

**Metodología de identificación y análisis de
sitios arqueológicos en la universidad del
Magdalena, municipio Santa Marta,
departamento del Magdalena a partir de la
captura y análisis de datos LiDAR**

Nidia Isabel Romero Patiño

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Línea de Investigación

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2021

Resumen

El ejercicio de investigación arqueológica plantea el registro en el espacio de los vestigios materiales producidos por los seres humanos en el pasado, para ello cuenta con una serie de metodologías, las cuales son normalmente costosas y extensas por lo que es necesario buscar herramientas metodológicas que permitan facilitar el proceso de identificación de sitios arqueológicos, reduciendo costos, tiempo de ejecución y permitiendo el trabajo a diferentes escalas de análisis, en la actualidad es más frecuente la posibilidad de recurrir a diferentes tecnologías geoespaciales, tal como el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) y técnicas precisas como los datos LiDAR (Light Detection and Ranging) o Imágenes satelitales. La presente investigación desarrollada en la granja de la Universidad del Magdalena se centró en el desarrollo de un sistema LiDAR de bajo costo, montado en una plataforma VANT, para implementarse en la detección de sitios y paisajes arqueológicos. Como resultado se obtuvo la integración de múltiples tecnologías para obtener un sistema robusto de detección LiDAR de bajo costo, que, aunque todavía se encuentra en fase de desarrollo expuso resultados altamente positivos en la demostración de las características del paisaje asociadas a hallazgos arqueológicos.

Palabras clave: LiDAR, VANT, Arqueología, Teledetección.

Abstract

The archaeological research exercise proposes the registration in space of the material remains produced by human beings in the past, for this it has a series of methodologies, which are normally expensive and extensive, so it is necessary to look for methodological tools that facilitate the process of identifying archaeological sites, reducing costs, execution time and allowing work at different scales of analysis, at present the possibility of resorting to different geospatial technologies is more frequent, such as the use of unmanned aerial vehicles (UAVs).) and precise techniques such as LiDAR data (Light Detection and Ranging) or satellite images. The present investigation developed in the farm of the University of Magdalena focused on the development of a low-cost LiDAR system, mounted on a UAV platform, to be implemented in the detection of archaeological sites and landscapes. As a result, the integration of multiple technologies was obtained to obtain a robust low-cost LiDAR detection system, which, although it is still in the development phase, exhibited highly positive results in the demonstration of the characteristics of the landscape associated with archaeological finds.

Keywords: LiDAR, UAV, Archeology, Remote Sensing.

Contenido

Pág.

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN	9
1.1	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	9
1.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3	JUSTIFICACIÓN	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GENERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	ANTECEDENTES	15
3.1	TELEDETECCIÓN EN ARQUEOLOGÍA	15
3.1.1	<i>Limitantes del uso de teledetección en arqueología</i>	17
3.2	HISTORIA GENERAL DE LIGHT AND DETECTION RANGING LIDAR	18
3.3	APLICACIONES DE LIDAR	20
3.3.1	<i>Aplicación de LiDAR en arqueología</i>	20
3.3.2	<i>Pasos futuros del LiDAR en arqueología</i>	23
4	REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	26
4.1	REGLAMENTACIÓN PARA LA OPERACIÓN DE UAV EN COLOMBIA	26
4.1.1	<i>Condiciones de aeronavegabilidad para RPAS descritas en la Circular Reglamentaria No. 002</i>	27
4.1.2	<i>Limitaciones de la Operación de RPAS de acuerdo con lo descrito en la Circular Reglamentaria No. 002</i>	28
4.1.3	<i>Requisitos exigidos por la Circular Reglamentaria No. 002, para certificarse como Piloto/Observador RPAS</i>	29
5	REFERENTE TEÓRICO	33
5.1	ELEMENTOS ARQUEOLÓGICOS FUNDAMENTALES	33
5.2	NOCIÓN DEL PAISAJE EN ARQUEOLOGÍA	35
5.3	TÉCNICAS DE ANÁLISIS EN ARQUEOLOGÍA	37
5.3.1	<i>Reconocimiento terrestre</i>	37
5.3.2	<i>Reconocimiento aéreo</i>	38
5.4	FUENTES DE INFORMACIÓN RECONOCIMIENTO AÉREO	39
5.4.1	<i>Teledetección</i>	39
5.4.2	<i>Sensores</i>	41
5.5	METODOLOGÍA DE RECONOCIMIENTO	47
6	METODOLOGÍA	49
6.1	DESARROLLO DE LA PLATAFORMA LIDAR	50
6.2	CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS EN CAMPO	53
6.2.1	<i>Plan de vuelo</i>	57
6.2.2	<i>Post-procesamiento y generación de insumos</i>	59

V Metodología de identificación y análisis de sitios arqueológicos en la universidad del Magdalena, municipio Santa Marta, departamento del Magdalena a partir de la captura y análisis de datos LiDAR

6.3	ANÁLISIS DE DATOS Y COMPROBACIÓN EN CAMPO	61
6.3.1	<i>Datos LiDAR</i>	61
6.3.2	<i>Comprobación en Campo</i>	63
7	RESULTADOS	65
7.1	PLATAFORMA LiDAR V1.0.....	65
7.1.1	<i>VANT</i>	70
7.2	CAPTURA DE DATOS	73
7.3	POST-PROCESAMIENTO / ANÁLISIS DE DATOS	77
7.4	RECONOCIMIENTO ARQUEOLÓGICO.....	93
8	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
9	CONCLUSIONES	98
10	RECOMENDACIONES	100
11	REFERENCIAS	101

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1	40
Figura 3	50
Figura 4	52
Figura 5	54
Figura 6	55
Figura 7	58
Figura 8	67
Figura 9	75
Figura 10	77
Figura 11	80
Figura 12	82
Figura 13	83
Figura 14	84
Figura 15	86
Figura 16	87
Figura 17	88
Figura 18	89
Figura 19	90
Figura 20	91
Figura 21	92
Figura 22	93
Figura 23	94
Figura 24	96

Lista de fotografías

Fotografía 1	64
Fotografía 2	66
Fotografía 3	69
Fotografía 4	70
Fotografía 5	72
Fotografía 6	73
Fotografía 7	76
Fotografía 8	95

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1	42
Tabla 2	60
Tabla 3	65
Tabla 4	68
Tabla 5	71
Tabla 6	78
Tabla 7	78
Tabla 8	95

Lista de símbolos y abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>DSNA</i>	Dirección de Servicios a la Navegación Aérea
<i>GIS</i>	Geographic information systems
<i>GPS</i>	Global Position System
<i>ICANH</i>	Instituto Colombiano de Antropología e Historia
<i>INS</i>	Sistema de navegación inercial
<i>LiDAR</i>	Ligth Detection And Ranging
<i>RADAR</i>	Radio and Detection and Ranging
<i>RPAS</i>	Remotely Piloted Aircraft System
<i>SIG</i>	Sistemas de información geográfica
<i>SMS</i>	Sistema de gestión de seguridad operacional
<i>SNSM</i>	Sierra Nevada de Santa Marta
<i>UAEAC</i>	Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil
<i>VANT</i>	Vehículo aéreo no tripulado

1 Planteamiento del problema de investigación y su justificación

1.1 Descripción del área problemática

En la región Caribe Colombiana, se han encontrado múltiples vestigios arqueológicos que indican la presencia de poblaciones indígenas prehispánicas con diversos procesos sociales a lo largo del tiempo, esto principalmente en la zona que enmarca la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) y sus estribaciones. La presencia de arquitectura lítica y procesos de modificación de la topografía son algunos de los elementos que pueden ser asociados a las comunidades indígenas prehispánicas que vivieron en dicho lugar. En el municipio de Santa Marta, departamento del Magdalena, se han localizado una gran variedad de sitios arqueológicos presentando así una amplia cultura material, entre lo más destacado se encuentran diferentes asentamientos con arquitectura lítica asociados a la fase Nahuange (200- 1200 d.C) y la fase Tairona (900 d.C. - 1.600 d.C.), estructuras coincidentes con viviendas o lugares destinados a la agricultura. Sin embargo, a fecha de octubre de 2021 sólo veintitrés de estos sitios se encontraban registrados en el geoportal del Instituto Colombiano de Antropología e Historia, ICANH, adicionalmente ninguno de estos sitios referenciados se ubica cerca de la zona de estudio la universidad del Magdalena, la cual si bien no se localiza en la Sierra Nevada de Santa Marta, si es una zona que ha presentado múltiples vestigios arqueológicos, actualmente se adelanta el proceso de diagnóstico y prospección de acuerdo al ICANH para identificar y caracterizar este sitio como un contexto arqueológico (Resolución de intervención arqueológica 441 del 23 de junio de 2020). Uno de los motivos de esta escasa documentación se debe a que la región presenta áreas con vegetación bastante densa, dificultando

la exploración arqueológica por parte de los investigadores, por otro lado, gran parte del área de la universidad ha sido previamente intervenida por diferentes construcciones lo cual ha impactado fuertemente en la localización de material asociado a poblaciones indígenas.

