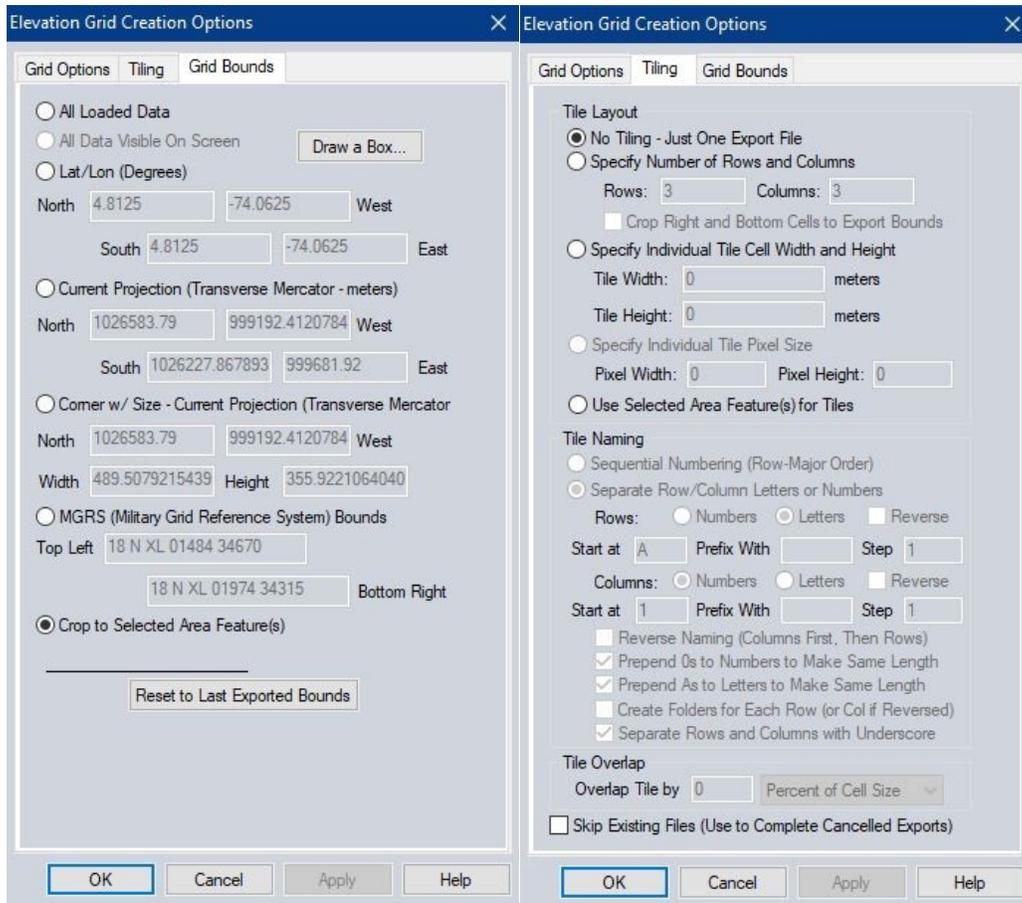
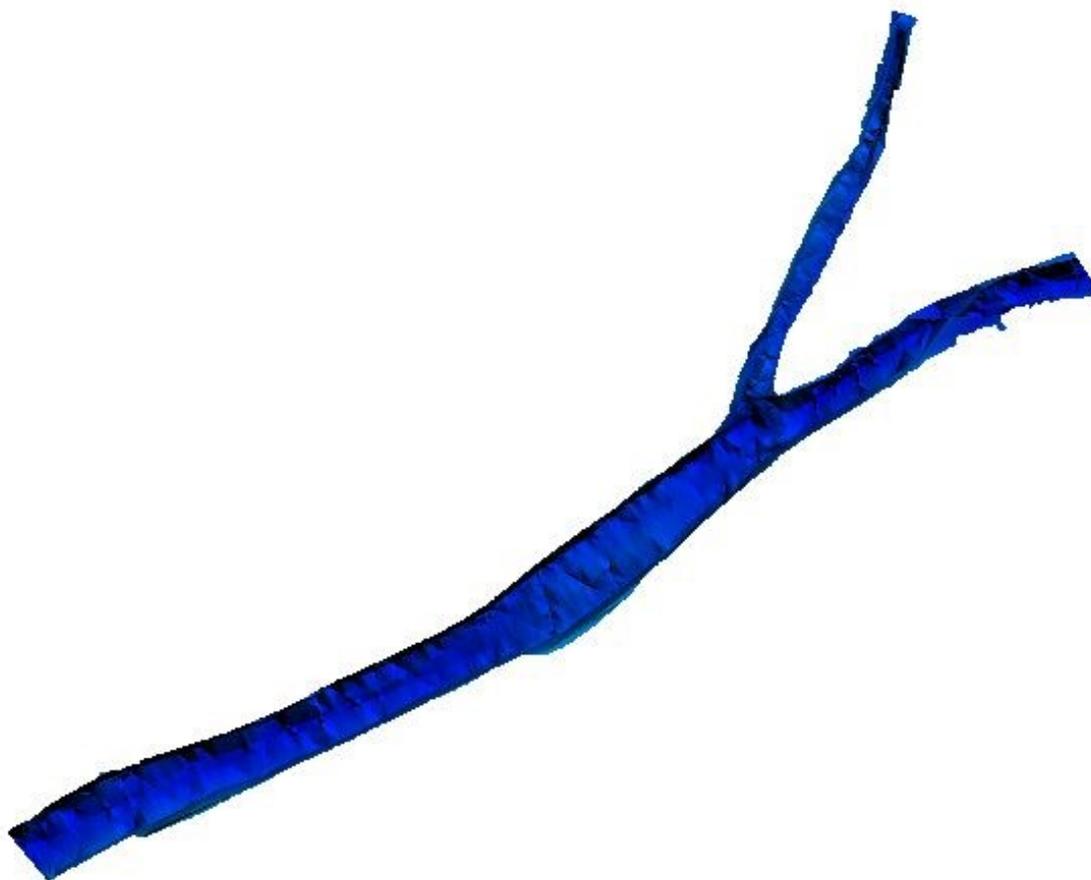