La actividad humana tanto actual, como en el pasado, tiene una serie de impactos en términos del contexto ambiental, los procesos de formación de sitios arqueológicos generan cambios en términos de los ambientes postdeposicionales (entiéndase postdeposicional como el momento después del enterramiento de los vestigios arqueológicos) (Renfrew & Bahn, 2008), sin embargo a simple vista la identificación de dicho cambio no es posible, para ello es necesario la implementación de diversos análisis, desde muestreos en campo hasta su identificación en laboratorio, proceso que resulta en un gasto considerable de tiempo.

En ese sentido el ejercicio de investigación arqueológica es costoso y extenso por lo que es necesario buscar herramientas metodológicas que permitan identificar los sitios arqueológicos de forma puntual, para su posterior análisis, particularmente las herramientas geoespaciales. El uso de estos instrumentos en la arqueología colombiana es poco común y son casi nulos los antecedentes, es por este motivo que esta investigación pretende formular los primeros elementos metodológicos que permitan incluir este tipo de tecnologías en la investigación arqueológica para Colombia.

1.2 Formulación del problema

Como se mencionó anteriormente, el principal problema son las limitantes en términos de la inversión de recursos en tiempo y el costo de las técnicas tradicionales de la arqueología, por ello el uso de herramientas geoinformáticas podría ser una respuesta a dichos problemas, no obstante, tecnológicas como el LiDAR son significativamente costosas, por lo que el desarrollo de

sistemas de bajo costo sería una posible respuesta tanto para el ejercicio en la arqueología, como para otras áreas. A partir de lo previamente descrito, surgen varios interrogantes, ¿Cómo identificar los sitios arqueológicos a través de herramientas geoinformáticas, específicamente con datos LiDAR? ¿Cómo a partir de la Tecnología LiDAR aportar a la documentación detallada de los contextos arqueológicos ya localizados? Y ¿Cómo desarrollar un sistema LiDAR más económico que permita su fácil adquisición, para el uso en la arqueología?

1.3 Justificación

La arqueología es un área del conocimiento que busca comprender los procesos de organización social en épocas donde el registro escrito o la tradición oral no son suficientes, para lograr comprender dichas dinámicas la arqueología plantea el registro en el espacio de los vestigios materiales producidos por los seres humanos en el pasado, para ello cuenta con una serie de metodologías que son aplicadas a diferentes escalas (regionales, locales e individuales) (Colin Renfrew, 2015). La principal limitante de estas metodologías es su alto costo en términos del tiempo de ejecución y dinero, el primer paso dentro del desarrollo investigativo en la arqueología es la identificación preliminar de los sitios arqueológicos, pero a su vez es también una de las actividades que consume más recursos (Greene & Moore, 2010).

Ante la situación planteada el propósito de esta investigación es establecer una metodología que permita facilitar el proceso de identificación de sitios arqueológicos, reduciendo costos, tiempo de ejecución y permitiendo el trabajo a diferentes escalas de análisis, recurriendo a tecnologías geoespaciales como lo son el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) y técnicas precisas como los datos LiDAR (Light Detection and Ranging), la implementación de estos elementos daría paso a la apertura del uso de este tipo de tecnologías en este campo de estudio, pues actualmente son escasas las investigaciones que en su proceso integran estas técnicas a nivel

nacional, por otro lado esta metodología está basada en el desarrollo de tecnología de bajo costo pues como se mencionó uno de los elementos que dificultan la investigación arqueológica son el gasto en dinero y tiempo, la tecnología implementada es resultado de la colaboración con la Fundación Patrimonio Mixto y la Universidad del Magdalena, por lo que en la presente investigación se muestran los diferentes procedimientos de desarrollo de esta tecnología que aún está en fase de pruebas, pues integra distintos elementos que en conjunto arrojan múltiples resultados.

Es importante destacar que para el caso de los VANT, estos presentan múltiples ventajas en su uso, en comparación con otros sistemas de percepción remota usados con el mismo fin, entre los beneficios está la obtención de datos espaciales, la visibilidad de los objetos pues la cercanía a estos facilita su identificación, alta calidad en las imágenes debido a que no está limitado por la nubosidad, y su almacenamiento digital permite su manipulación y procesado, adicional está la disponibilidad de imágenes según se requiera y registro de zonas con difícil acceso. Por otra parte tecnologías como LiDAR ofrecen una alta precisión en los datos de caracterización del terreno, alturas y vegetación, permitiendo la obtención de elementos en alta resolución espacial sin obstrucciones de vegetación (Olaya, 2014), elemento positivo en la zona de estudio pues la universidad del Magdalena posee una vegetación densa que no facilita el uso de otro tipo de tecnologías de detección espacial, en consecuencia el uso de estas herramientas de adquisición, medición y procesamiento de datos espaciales integrado al ejercicio de investigación arqueológica permiten realizar una adecuada interpretación y análisis que sirven como soporte o insumo en la identificación de sitios arqueológicos.

En síntesis, el uso de estas herramientas tecnológicas permitirá consolidar nuevos elementos metodológicos en las actividades arqueológicas teniendo en cuenta la disminución de tiempo, costos y la manipulación de datos a diferentes escalas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Crear una metodología de identificación y análisis de sitios arqueológicos en la universidad del Magdalena, municipio de Santa Marta, departamento del Magdalena, a partir de la captura y análisis de datos LiDAR.

2.2 Objetivos específicos

- Integrar un sistema LiDAR de bajo costo para su implementación en contextos arqueológicos, para una plataforma VANT.
- Capturar y procesar los datos LiDAR recopilados con el sistema para su evaluación inicial
- Mediante el uso de técnicas básicas arqueológicas corroborar en campo las zonas con potencial arqueológico según lo identificado con los datos del sensor LiDAR.

3 Antecedentes

A continuación, se presentan una serie de referentes investigativos, cuya finalidad es exponer lo que se ha hecho en materia durante los últimos años, en ese sentido se introduce el uso de teledetección en arqueología, así como algunas investigaciones al respecto y limitantes. Posteriormente se hace una revisión de la historia del LiDAR y sus aplicaciones, finalmente se presenta el uso de LiDAR en arqueología, sus limitantes y pasos futuros.

3.1 Teledetección en Arqueología

El uso de tecnologías geoespaciales en arqueología ha venido en aumento desde la década del 2000, es frecuente encontrar en múltiples investigaciones la adopción de herramientas como sistemas de información geográfica, mapeo en línea, imágenes satelitales, imágenes de vehículos aéreos no tripulados, fotogrametría y LiDAR aerotransportado entre otros (McCoy, 2021), esta práctica es debido a las múltiples ventajas que trae consigo el uso de estas tecnologías en comparación con otro tipo de métodos. Uno de las primeras investigaciones de procesamiento de imágenes y SIG en arqueología de Matteucci & Scheisohn (2004) mencionan que la documentación de materiales arqueológicos a través de prácticas tradicionales es un proceso costoso, en términos de dinero y tiempo, por lo que en general no se abordan sitios puntualmente. No obstante, mediante el uso de SIG y teledetección es posible optimizar el proceso de documentación de materiales arqueológicos a través de la excavación de sitios puntuales con alto potencial. El uso de información espacial en métodos predictivos de sitios arqueológicos puede facilitar el abordaje de estudios arqueológicos en zonas de baja visibilidad sin embargo se

presentan aún numerosas limitaciones, con respecto a la escala, al volumen de información y variación en los ambientes entre otros (Kokalj & Mast, 2021; Quintus et al., 2015).

La investigación realizada por Lasaponara et al. (2014) donde el objetivo fue cuantificar y analizar las excavaciones ilegales en Lambayeque, Norte de Perú, mediante el uso de teledetección, se llevó a cabo un análisis que consistió en el uso de imágenes de GeoEye y Google Earth para evaluar cuantitativamente el saqueo en Ventarron (Lambayeque, Perú), uno de los sitios arqueológicos más importantes de América del Sur. El procesamiento de imágenes mediante estadísticas de autocorrelación y clasificación no supervisada para resaltar y extraer patrones de saqueo, demostraron que el uso de imágenes satelitales es muy útil no solo para cuantificar, sino también para monitorear las áreas arqueológicas, especialmente para aquellas ubicadas en regiones desérticas y áridas. Además, el uso integrado de diversas fuentes de datos de teledetección de sensores activos y pasivos puede proporcionar un rico conjunto de datos para apoyar a las autoridades institucionales en la organización de estrategias de mitigación y conservación. Este tipo de estudios no solo demuestran la efectividad del uso de tecnologías geoespaciales en la investigación arqueológica, sino que resaltan las múltiples aplicaciones que se le pueden dar a estos instrumentos.

Si bien herramientas como fotogrametría, SIG y teledetección se han discutido individualmente aún es desconocido el alcance de estas tecnologías en la arqueología. La revolución geoespacial ha impactado fuertemente en diferentes campos, especialmente en la arqueología, por lo tanto es necesario conocer los alcances y la trayectoria de estas herramientas (Westley, 2021), las cuales aún varían dependiendo factores como los mencionados previamente, los cuales son claves al momento del planteamiento de soluciones optimas en la investigación

arqueológica. Es necesario evaluar la viabilidad y capacidad de estas técnicas en función del sitio arqueológico, la escala, el costo y las características paisajistas. La adecuada aplicación de teledetección en arqueología tiene una alta implicación en la asignación de recursos durante las diferentes fases de arqueología, además de proporcionar información para el monitoreo continuo de los sitios en pro de su protección (Vilbig et al., 2020).

Uno de los principales beneficios en el uso de la teledetección en la arqueología es que estas herramientas no son invasivas, ni destructivas, ayudando de esta manera a preservar, monitorear y documentar los sitios arqueológicos (Vilbig et al., 2020). No obstante presentan una serie de limitantes relacionadas a las características arqueológicas que no son visibles mediante el procesamiento de imágenes ópticas, tales características son principalmente restos arqueológicos ubicados bajo una densa vegetación y microrelieves asociados a estructuras arqueológicas superficiales, entonces la identificación dependerá de factores como el ángulo de la imagen, tiempo de adquisición y características de la superficie entre otras (Lasaponara & Masini, 2011).

3.1.1 Limitantes del uso de teledetección en arqueología

Chase et al. (2011) señalan en su trabajo de arqueología, realizado en Belice, que las imágenes satelitales disponibles en la región no tienen el suficiente detalle para proporcionar un buen conjunto de datos de elevación de terreno, dificultando la inclusión de este insumo en las diferentes investigaciones, adicionalmente la vegetación densa de la zona obstaculiza el mapeo de asentamientos, no solo por la cobertura vegetal sino por los costos y el tiempo que lleva realizar este tipo de investigaciones, lo cual conduce a tener datos incompletos derivando en interpretaciones limitadas del paisaje. Este problema se evidencia en muchas zonas de estudio donde las características del paisaje son similares y las herramientas empleadas no son las más idóneas.

Con el fin de tratar de contrarrestar la mayor cantidad de dificultades en el uso de teledetección en arqueología se ha venido implementando con mayor periodicidad el LiDAR aerotransportado. Por una parte los datos LiDAR pueden proporcionar nuevas metodologías al reconocimiento de características arqueológicas, debido a la escala de análisis, por lo que es útil al momento de evaluar grandes áreas de terreno, facilitando una alta capacidad de observación al investigador (Kokalj & Mast, 2021). Por otro lado usar este tipo de datos ofrecen la posibilidad de ampliar la cobertura de la investigación arqueológica con metodologías de prospección remota a un menor costo (Golden et al., 2016). Permitiendo la integración de la investigación antropológica y arqueológica con otras ciencias, debido a que el conjunto de datos derivado de LiDAR revela la totalidad del paisaje, incluyendo arquitectura, ingeniería, canales, terrazas, carreteras y demás huellas generadas por el paso del hombre (Fisher et al., 2016).

3.2 Historia general de Light and Detection Ranging LiDAR

La creación de LiDAR se remonta a 1960 con la experimentación del láser, dada sus características de brillo y dirección, el instrumento ofrecía la oportunidad de medir un rango entre un objetivo y la misma herramienta, posteriormente se amplió su uso en ámbitos militares, sin embargo para la década de 1970 fue reemplazado por una segunda generación de láseres cuyo volumen era inferior y tenía un menor consumo de energía, a su vez este nuevo láser era de neodimio de infrarrojo cercano, lo cual lo hacía más eficiente (Agnesi & Pirzio, 2013). Para finales de la misma década se dieron los primeros pasos para el uso portátil del instrumento donde la principal característica era su peso de solo 2kg (Wang et al., 2020). Sin embargo, los precios de

este instrumento eran aún muy altos haciendo de esta tecnología algo inasequible para otro tipo de uso que no fuera el desarrollo científico o la investigación militar.

Entre la década de 1980 y 1990 con el frecuente uso de esta tecnología también surgieron las dificultades, entre las que se encontraba el cambio de precisión dependiendo el ambiente, así como el daño a los ojos de quien lo usaba, por lo que se desarrolló la tercera generación de laser, donde su principal característica era su tecnología electrónica, la cual no tenía ningún perjuicio en los ojos como la anterior generación, adicionalmente se hizo más pequeña, con menor consumo de energía y mayor precisión (Wang et al., 2020). Para 1990 se desarrolló el primer laser con la posibilidad de ampliar su rango de búsqueda a 400 metros, posteriormente para finales de los años 90 se desarrolló un telemetro laser con alcance de rango de 800 metros, eso implicó un fuerte desarrollo de la tecnología en un plazo de tiempo corto, logrando instrumentos con precisiones submétricas y con la posibilidad de medir áreas, volúmenes, distancias y ángulos. Consecuentemente el desarrollo de esta tecnología resultó en mediciones del orden de los metros y tiempos de medición de segundos, aumentando la capacidad de medición y trascendiendo a lo que hoy en día conocemos como las características técnicas de LiDAR.

A su vez con el vertiginoso progreso de esta tecnología también se ha dado un rápido desarrollo de la industria LiDAR en términos de hardware y software, lo que permitió que esta tecnología fuera usada por mayor cantidad de personas que se interesaron en la alta precisión, velocidad, rendimiento, volumen y calidad de los datos resultado del avance tecnológico, involucrando de esta forma múltiples campos de investigación.

3.3 Aplicaciones de LiDAR

Entre las principales aplicaciones de LiDAR se encuentra el mapeo básico de terreno a gran escala, debido a su eficiencia en la captura de información, la obtención de datos precisos de elevación, así como cambios de pendiente y patrones espaciales, facilitando de esta forma la planificación de diferentes infraestructuras (Doneus, 2013). Otra aplicación del LiDAR es la navegación autónoma, tecnología relativamente reciente que permite la creación de mapas digitales para la conducción de vehículos de manera autónoma (Ilci & Toth, 2020). También es frecuente ver el uso de LiDAR en levantamientos topográficos en zonas con alta cobertura vegetal, dada la capacidad que tiene el LiDAR de penetrar en áreas con vegetación y medir alturas, lo hace ideal para este campo de aplicación (Jozkow et al., 2016), por otra parte la identificación que logra de la vegetación hace que se amplíen los campos de aplicabilidad a investigaciones de tipo forestal, ambiental, ecológico e incluso de gestión del riesgo en incendios y remoción en masa (Jozkow et al., 2016; Wang et al., 2020). En ese sentido otra disciplina que ha incorporado a sus investigaciones el uso de LiDAR principalmente por el impacto que tiene en los datos obtenidos en zonas de vegetación espesa es precisamente en la arqueología, pues permite localizar estructuras arqueológicas en áreas densamente boscosas (Horn & Ford, 2019).

3.3.1 Aplicación de LiDAR en arqueología

Los arqueólogos de todo el mundo han empezado a usar datos LiDAR en la prospección de sitios donde la vegetación densa reduce la visibilidad y dificulta el análisis de los asentamientos, en ese sentido la descripción de los contextos arqueológicos a escala de sitio y regional es fundamental (Horn & Ford, 2019). Adicionalmente existen a la fecha gran cantidad de estudios de

la aplicación de LiDAR en arqueología, sin embargo, muchos de ellos están desactualizados y los más recientes se centran en aspectos netamente del flujo de trabajo sin dejar mayor documentación al respecto, en ese sentido es difícil encontrar un acuerdo entre los pasos a tener en cuenta en el uso de estas herramientas, incluso en la terminología que se maneja en diferentes ámbitos (Lozić & Štular, 2021). No obstante, en la mayoría de los estudios es claro el objetivo, los beneficios y las limitantes que tiene el LiDAR aerotransportado.

Entre los principales consensos es claro que el uso de LiDAR presenta múltiples ventajas con respecto a otros métodos de verificación en terreno como las limitaciones por el acceso, tiempo y financiación, sin embargo, el análisis y comprobación en campo son fundamentales para entender el entorno de los hallazgos, así como para evaluar la precisión de los datos y su interpretación. Con la validación en campo y el análisis de nuevos datos es posible refinar la capacidad de reconocer nuevos asentamientos y aumentar la capacidad de registros efectivos (Horn & Ford, 2019; Quintus et al., 2015; Thompson, 2020). Por otra parte, es necesario mencionar que las diferentes técnicas de visualización del terreno funcionan dependiendo el contexto, basados en la topografía, la vegetación y las estructuras arqueológicas, las cuales afectan los datos LiDAR y los archivos resultantes. Según Thompson (2020) es de gran importancia aplicar y evaluar distintas técnicas en la distinción de sitios arqueológicos teniendo siempre en cuenta estudios previos, geografía, topografía, uso actual de la tierra, características arqueológicas como elevación, profundidad, tamaño y forma.