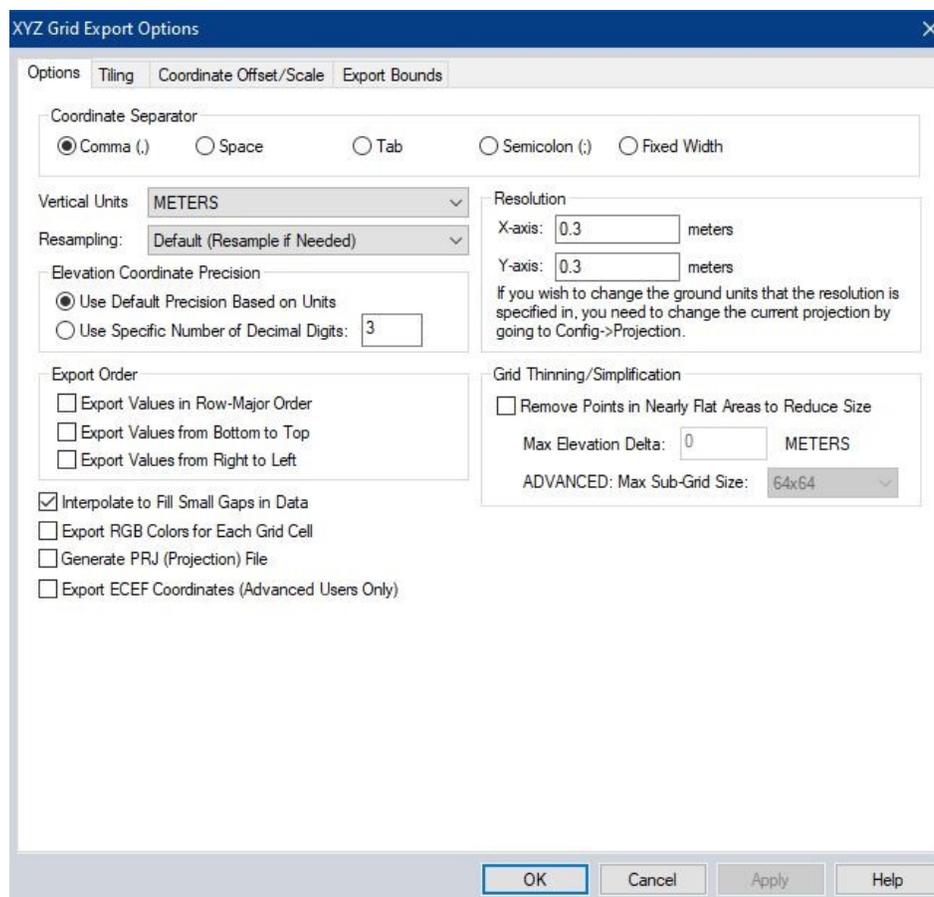
Ilustración 39. Pestañas de Mosaico y Corte. Fuente propia

Una vez configuradas las ventanas de construcción de la superficie, se genera una triangulación de la información seleccionada.