A pesar de que ahora es más frecuente el uso de datos LiDAR en arqueología y que estos implican un costo menos alto que la investigación arqueológica tradicional, sigue siendo un recurso de difícil acceso, en particular en países donde la información es restringida o inexistente, y la financiación a la investigación es limitada. Por otra parte cuando en la investigación se

recopilan datos LiDAR únicamente con fines arqueológicos, la zona de estudio se ve limitada de acuerdo a la elección del investigador, por lo que empieza a existir un sesgo geográfico, limitando los datos a solo una porción del paisaje, por el contrario datos LiDAR que se capturan con otros propósitos enmarcan regiones más amplias permitiendo no solo investigar zonas conocidas sino áreas de paisaje a diferentes escalas (Golden et al., 2016). Ejemplo de ello es la investigación realizada por Bernardini et al (2013) donde tomo datos LiDAR que originalmente tenía el propósito de vigilancia ambiental en el noreste de Italia y los aplico en análisis arqueológicos mediante el uso de software GIS de código abierto, encontrando que no solo fue posible el uso de esta tecnología en el campo de la arqueología sino que mostro grandes resultados en comparación con muchos años de prospecciones arqueológicas llevadas a cabo en la región, pues evidenció múltiples estructuras ya conocidas y nuevas, debido a que exploro zonas que no estaban pensadas como contexto arqueológico. En contraste Štular et al (2021) mencionan que debido a que la mayoría de datos que usan los investigadores en arqueología son datos que fueron adquiridos con fines no arqueológicos, se limita la estimación de la mejor resolución para el análisis de hallazgos arqueológicos, por lo que es difícil encontrar estudios que aborden la resolución óptima para representar las características arqueológicas, no solo por factores como la complejidad de diversos terrenos sino por que en ocasiones implica un alto costo computacional y de almacenamiento. Estos estudios muestran que aún es compleja la aplicabilidad del LiDAR pues a pesar de ser una tecnología que hoy día es más explorada, falta aún un largo camino de exploración en diferentes campos.

Asimismo otra limitante según Toumazet et al. (2017) es que la interpretación de los datos obtenidos con LiDAR usualmente requieren un análisis manual por parte de expertos, el cual

conlleva a un alto consumo de tiempo adicional, además en ocasiones la interpretación por parte de una persona puede ser un proceso subjetivo lo cual tiene un impacto en la clasificación de sitios. Conviene destacar que con el fin de equilibrar estas limitantes se está haciendo uso de herramientas como la automatización de interpretación de características arqueológicas, aunque este proceso constituye en sí, otro tipo de investigación adicional a la acá planteada. Por último, a pesar de las limitaciones presentadas, la combinación de análisis LiDAR y verificación en campo suponen una gran herramienta para áreas densamente boscosas (Toumazet et al., 2017; von Schwerin et al., 2016).

3.3.2 Pasos futuros del LiDAR en arqueología

Como se mencionó brevemente la detección automática de características arqueológicas es una herramienta que está en proceso de ser ampliamente usada debido a su utilidad en el proceso de investigación arqueológica. Estas herramientas toman mayor relevancia en áreas de gran tamaño donde la interpretación manual es dispendiosa. Es importante aclarar que existen una serie de limitantes con respecto al uso de la automatización, la primera de ellas es que cuando existe un volumen de sitios abundante se hace más difícil el reconocimiento automático sin cabida a errores, el segundo es que es muy difícil generalizar el enfoque de detección automática en diversos estudios debido a que las estructuras varían por su forma, tamaño, propósito y cultura (Toumazet et al., 2017). Por lo tanto, la eficiencia en el algoritmo de reconocimiento de patrones estará sujeta a la caracterización de la morfología de los sitios arqueológicos a documentar (Štular et al., 2021).

Por otro lado uno de los elementos que está teniendo un alto impacto en el uso de LiDAR aerotransportado es el uso de vehículos aéreos no tripulados o VANT, es usual que el conjunto de datos LiDAR este asociado a aeronaves como aviones o helicópteros debido al tamaño del equipo, lo cual facilita su carga en el mapeo, sin embargo esto representa un obstáculo en la investigación

debido a los costos que lleva acceder a este tipo de equipos (Casana et al., 2021). En la última década se han desarrollado una serie de sensores LiDAR más compactos que permiten su montaje en VANTS, lo que supone una serie de herramientas con alto potencial para la captura de información arqueológica, principalmente por que se pueden recopilar datos LIDAR donde y cuando se necesitan, adicionalmente su fácil manipulación permite maximizar elementos como la resolución en pro de cada proyecto. En la investigación realizada por Vilbig et al (2020) evalúan la adquisición de datos con LiDAR y con imágenes de VANT y comparan los resultados mediante el DEM, en este caso el resultado mostro que la precisión de los datos de ambas herramientas tiende a ser similar, por lo que el uso de VANT es un buen sustituto de LiDAR cuando se requiera de un estudio rápido y preciso en condiciones de paisaje con poca o escasa vegetación, no obstante la combinación de ambos ofrecen una herramienta robusta de adquisición de datos con un alto porcentaje de precisión comparado a otras metodologías.

De forma semejante otra herramienta que está tomando fuerza es la apertura de los datos a los usuarios que requieran de esta información de forma libre, Von Schwerin et al (2016) señalan que es importante contar con datos para poder gestionar de mejor manera los recursos culturales, adicional a su uso en otro tipo de investigaciones como modelos hidrológicos, reconstrucciones de paisaje y análisis de visibilidad entre muchos otros. Sin embargo, la publicación de datos LiDAR es limitada debido al volumen de la información, por lo que las investigaciones con este tipo de datos son usualmente muy pocas (von Schwerin et al., 2016). Es necesario el uso de herramientas que permitan a los investigadores integrar y consultar datos arqueológicos complejos en línea, lo cual contribuye en investigaciones futuras debido al alto potencial en el descubrimiento de nuevas características tanto de paisaje como de diferentes estructuras.

4 Referente normativo y legal

Existe un referente normativo de gran importancia en el desarrollo del actual proyecto, este consiste en la normatividad para vuelos con UAV en Colombia, la cual será desarrollada más adelante, por otro lado es necesario mencionar que para las actividades de prospección arqueológica en Colombia también existe una extensa normatividad la cual es regulada por el Instituto Colombiano de Antropología e Historia, sin embargo, debido a que en el desarrollo del proyecto solo se realizó un reconocimiento superficial del terreno (Greene & Moore, 2010) y no se alteró de ninguna forma el contexto sobre el cual se realizó la investigación, no es necesaria la descripción de la norma en el actual documento.

4.1 Reglamentación para la operación de UAV en Colombia

De acuerdo con la Circular Reglamentaria N0. 002 (CR-5100-082-002), publicada el 8 de septiembre de 2015, la cual tiene como propósito pronunciar los requisitos generales de aeronavegabilidad y Operaciones para Sistema de aeronaves pilotadas a distancia o RPAS en Colombia, fue emitida por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil –UAEAC (Aeronáutica Civil de Colombia, 2015), en su condición de Autoridad en materia aeronáutica en todo el territorio nacional. En ese sentido se mencionan a continuación principales normas para el uso de este tipo de aeronaves en Colombia.

4.1.1 Condiciones de aeronavegabilidad para RPAS descritas en la Circular Reglamentaria No. 002

- Las hélices o rotores de la Aeronave pilotada a distancia no pueden ser metálicos.
- Deben contar en su equipo con, sistema de piloto automático, sistema GPS, sistema de lanzamiento y recuperación en condiciones normales de operación, sistemas para la seguridad en vuelo.
- Estación de pilotaje a distancia, que permita el control (vía radio) del aparato en todas sus fases de vuelo y provea información sobre sus condiciones de operación, deberá contar con un radio receptor para escucha de frecuencias aeronáuticas de comunicaciones.
- Sus sistemas de radio control, de transmisión y recepción de datos o imagen no deberán causar ningún tipo de interferencia a otros tipos de sistemas o actividades aeronáuticas o no aeronáuticas.
- Su sistema moto propulsor no debe generar ruido excesivo o contaminación.
- Debe contar con instructivos o manuales técnicos y de operación.
- Los colores exteriores de las Aeronaves pilotadas a distancia, las hacen claramente visibles y detectables a distancia. Adicionalmente es importante que la aeronave tenga adherido una placa con el nombre del Explotador de la RPA y datos de contacto para identificar la aeronave y el responsable en caso de accidente, incidente o violación a la norma.

4.1.2 Limitaciones de la Operación de RPAS de acuerdo con lo descrito en la Circular Reglamentaria No. 002

- Volar sobre área congestionada, edificaciones o directamente sobre público o aglomeraciones de personas.
- Volar de modo que se pueda crear un riesgo para las personas o propiedades en la superficie, particularmente, cuando el viento fuerte o cualquier otro factor meteorológico, así como desperfectos mecánicos del aparato o del equipo de control, o falta de pericia del operador, que puedan ocasionar que se pierda el control total sobre el mismo.
- Aeronaves pilotadas a distancia con un peso máximo de despegue superior a 25 kg
- Aeronaves pilotadas a distancia que portan pesos útiles diferentes a los elementos que sean aprobados por la DSNA para el vuelo a ser realizado.
- Volar desde un aeródromo o en sus proximidades dentro de un radio de 2.7 NM- Millas náuticas (5 km) a la redonda.
- Volar a una altura superior a 500 pies (152 metros aproximadamente) sobre el terreno (AGL) o sobre el agua.
- Volar de modo que se aleje más de 750 metros de distancia del operador o del lugar de su lanzamiento o despegue.
- Volar en operación nocturna o diurna bajo reglas de vuelo por instrumentos.

- Volar al interior de una zona prohibida o restringida del espacio aéreo, publicado por la UAEAC.
- Volar en las proximidades dentro de un radio de 1 Milla Náutica (1.8 Km aproximadamente) a la redonda de cualquier lugar donde se encuentra el presidente de la república, vicepresidente y otras autoridades nacionales y extranjeras.
- Volar cerca de, o sobre instalaciones militares, policiales o centros carcelarios.
- Volar transportando animales.
- Arrojar objeto alguno estando en vuelo.
- Operar cerca a cualquier aeronave tripulada.
- Efectuar operaciones autónomas, en el ámbito civil, haciendo uso de vehículos aéreos autónomos, independiente de cuál sea su finalidad, excepto para su pronta recuperación en caso de fallas o emergencia.

4.1.3 Requisitos exigidos por la Circular Reglamentaria No. 002, para certificarse como Piloto/Observador RPAS

- Nombre e identificación.
- Relación de entrenamiento relacionada con RPAS:
- Regulaciones aéreas, (Incluyendo el reglamento del aire, normas generales de operación de aeronaves RPA, la clasificación de espacios aéreos y servicios de tránsito aéreo que en ellos

se presta y las presentes disposiciones sobre RPAS, transporte de mercancías peligrosas y notificación de accidentes e incidentes).

- Aerodinámica y principios de vuelo.
- Meteorología aeronáutica (Incluyendo fenómenos meteorológicos, afectaciones de las condiciones meteorológicas a la operación, identificación de condiciones meteorológicas potencialmente peligrosas y la forma de evitarlas, altimetría e interpretación de reportes meteorológicos).
- Navegación (Incluyendo principios generales, navegación visual y a estima y navegación apoyada en GPS).
- Comunicaciones aeronáuticas (incluyendo fraseología aeronáutica y procedimientos radiotelefónicos de los servicios de tránsito aéreo).
- Sistemas de gestión de seguridad operacional – SMS.
- Conocimiento de la aeronave a operar. (Clasificación de los RPAS, concepto de aeronavegabilidad, célula de las aeronaves, grupo moto propulsor, instrumentos de a bordo, sistema de control de la aeronave, sistemas de seguridad de control de altura, sistema de vuelta a casa, perfil del vuelo, performance de la aeronave, planificación (tipo de vuelo, estudio de la zona en mapa) y determinación de riesgos.

- Relación de la experiencia práctica del piloto y observador (si lo hubiera) en equipo RPA (piloto: mínimo 40 horas de vuelo de un RPA y 200 despegues o lanzamientos y aterrizajes o recuperaciones).
- La instrucción debe haberse recibido en centro de instrucción aeronáutico aprobado por la UAEAC (Ajustado por lo menos a las horas y contenidos mínimos de las materias referenciadas en el literal (b) de un curso de escuela de tierra de formación para piloto privado) o en universidad nacional o extranjera que posea una facultad de ingeniería aeronáutica o aeroespacial con un programa de educación continuada para RPAS (Ajustado por lo menos a las horas y contenidos mínimos de las materias referenciadas en el literal (b) de un curso de escuela de tierra de formación para piloto privado – Directivas).
- Si el piloto RPA fuera piloto de aeronaves tripuladas no requiere los requisitos anteriores, pero deberá aportar copia de su licencia de piloto privado o piloto comercial, y deberá cumplir con la experiencia indicada en el párrafo (c) y el ítem (b).
- Haber estudiado el manual de operación del equipo RPA específico y efectuados despegues o lanzamientos, vuelos y aterrizajes o recuperaciones de familiarización con el mismo, a menos que la experiencia práctica mencionada en el literal (c) hubiera sido adquirida en uno de la misma marca y modelo.

5 Referente teórico

Desde la propuesta planteada se hace necesario establecer los fundamentos teóricos y metodológicos con el fin de dar una respuesta lógica y efectiva, por ello es importante mencionar los componentes principales de las temáticas a tratar. Cabe resaltar que el fundamento básico de la propuesta es la búsqueda y documentación de sitios arqueológicos, por lo que en ese sentido se hace necesario hablar de arqueología.

5.1 Elementos arqueológicos fundamentales

La arqueología es una disciplina que proviene de la antropología, la cual, en su sentido más amplio, estudia al hombre, sus características biológicas, físicas, culturales, comportamentales entre otras, por su parte la arqueología busca entender los procesos de las culturas pasadas a través de los restos materiales encontrados en la actualidad, y de esta manera reconstruir parte de la historia de nuestros antepasados. La evidencia arqueológica que se encuentra no dice concretamente a que hace referencia, es necesario a través de la investigación darle un contexto o un sentido, sin embargo, no basta con una reconstrucción de la cultura material, hoy en día es posible tener claridad en los patrones de comportamiento y entender de qué forma surgió dicha cultura material (Renfrew & Bahn, 2008).

Por otro lado, según Binford (1988), el registro arqueológico se compone no solo de los registros materiales sino de la distribución de la materia, es decir es necesario averiguar cómo llegaron a existir esos materiales, los cambios que han sufrido y porque llegan a tener las características que vemos en el presente, esta revelación va a estar ligada a la dinámica de las actividades humanas con las consecuencias observables, que serían los vestigios arqueológicos.

Para afrontar el ejercicio arqueológico se requiere de metodologías adecuadas, donde se integren técnicas que admitan hacer inferencias del pasado y observaciones arqueológicas que permitan correctas interpretaciones.

Es común que al hablar de arqueología lleguen a la mente los hallazgos arqueológicos más reconocidos alrededor del mundo, ya sea por su tamaño o historia, sin embargo, los sitios arqueológicos no siempre están compuestos por grandes estructuras, que dan clara cuenta de la presencia de poblaciones, estos también pueden estar compuestos por vestigios más sencillos, como basura producto de actividades diarias, restos alimenticios, trozos de cerámica o herramientas desechadas, entre otros, remanentes de lo que pudo haber sido el establecimiento de poblaciones y que se acumulan con el paso del tiempo, así pues pueden considerarse en general como los lugares o sitios arqueológicos donde se encuentran juntos artefactos, características, estructuras y restos orgánicos (Colin Renfrew, 2015).

Con el fin de reconstruir la actividad pasada de un sitio, es importante tener en cuenta el contexto del hallazgo, el material que lo rodea, la procedencia y el registro de otros hallazgos, esto con el fin de poder identificar con precisión la procedencia de estos vestigios y su relación con los sitios. Adicional, es necesario tener en cuenta los procesos de formación de dichos lugares pues un sitio se ve afectado por la manera como se hayan dado estos procesos, que pueden ser formaciones de tipo cultural (actividades antrópicas) o formaciones naturales (medio ambiente), las cuales producen cambios en el momento antes y después del enterramiento, llamados ambientes postdeposicionales (Greene & Moore, 2010). Tener claridad en el proceso de formación tiene incidencia en la claridad de la preservación física de un vestigio arqueológico.

El proceso de formación natural puede provocar cambios severos en los vestigios arqueológicos, no sólo porque en casos específicos pueden cambiar de posición los artefactos, cambiando así su contexto, sino porque de la naturaleza de la formación dependerá muchas veces el proceso de conservación o no de los artefactos, por otro lado el material de estos también juega un papel importante pues artefactos de tipo orgánico no sobreviven tan bien al paso de la naturaleza como los inorgánicos, a menos que estén en ambientes especiales donde puedan ser preservados (Colin Renfrew, 2015).