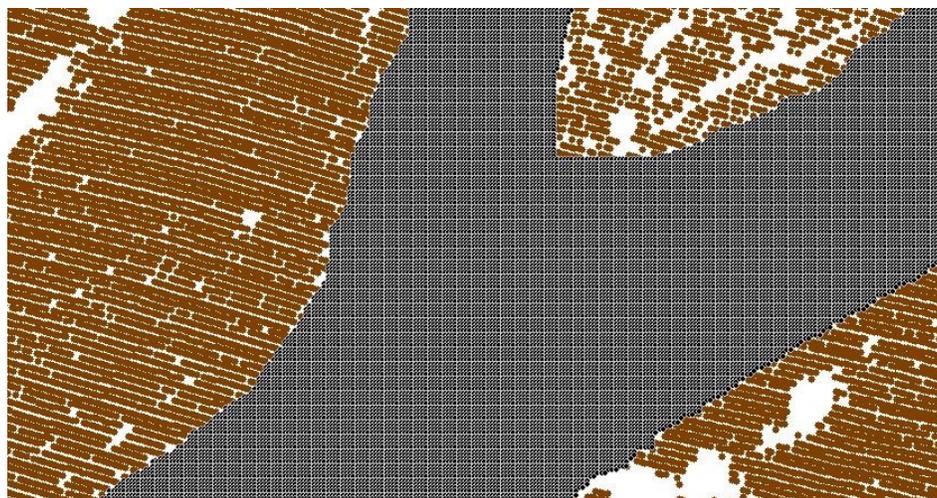


*Ilustración 40. Resultado de Triangulación Batimétrica. Fuente propia*

De la superficie generada se extrae una grilla de puntos tridimensional con el fin de contar con información interpolada entre las zonas que la Ecosonda no capturo información. Este proceso se realiza seleccionando la superficie, posteriormente con la opción Layer/EXPORT, la cual abrirá una nueva ventana, se selecciona el formato de exportación de la superficie; para extraer la grilla se elige la opción XYZ Grid, la cual abrirá otra ventana de configuración de exportación en la cual únicamente se configura la resolución espacial que corresponde al espaciamiento de la grilla de puntos que se desea obtener, para este ejercicio se usó un espaciamiento de 30cm. Este archivo generado se importa nuevamente al software y se observa que la información de batimetría ya tiene una distribución homogénea en sus datos.

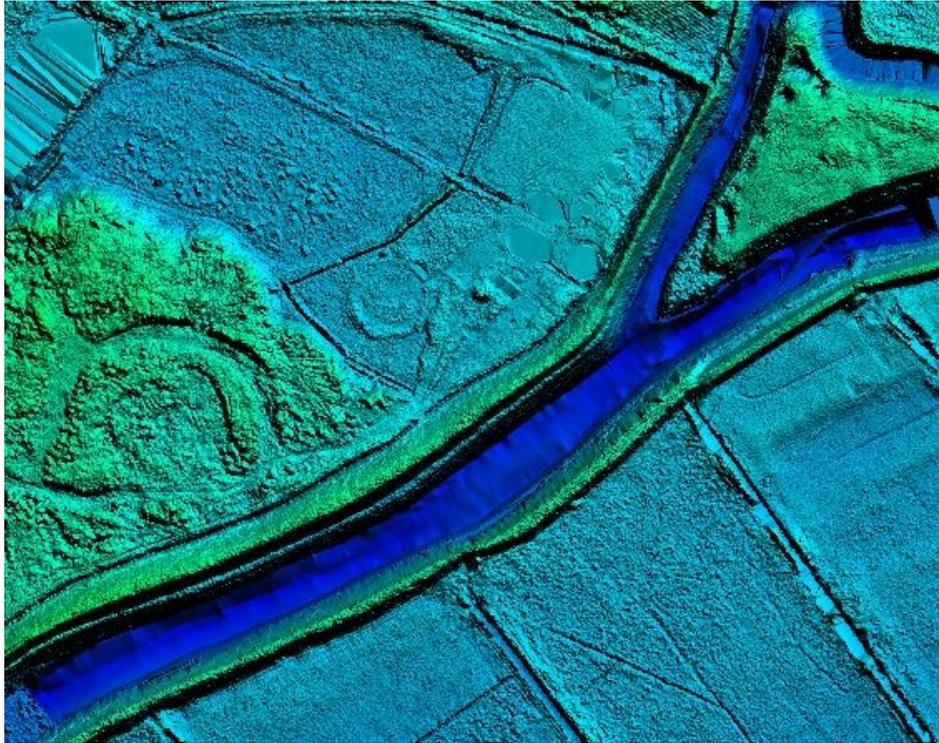


*Ilustración 41. Ventana de exportación y definición de espaciamiento de la grilla. Fuente propia*



*Ilustración 42. LiDAR con malla batimétrica. Fuente propia*

Con la nube de puntos LiDAR y la grilla de puntos batimétrica, se integra la información 67  
generando la superficie de la zona del estudio de la misma manera que se generó la superficie de  
Batimetría.