5.2 Noción del paisaje en arqueología

Un aspecto fundamental a tener en cuenta es el paisaje o espacio que define el contexto de los sitios arqueológicos, el concepto de paisaje va a variar dependiendo la disciplina que lo esté usando (Gómez, 2011), un ejemplo claro de ello es la arqueología, pues al interior de esta, el concepto va estar definido en función del contexto del cual se esté hablando, desde modelos de ocupación de grupos humanos hasta modificación del paisaje por parte de estos. Es por ello que se deben dejar en claro dos conceptos fundamentales en arqueología antes de entrar a definir los posibles patrones de transformación del paisaje debido a actividades humanas, el primero de ellos es la arqueología procesual, la cual en su sentido más amplio establece que existe una relación entre los sistemas socioculturales y ambientales (Almudena, 1992), es decir que las condiciones ambientales tuvieron incidencia en la actividad humana, por lo que dependiendo el sistema ambiental se generaron procesos de adaptación, a su vez cambios en uno de los dos sistemas provocara cambios en el otro, a partir de este razonamiento es posible pensar en mediciones que permitan realizar otro tipo de interpretaciones de los vestigios arqueológicos. Por otra parte existe la llamada arqueología postprocesual, la cual implica la no conceptualización de la cultura y que

va en contra de la arqueología procesual, pues rechaza la idea de ser determinista cuando a comportamiento humano se refiere, en general defiende la idea del ser humano como un individuo con capacidad de toma de decisiones y de libre albedrío (Álvarez Vidaurre, 2007), y que en contra de lo que establece la arqueología procesual su comportamiento será independiente del paisaje o espacio. En ese sentido sería osado establecer que el presente estudio pertenece a una u otra corriente arqueológica, sin embargo, para poder definir aspectos del paisaje con relación a la actividad humana se van a tomar aspectos teóricos y metodológicos enmarcados en la arqueología procesual.

La transformación del paisaje en arqueología, parte de la noción de observación, se establece que las investigaciones arqueológicas en el paisaje deben ser de una u otra forma susceptibles de ser medidas, por lo que en caso de no existir alteraciones antrópicas en lo natural no es posible establecer evidencias humanas en el registro arqueológico (Gómez, 2011). En otras palabras, la huella material que deja la gente a su paso puede dar cuenta de cómo percibieron su espacio, así pueden estudiarse nociones como patrones de asentamiento, definición de unidades políticas y aprovechamiento de recursos naturales entre otros.

La forma de caracterizar el paisaje y la transformación de este es mediante la documentación de los elementos que integran el espacio y los vínculos que existen entre dichos elementos, en el caso de la presencia de sitios arqueológicos estos deben ser analizados como parte del conjunto de elementos, pues como ya se mencionó previamente es necesario evaluar el ambiente del sitio arqueológico para entender la formación de este. Adicionalmente a través del análisis de formas concretas que hacen alusión a la existencia de sitios arqueológicos es posible

establecer qué tipo de estructuras deben ser analizadas a futuro dentro de un mismo contexto, en función de su forma geométrica y distribución (Gordillo, 2014).

5.3 Técnicas de análisis en arqueología

La principal forma de encontrar sitios arqueológicos y características en el proceso de investigación es a través de un estudio de reconocimiento, terrestre o aéreo (Colin Renfrew, 2015), donde es trabajo del arqueólogo evaluar las características de los sitios y de esta forma escalar el proceso de investigación.

5.3.1 Reconocimiento terrestre

El reconocimiento terrestre se aborda llevando a cabo excavaciones en tierra por niveles y a través de diversas técnicas in situ, de esta forma se pueden descubrir características y artefactos, dejando a menudo documentación o registro de lo encontrado, este proceso requiere normalmente de bastante dedicación en tiempo, costo y esfuerzo para el momento del trabajo en campo y posterior a este, el cual incluye análisis y publicación de resultados. Por otro lado, el estudio de reconocimiento en aire consiste en el uso de técnicas que implican la evaluación de un sitio antes de entrar a realizar algún proceso de excavación, evitando de esta forma el uso de recursos innecesariamente y la destrucción de sitios (David Wheatley, 2002). Sin embargo, en el ejercicio en la vida real es probable que ambas técnicas se lleven a cabo.

Todos los métodos de reconocimiento inician con la consulta de fuentes documentales, que puedan tener registro de sitios arqueológicos cercanos a la zona de trabajo o que puedan dar cuenta del contexto, hace parte del rol del arqueólogo la localización y registro de sitios. Para el caso del reconocimiento terrestre existen métodos de recolección de información sobre todo en aquellos sitios donde los vestigios no son visibles y están altamente dispersos, la inspección del sitio puede

incluir procedimientos de muestreo de recursos naturales y minerales, así como recolección de artefactos, también es importante tener en cuenta la variedad del paisaje en la zona, pues dependiendo este elemento es factible el cambio de método de reconocimiento. Otros elementos a tener en cuenta en la búsqueda de sitios y técnicas de recuperación son la ubicación, los costos, el acceso y los recursos disponibles, no obstante, el ejercicio de reconocimiento en campo es vital en el trabajo arqueológico, al mismo tiempo este ejercicio puede ser complementado con reconocimientos aéreos, donde la disponibilidad de estos recursos puede ayudar en la selección y delimitación de áreas (James R. Wiseman & El-Baz, 2007).

5.3.2 Reconocimiento aéreo

Por su parte el reconocimiento aéreo se estima puede dividirse en dos fases, la primera de recolección de datos, es decir la toma de imágenes, ya sean aerofotografías, imágenes de satélite o nubes de puntos, entre otras; la segunda fase es el análisis e interpretación de los datos, las cuales es posible integrar a datos recolectados en campo o fuentes documentales. Los datos asociados a la primera fase se pueden usar con diversos propósitos, que van desde el hallazgo, registro, seguimiento de sitios hasta el reporte de presencia y ausencia de estructuras. Por otro lado, la fase de análisis dependerá en gran parte del conocimiento que tenga el intérprete acerca de la diferenciación de zonas en la imagen, el mapeo de sitios a partir de imágenes es cada vez más frecuente en la arqueología aplicada, por su parte constituye los inicios de la espacialización de los sitios relacionada al paisaje. En ese orden de ideas el éxito en la identificación de sitios de forma remota dependerá de las características de la zona y de los procesos de formación que se hayan dado, para ello factores como la fecha, el tipo, la calidad y la información de los datos juegan un

papel fundamental (Colin Renfrew, 2015), pues no es lo mismo una serie de datos tomados en tiempos de lluvia, que unos datos en tiempos de sequía. Adicional este tipo de reconocimiento admite una mayor amplitud del área de estudio pues el alcance de los datos lo permite, por lo que pueden ser estudiadas zonas puntuales, así como regiones enteras, es decir que no hay límites en el reconocimiento por la escala a comparación de otros métodos.

5.4 Fuentes de información reconocimiento aéreo

Es necesario tener en cuenta al momento del reconocimiento aéreo el tipo de instrumento a usar, no solo por los costos que pueda conllevar el uso de uno u otro, sino por los beneficios que pueden ofrecer en términos de su alcance, para ello es necesario considerar la teledetección y sus diferentes elementos como fuente de información primaria, pues a pesar de ser un campo que en ocasiones se considera ajeno a la arqueología, la convergencia entre las dos materias es cada vez más evidente.

5.4.1 Teledetección

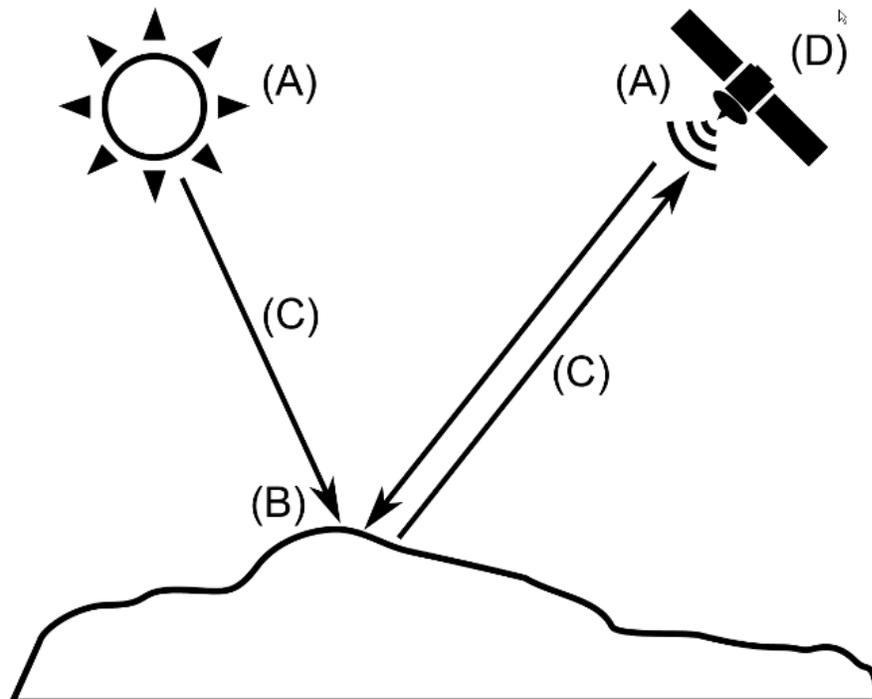
La teledetección abarca el estudio de una serie de objetos en la superficie terrestre donde no existe contacto físico entre el objeto y el instrumento, este vínculo se genera a través de la captura por sensores remotos, estos dispositivos se encargan de tomar magnitudes físicas y transformarlas en magnitudes eléctricas, lo que permite obtener datos de los objetos que interactúan en este sistema (Olaya, 2014). Adicionalmente la teledetección no solo se encarga de recolectar la información y crear datos, sino del tratamiento posterior, el cual incluye una fase de procesamiento y una fase de interpretación.