*Ilustración 43. TIN generado. Fuente propia*

Hasta el momento se obtiene un archivo TIN interpolando la información importada, este archivo se encuentra en la memoria del software por lo que no genera un archivo con una extensión tipo Ráster, es necesario exportar esta superficie con el fin de generar un archivo que permita visualizarse en cualquier software SIG o de análisis de imágenes, el cual será el producto final, es decir el Modelo Digital de Terreno Topobatimétrico.

La generación del archivo Ráster que realiza el software es a partir del método Inverse Distance Weighting IDW (Ponderación de Distancia Inversa). Este método calcula los valores de las celdas en este caso con la elevación ortométrica a partir del promedio de las alturas de cada uno de los puntos pertenecientes a la nube LiDAR y Batimétrica en la vecindad de cada punto; es decir, entre más cerca se encuentre uno de los puntos de la nube a la celda o pixel, más influencia tendrá en el proceso de promediar la información. En este caso, al tener varios valores de elevación en una celda de resolución espacial de un metro, el valor del pixel será el promedio de los puntos que se encuentren dentro de este.

Para la generación del modelo final en formato Ráster se usa la herramienta Export, donde para casos de Modelamientos es factible usar la opción Geotiff, el cual almacena en un mapa de bits la información de georreferenciación del archivo.

Al momento de seleccionar la opción Export Raster/Image Format y el formato del archivo resultante, se despliega una nueva ventana en el cual se configura el tipo de archivo de salida. Esta ventana cuenta con tres pestañas en donde se realiza la configuración del archivo a exportar.

En la pestaña Geotiff Options, se configura las opciones del tipo de archivo que se va a generar, seleccionando las siguientes opciones:

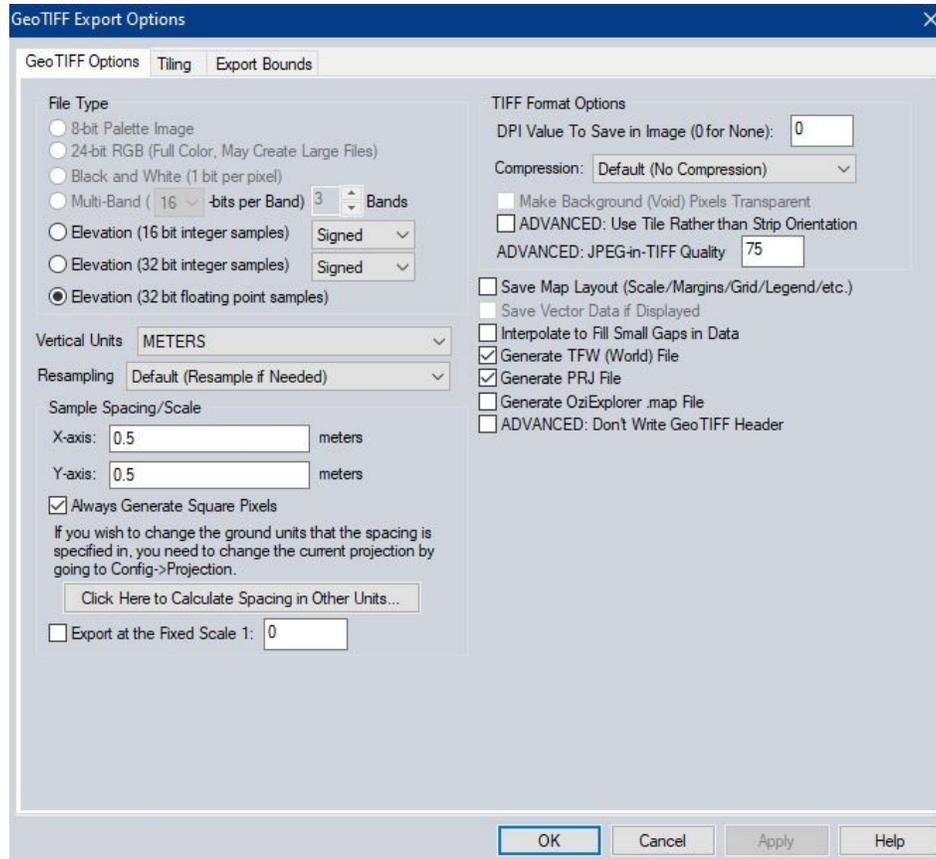
- Configurar el archivo como Ráster de Elevación con muestras de flotantes de 32 bits, el cual genera un Geotiff de elevación el cual utiliza los conjuntos de datos de cada pixel con la elevación cargada de cada punto, esta opción es la ideal cuando se maneja una gran cantidad de datos interpolados como es el caso de las nubes de puntos

procesadas de sensores remotos, ya que está diseñada para trabajar con datos y valores de elevación submétrica de alta resolución.

69

- **Palette:** permite seleccionar la paleta de colores con la cual se desplegará el ráster una vez importado, esta opción no es de mayor importancia, debido a que esta paleta solo podrá ser usada en el software Global Mapper, al momento de importar el archivo en otro software como ArcGIS, QGIS entre otros se visualizará de acuerdo a los parámetros de cada uno de ellos.
- **Resampling:** se deja por defecto con la opción de resamplear de ser necesario, ya que no se desea realizar un cambio de los píxeles que forman el archivo Ráster.
- **Sample Spacing/Scale:** Corresponde a la resolución espacial con la que se desea generar el archivo Ráster. El software por defecto presenta los valores sugeridos de acuerdo a la cantidad de información procesada al momento de hacer la triangulación. Generalmente se generan píxeles cuadrados es decir que su ancho y su largo sea el mismo, y se sugiere ingresar valores de pixel mayores a los sugeridos por el software. En este caso el Modelo Digital de Terreno Topobatimétrico se genera con una resolución espacial de 50 cm, debido al contraste de información entre la alta densidad de puntos capturados por el sensor LiDAR y las zonas sin información que no capturó la ecosonda Monohaz.
- Se deben activar las casillas de generación de archivos TFW y PRJ, el primero con el fin de abrir el archivo Geotiff desde cualquier software y el segundo que contiene la información de los parámetros de proyección del MDT resultante.

Las demás opciones de dejan por defecto ya que estas corresponden a seleccionar una escala<sup>70</sup> particular definida y compresión para el Modelo, lo cual no se desea debido al área del mismo.