Los sistemas de teledetección tienen una serie de elementos claves, los cuales varían en función de su objetivo (ver **Figura 1**), donde:

- (A) Fuente de energía: Corresponde a la fuente que emite radiación hacia la superficie terrestre, esta puede ser de origen natural o artificial.
- (B) Objeto: Objeto o superficie que interactúa con la radiación emitida por la fuente de energía.
- (C) Atmósfera: por donde se desplaza la radiación, entre la fuente de energía, el objeto y el sistema sensor, introduce perturbaciones.
- (D) Sistema sensor: compuesto por un sensor y una plataforma, donde es capturada la energía que proviene del objeto.

Figura 1

Funcionamiento básico sistemas de teledetección



Fuente: (Chuvienco, 1995)

Adicional al sistema básico de teledetección podemos añadir elementos como un sistema de recepción, encargado de recibir y transformar los datos en diferentes formatos, un sistema interprete y un sistema de usuario final (Chuvienco, 1995).

5.4.2 Sensores

Entre los componentes clave de un sistema de teledetección está el sistema sensor, conformado por un instrumento que captura la información proveniente de los objetos y de una plataforma que será la encargada de transportar dicho instrumento o sensor. Es necesario hacer claridad en la distinción entre el sensor y la plataforma, cada una tendrá una clasificación según el objetivo del análisis a realizar, por su parte las plataformas se clasifican en tres tipos, Terrestres, Aéreas (dentro de la atmosfera) y Espaciales (fuera de la atmosfera). Por otro lado los sensores o instrumentos son de varios tipos pero se clasifican en dos clases, los sensores pasivos o los sensores

activos (Paine & Kiser, 2012), el primero hace referencia a sistemas de teledetección que requieren de una fuente de energía externa para su correcto funcionamiento, ejemplo de ello son las cámaras de satélite las cuales requieren de la luz solar para percibir la frecuencia del espectro de los objetos vistos desde el espacio, por el contrario los sensores activos generan su propia fuente de energía, es decir que no van a depender de fuentes externas para la captura de datos, ejemplo de ello son los sistemas activos Radar o LiDAR.

5.4.2.1 RADAR y LIDAR

Los sistemas activos Radar (Radio Detection And Ranging) y LiDAR (Ligth detection and ranging), como ya se mencionó están en la capacidad de emitir su propia luz para poder percibir datos sobre la superficie de la cual es reflejada esa luz, ambos tienen la capacidad de percibir información tanto en el día como en la noche, adicional no tienen limitaciones significativas de interferencia atmosférica, no obstante, presentan limitaciones en superficies de agua y con objetos con alta reflectividad. Cada uno ofrece una serie de ventajas y desventajas que deben considerarse al momento de elegir el trabajo con una u otra (ver **Tabla 1**).

Tabla 1

Comparativo sensores activos Radar y LiDAR

Parámetros	LiDAR	RADAR
Longitud de onda	Utiliza señales ópticas (IR cercano, visible) Longitudes de onda $\approx 1 \mu\text{m}$	Utiliza señales de microondas. Longitudes de onda $\approx 1 \text{ cm}$. (Aproximadamente 100,000 veces más largo que el IR cercano)
Objetos	Las longitudes de onda más cortas permiten la detección de objetos más pequeños	Tamaño del objetivo limitado por una longitud de onda más larga.

	(partículas de nubes, aerosoles).	
Ancho del haz	Has enfocado y alta frecuencia permiten una alta resolución espacial (<1 m horizontal).	El ancho del haz y la longitud de la antena limitan la resolución espacial (decenas de metros). Las técnicas de apertura sintética reducen los requisitos de longitud de la antena.
Sensor de aspecto	Nadir	Lateral
Condiciones de uso	Limitado a condiciones atmosféricas despejadas, cobertura diurna o nocturna.	Puede operar en presencia de nubes. Cobertura diurna o nocturna.

Fuente: Adaptada (Wang et al., 2020)

Adicionalmente los datos obtenidos mediante sensores activos como la tecnología LiDAR proporcionan grandes cantidades de información que al saber interpretarlas pueden suministrar datos muy reveladores no sólo de los sitios sino del contexto en general, como marcas en cultivos, suelo y cambios en la vegetación, que no es posible identificar en fotografías aéreas convencionales o en imágenes multispectrales de baja resolución. Por ejemplo, a través del uso de la banda infrarroja de las imágenes de satélite multispectrales se pueden identificar anomalías en la vegetación, rasgos que pudieron cambiar por diversos motivos, ya sea por la temperatura, por el clima, por actividades humanas o por la presencia de estructuras (Greene & Moore, 2010), sin embargo al momento de trabajar áreas muy puntuales la resolución espacial de las imágenes puede ser una limitante en términos de observar estas anomalías, es por ello que el uso de técnicas más precisas de escaneo del terreno como LiDAR pueden registrar características arqueológicas tanto a escala de sitio como de paisaje (White, 2013). La correcta interpretación de los datos permite tener conclusiones sobre la distribución de sitios, patrones de asentamiento y características de paisajes antiguos. Sin embargo es importante aclarar que el uso de esta información ya sea datos LiDAR o imágenes de satélite presentan ciertas limitaciones, como la disponibilidad o el acceso a

estas pues para un buen análisis se requiere de nube de puntos lo suficientemente densa como para cubrir el área de estudio, así como de imágenes con alta resolución espacial y temporal, lo cual implica el uso de imágenes que no son de libre acceso, y en ocasiones requieren de una inversión significativa por el cubrimiento que debe tener de las áreas objeto de estudio.

5.4.2.2 Descripción de LiDAR (*Light Detection and Ranging*)

El funcionamiento del sensor activo LiDAR consiste en emitir una serie de pulsos electromagnéticos hacia un objeto o superficie, mediante el cual se mide el tiempo de retorno al sensor luego de la interacción con el objeto y la atmosfera (Bandini et al., 2020). Es posible obtener información detallada de la superficie en función del tiempo y el retorno del haz de luz. El sensor LiDAR puede tener su montaje en una variedad de plataformas de observación, es importante tener en cuenta el propósito, la metodología de trabajo, el volumen de información y postprocesamiento, al momento de querer ejecutar un análisis LiDAR en una investigación. Las plataformas a tener en cuenta son terrestres, espaciales y aéreas (Reyes et al., 2015). Para el caso de la presente investigación, se van a explorar datos de LiDAR aerotransportado.

Este tipo de plataforma consiste en la movilización del sensor de forma aérea, usualmente una aeronave como un avión, helicóptero o en vehículos aéreos no tripulados, este tipo de sistemas tienen una serie de ventajas y desventajas, en primer lugar las condiciones climáticas suelen ser una limitante, pues condiciones negativas pueden impedir el correcto funcionamiento del sensor e incluso impedir que se tomen datos, por otro lado dependiendo la plataforma es posible obtener mayor amplitud en la información debido a la altura en el momento de captura de los datos, por otra parte el recurso económico también jugara un papel importante, debido a que plataformas

grandes como aviones que en si proporcionan gran estabilidad al sensor, pueden ser usualmente costosas e incluso inasequibles para muchos investigadores, en contraste los vehículos aéreos no tripulados son una solución a este inconveniente dado que en la actualidad son más accesibles debido a su avance tecnológico, haciendo de esta plataforma una opción más económica por lo tanto más viable en el panorama de recursos limitados (Štular et al., 2021).

Con respecto al funcionamiento del LiDAR aerotransportado, para obtener información de la superficie, el sistema LiDAR mide la distancia del sensor hasta los elementos objetivo, pero para llevar a cabo esta tarea el sistema debe contar un Sistema de Posición Global Diferencial (DGPS) y una Unidad de Medición Inercial (IMU) a bordo de la plataforma, su funcionamiento se basa en el tiempo transcurrido desde la emisión del pulso laser hasta su retorno (Sexton et al., 2009). Cada una de estas llegadas se registra como un punto localizado en un espacio con dimensiones X, Y y Z, en el caso de la altura de la plataforma se calcula la diferencia vertical de los retornos laser de la aeronave y el terreno.

Los sensores LiDAR presentan una serie de variaciones de acuerdo a la longitud de onda electromagnética del haz de luz o laser, a su vez tendrán en cuenta la potencia, tiempo de retorno, frecuencia de emisión de la luz, todo en conjunto teniendo en cuenta en la planeación previa el ángulo del sensor, la altura del vuelo y el área recorrida (Sexton et al., 2009).