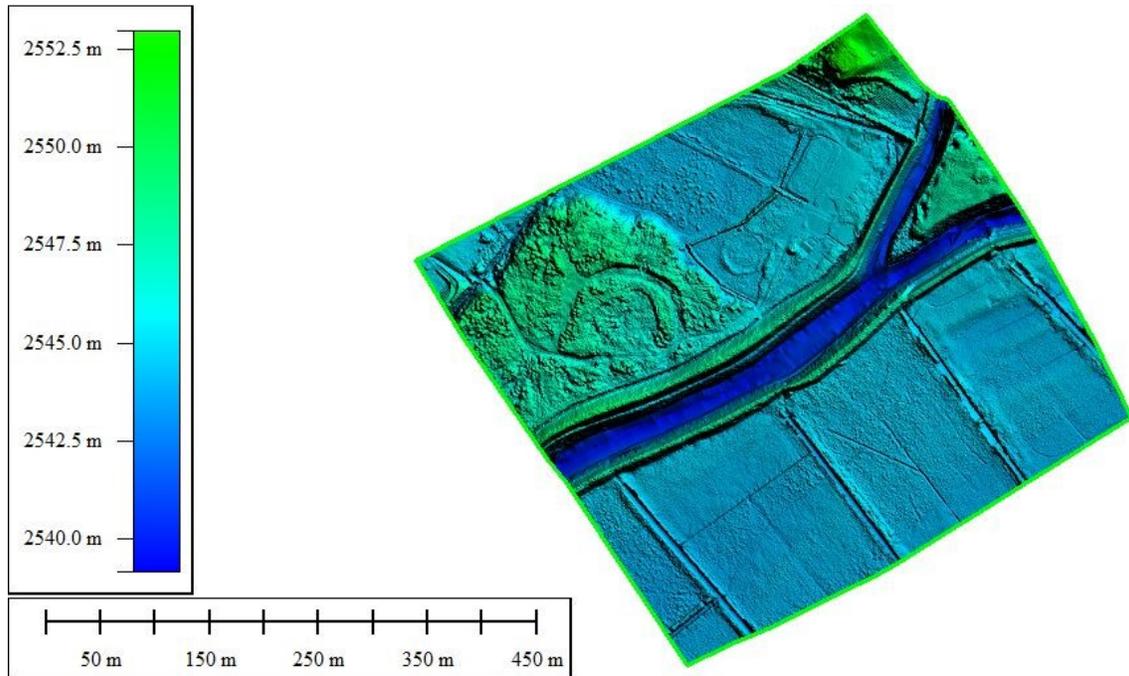


*Ilustración 44. Configuración de exportación del MDT. Fuente propia*

Al igual que en la creación de la superficie TIN, se presentan las pestañas Tiling y Export Bounds, en la primera se selecciona la opción No Tiling de tal manera que no divida el modelo en mosaicos, esta opción se puede activar si se cuenta con una gran cantidad de información y el modelo es de gran extensión. La pestaña Export Bounds, presenta la configuración de los límites de exportación de la información, es posible exportar toda la superficie para obtener un modelo completo o solo una parte de este definida por el usuario en términos de límites de coordenadas, información visible en la pantalla o un área específica en forma de polígono, esta opción permite eliminar las triangulaciones inexistentes por la distancia que puede presentarse entre los datos, en

esta ocasión, se utilizó esta última opción delimitando un área específica dentro de la zona de estudio. 71

Una vez configurados los parámetros de exportación se obtendrá el Modelo Digital de Terreno Topobatimétrico con resolución espacial de 50cm y error medio de elevación de 3cm.



*Ilustración 45. MDT Topobatimétrico Final. Fuente propia*

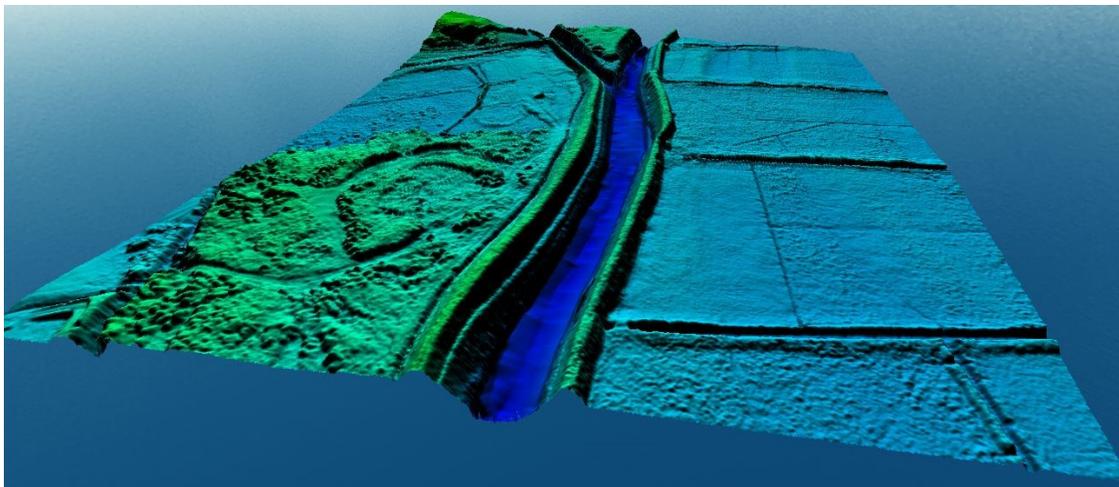


Ilustración 46. Modelo 3D. Fuente propia

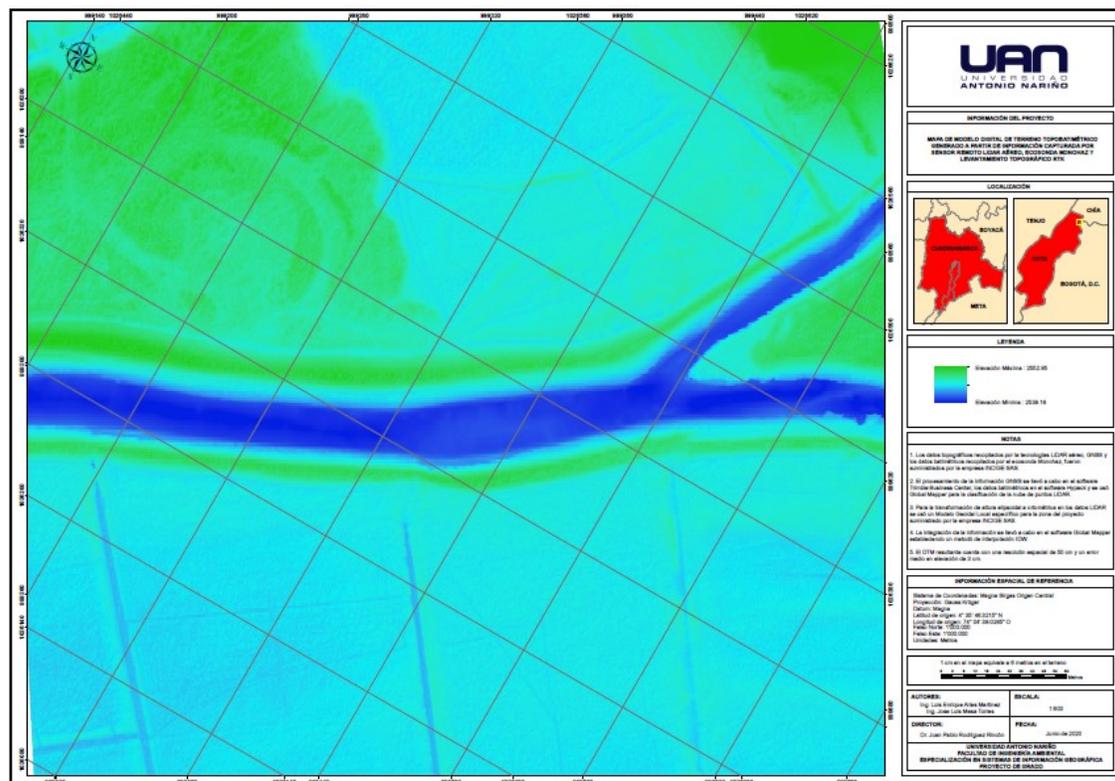


Ilustración 47. Mapa Temático Modelo Digital de Terreno Topobatimétrico. Fuente propia

El objetivo del presente trabajo fue el de proponer una metodología con la cual se pudiera generar un Modelo Digital de Terreno Topobatimétrico combinando datos obtenidos de distintas tecnologías. Los métodos de captura seleccionados fueron el LiDAR, los levantamientos topográficos convencionales (posicionamiento GNSS y levantamiento con RTK), una nivelación geométrica con lo cual se pudieran dar cotas geométricas a nivel del mar y de esta manera ajustar los niveles de fondos captados por la ecosonda en el levantamiento batimétrico. Después del análisis y desarrollo del proyecto se concluye:

Se cumplieron los objetivos propuestos, verificando la posibilidad de trabajar con múltiples tecnologías de capturas de datos produciendo como resultado un Modelo Digital de Terreno topobatimétrico de la zona de interés o estudio seleccionada. En ese sentido, la metodología cumple con ser un instrumento válido para generación Modelos Digitales de Terreno, en el cual la persona interesada pueda guiarse de manera tal que pueda generar un producto deseado.

Para la generación del modelo, una de las etapas claves es el insumo de datos LiDAR. Para poder utilizarlos en la generación del modelo lo más importante es realizar una correcta clasificación de la nube de puntos. El tratamiento de los datos LiDAR deben realizarse de manera tal que se asignen las coberturas correspondientes a los puntos capturados por el sensor. Para llevar a cabo esto se pueden utilizar distintos softwares, sin embargo, la mayoría de ellos son de carácter privado y su valor de uso es bastante elevado; por lo que se convierten en insumos a los cuales son difíciles de acceder, haciendo que la tarea sea algo costosa. Lo recomendable es utilizar software como Global Mapper que permiten trabajar en versiones de pruebas temporales y a su vez no nos restringen los procesos y herramientas necesarias para la clasificación de datos LiDAR.

La resolución global del Modelo Digital de Terreno generado, está asociado a la información capturada en campo. La alta densidad de la nube de puntos capturada por el sensor LiDAR y los datos batimétricos arrojados por la ecosonda, permite tener un nivel de detalle excelente en los planos horizontal y vertical, tanto de la superficie del terreno como de las profundidades de los cuerpos de agua, lo que permite obtener además de un MDT un MDS que discrimine las coberturas existentes en la zona del proyecto.

En este ejercicio se utilizó una ecosonda Monohaz para el levantamiento de información batimétrica. A diferencia de las ecosondas Multihaz que son más recientes en el mercado, la cantidad de información que captura es limitada por lo que es necesario realizar la mayor cantidad de mediciones en los cuerpos de agua para obtener resultados más precisos en cuanto a las profundidades. En este caso, al contar con una gran cantidad de transeptos de medición y al ajustarlos a partir de tecnologías GNSS y Nivelación geométrica, la información de batimetría cuenta con un grado de confiabilidad bastante alto para ser usada en posteriores estudios.

Las nivelaciones geométricas permiten obtener un excelente nivel de calidad de los datos de elevación, este proceso hace posible un ajuste vertical de la información levantada en campo por las diversas metodologías, adicional a esto, a partir de puntos de nivelación ajustados, se facilita la realización de Modelos Geoidales Locales, los cuales minimizan los errores generados por el modelo nacional Geocol 2004 garantizando alturas precisas para el desarrollo de un modelo confiable que pueda ser utilizado en diversos proyectos de ingeniería.

Esta metodología permite generar Modelos Digitales de Terreno Topobatimétricos de excelente calidad a través del software Global Mapper, sin embargo, el tratamiento de la información en software LiDAR especializado o herramientas complementarias a otras

aplicaciones SIG como ArcGis, la calidad y resolución espacial de los productos pueden

75

aumentar debido a diversos parámetros que se pueden introducir al momento del procesamiento de la información.

Como una recomendación a la Universidad, sugerimos la continuación con el programa de licencias educativas de ESRI, lo cual permite no solo acceder al software licenciado, sino la realización de cursos web y capacitaciones asociadas a los Sistemas de Información Geográfica, esto permite generar conocimiento a partir de nuevas herramientas que permitan el tratamiento de información espacial y de diversas fuentes de en línea, así como los capturados por tecnologías GNSS y sensores remotos como el caso de la tecnología LiDAR.

- Bonilla, J. (2016). *MÉTODO PARA GENERAR MODELOS DIGITALES DE TERRENO CON BASE EN DATOS DE ESCÁNER LÁSER TERRESTRE*. Bogotá: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA .
- Abdullah S, A. (1998). *Modeling GPS-Derived Orthometric Heights for a Small and Dense Network*. Saudi Arabia: Civil Engineering Department, College of Engineering King Saud University.
- Albacete, A., & Gutiérrez, F. (2013). *Metodología para procesar datos LÍDAR con ArcGis Desktop 10*. Obtenido de <http://www.ign.es/resources/jiide2012/poster/1.Metodolog%C3%ADa%20para%20procesar%20datos%20LÍDAR%20con%20ArcGIS%2010.pdf>
- Baquero, I. (2016). *ESTUDIO DE LA VARIABLE ALTIMETRICA (Z) SOBRE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACION POR MEDIO DE TECNOLOGIA LIDAR TERRESTRE*. Bogotá: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Colina, J., & L. Potter, M. (2000). <http://www.asprs.org>. Obtenido de <http://www.asprs.org/a/publications/pers/2000journal/august/highlight.html>
- Fernández de Sevilla, T. A. (2009). *Efficient interpolation of LÍDAR altimeter dataset in the obtention of Digital Surface Models*. Madrid: Stereocarto.
- Gil, J., & Fernandez, A. (2013). *PROCESADO SIG DE DATOS LÍDAR PARA LA CREACIÓN Y EVALUACIÓN DE MDTs Y FILTRADO DE PUNTOS OUTLIERS*. Obtenido de <http://www.aet.org.es/congresos/xiii/call17.pdf>
- Hui, Z., Li, D., & Jin, S. (2019). Automatic DTM extraction from airborne LiDAR based on expectation maximization. *Optics and Laser Technology*, 43-55.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. (1997). Obtenido de <https://igac.gov.co>: [https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/obtencion\\_de\\_alturas.pdf](https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/obtencion_de_alturas.pdf)
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. (2018). Obtenido de <https://igac.gov.co>: [https://igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/resolucion\\_igac\\_643-18\\_adopta\\_especificaciones\\_tecnicas\\_levantamientos\\_planimetricos\\_y\\_topograficos.pdf](https://igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/resolucion_igac_643-18_adopta_especificaciones_tecnicas_levantamientos_planimetricos_y_topograficos.pdf)
- Martínez, J. (2010). <http://www.ign.es>. Obtenido de [http://www.ign.es/PNOA/docum/Presentacionvuelos\\_ASAMBLEAPNOA.pdf](http://www.ign.es/PNOA/docum/Presentacionvuelos_ASAMBLEAPNOA.pdf)
- Núñez, M., & N. Ojeda, J. (s.f.). *Aplicación de sensores aerotransportados (LÍDAR/cámara fotogramétrica digital) en la cuestión de espacios protegidos: el parque natural de dunas de corrubedo y lagos de carregal y Vixan*. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Parrot, J.-F., & Núñez, C. (2015). *LiDAR DTM: artifacts, and correction for river altitudes*. Mexico D.F.: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.
- Quiles, I. M. (2013). *CONTROL DE CALIDAD PLANIMÉTRICO DE UNA NUBE DE PUNTOS LÍDAR*. Tecnología y servicios agrarios S.A. Obtenido de [http://www.ideg.es/wsc\\_content/pics/user\\_upload/Control%20de%20calidad%20planimetrico%20de%20una%20nube%20de%20puntos%20LÍDAR.pdf](http://www.ideg.es/wsc_content/pics/user_upload/Control%20de%20calidad%20planimetrico%20de%20una%20nube%20de%20puntos%20LÍDAR.pdf)