Como ya se mencionó el tipo de sensor variara dependiendo una serie de factores, en ese sentido los sensores LiDAR se pueden dividir en dos categorías: Un LiDAR de retorno discreto y un LiDAR de onda continua, en el caso del primero este sistema proporciona una o más alturas de retorno permitiendo su fácil adaptación a diferentes alturas, velocidades, frecuencia del haz de luz y otros parámetros definidos en la captura de datos (Sexton et al., 2009). Por otro lado los sensores LiDAR de onda continua capturan la información constantemente a lo largo del eje vertical del

área capturada, parámetro que permite obtener información detallada pues su distribución y densidad en el espacio capturan información que a simple vista no es posible identificar, como la ubicada bajo el dosel de los árboles (Sexton et al., 2009). Es por esto por lo que este último tipo de sensor LiDAR es ampliamente usado en investigaciones en zonas donde la vegetación dificulta el uso de otro tipo de métodos.

5.4.2.3 *Conjunto de datos LiDAR y procesamiento*

Los archivos resultantes del conjunto de datos LiDAR como ya se mencionó comprenden una nube de puntos que son procesados para obtener datos de terreno, los cuales dependiendo el volumen de la información y la capacidad de procesamiento pueden clasificarse en dos clases, puntos de terreno y puntos no terrestres (Bernardini et al., 2013). Estos datos se procesan en software GIS, permitiendo de esta forma obtener un modelo digital de elevación y las estructuras arqueológicas. Dicho modelo es una fuente fundamental de datos de elevación, tiene una estructura en formato ráster y permite representar la superficie del terreno, es importante aclarar que cuando este modelo digital de elevación tiene en cuenta las características de la superficie es un modelo digital de superficie DSM (Muhadi et al., 2020). Hay múltiples fuentes de datos de adquisición de modelos digitales de elevación los cuales variaran principalmente en su resolución espacial, acceso y localización. En el caso de LiDAR el DEM se convierte en el principal producto en el postprocesamiento, pues permite encontrar variaciones en el paisaje debido a cambios que pueden ser de tipo ambiental o antrópicos, la densidad de nube de puntos permite la obtención de una superficie altamente compleja por la cantidad de detalle, a su vez llega a ser muy eficiente por su alta resolución. En arqueología este insumo permite clasificar los datos de cubierta vegetal, puntos

de suelo y estructuras antrópicas, facilitando el reconocimiento arqueológico (Thompson, 2020), el DEM es lo que constituye en este estudio la principal variable ambiental. La resolución de los productos resultantes varía dependiendo la vegetación, la frecuencia del paso de la aeronave y la calidad del instrumento entre otros.

5.5 Metodología de reconocimiento

De esta manera los métodos de reconocimiento aéreo al igual que el reconocimiento terrestre requieren de una metodología bien planificada, para que al momento de la ejecución esta tenga resultados positivos, en ninguno de los dos casos es posible realizar todo el reconocimiento de forma automática ya que la manipulación de los datos varía según el contexto del sitio, condiciones atmosféricas, el tipo de paisaje y en general los objetivos de la investigación. Un método puede ser complemento del otro, pues los datos recolectados de forma aérea pueden ayudar a determinar un área de excavación por lo que precede al estudio arqueológico de campo (Greene & Moore, 2010).

Actualmente es más frecuente el uso de este tipo de metodologías que incluyen el análisis aéreo como complemento del análisis en campo, ejemplo de ello son las metodologías basadas en variables ambientales para considerar los patrones de asentamiento, posterior a un mapeo de sitios en función de las variables, técnicas basadas en la interpretación de texturas, tonalidades y estructuras de las imágenes para identificar elementos, o métodos de clasificaciones temáticas de recursos naturales (agua, suelos, minerales, cultivos) que permite identificar variables como altitud, pendiente y orientación de sitios, dando cuenta de la relación de los sitios con el paisaje (Montufo Martín, 1992). Son múltiples los estudios que hoy en día presentan resultados positivos

con el uso de estas metodologías, sin embargo, en muchos lugares aún no es frecuente el uso de estos métodos.

Este enfoque metodológico basado en teledetección permite en gran medida la localización de vestigios arqueológicos través del procesamiento de datos LiDAR combinado a información previa, adicional a la utilidad en el uso de los SIG en la gestión de conjuntos de datos de apoyo que puede ofrecer contribuciones efectivas a la comprensión de localización de asentamientos arqueológicos (Traviglia & Cottica, 2011). Es importante tener presente que la combinación de datos de diferentes fuentes como mapas históricos, uso de imágenes, interpretación visual y verificación en campo posibilitan la adopción de los SIG en la investigación arqueológica contribuyendo de esta forma en la comprensión de los asentamientos antiguos y su relación con el paisaje.

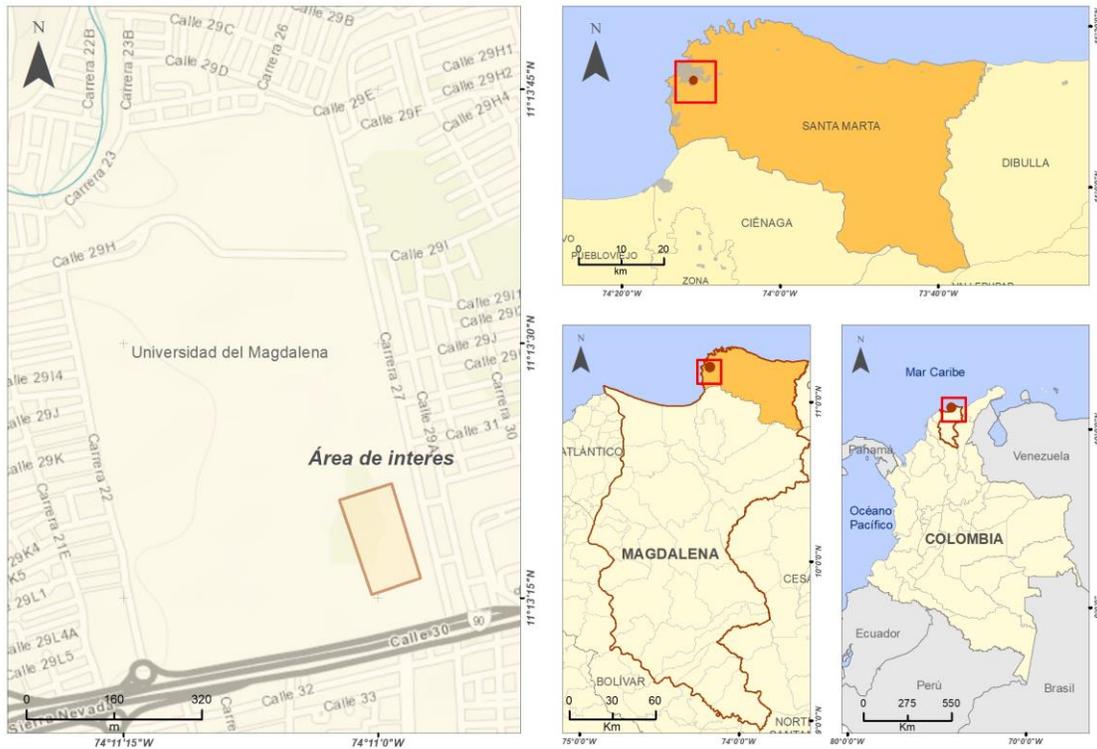
6 Metodología

La metodología de trabajo estuvo basada en el desarrollo y experimentación de un sensor LiDAR de bajo costo enfocado en la arqueología para la creación de una metodología de identificación y análisis de contextos arqueológicos en la Universidad del Magdalena, municipio de Santa Marta, departamento del Magdalena (ver **Figura 2**), a partir de la captura y análisis de datos LiDAR. Para dar cuenta de este proceso y con base en la información secundaria recopilada y expuesta tanto en el apartado de antecedentes como en el de referente teórico se desarrolló una metodología la cual consistió en tres pasos: 1) desarrollo de una plataforma LiDAR de bajo costo, 2) Captura y procesamiento de los datos de campo y 3) Análisis de dichos datos y comprobación en campo.

Para el presente análisis se definió trabajar a escala de sitio, en una zona de posible identificación de vestigios arqueológicos debido principalmente a las posibles modificaciones del paisaje en época actual, la premisa principal es que esta remoción de suelo pudo generar la presencia de materiales arqueológicos en superficie, con el fin de comprobar la metodología de identificación y documentación de contextos arqueológicos se planeó el uso de LiDAR, adicionalmente el sitio de análisis fue seleccionado por sus características ambientales, dado que para comprobar la efectividad de la metodología es necesario trabajar en zonas con alta cobertura vegetal que impiden la aplicación de otro tipo de métodos más tradicionales.

Figura 2

Localización general y específica área de interés



Fuente: Elaboración propia, 2021.

6.1 Desarrollo de la plataforma LiDAR

El sistema de captura de datos de LiDAR aerotransportado requiere de una serie de elementos claves al momento de registrar la información, tanto de la captura de datos angulares como de datos de distancias, uno de los elementos es la Inertial Measurement Unit o Unidad de Medición Inercial (IMU) la cual registra la orientación para cada punto medido, adicionalmente requiere de un Sistema de Navegación Satelital (GNSS) para registrar la ubicación espacial de cada punto capturado, por ultimo requiere una plataforma o un vehículo para desplegar el sistema,

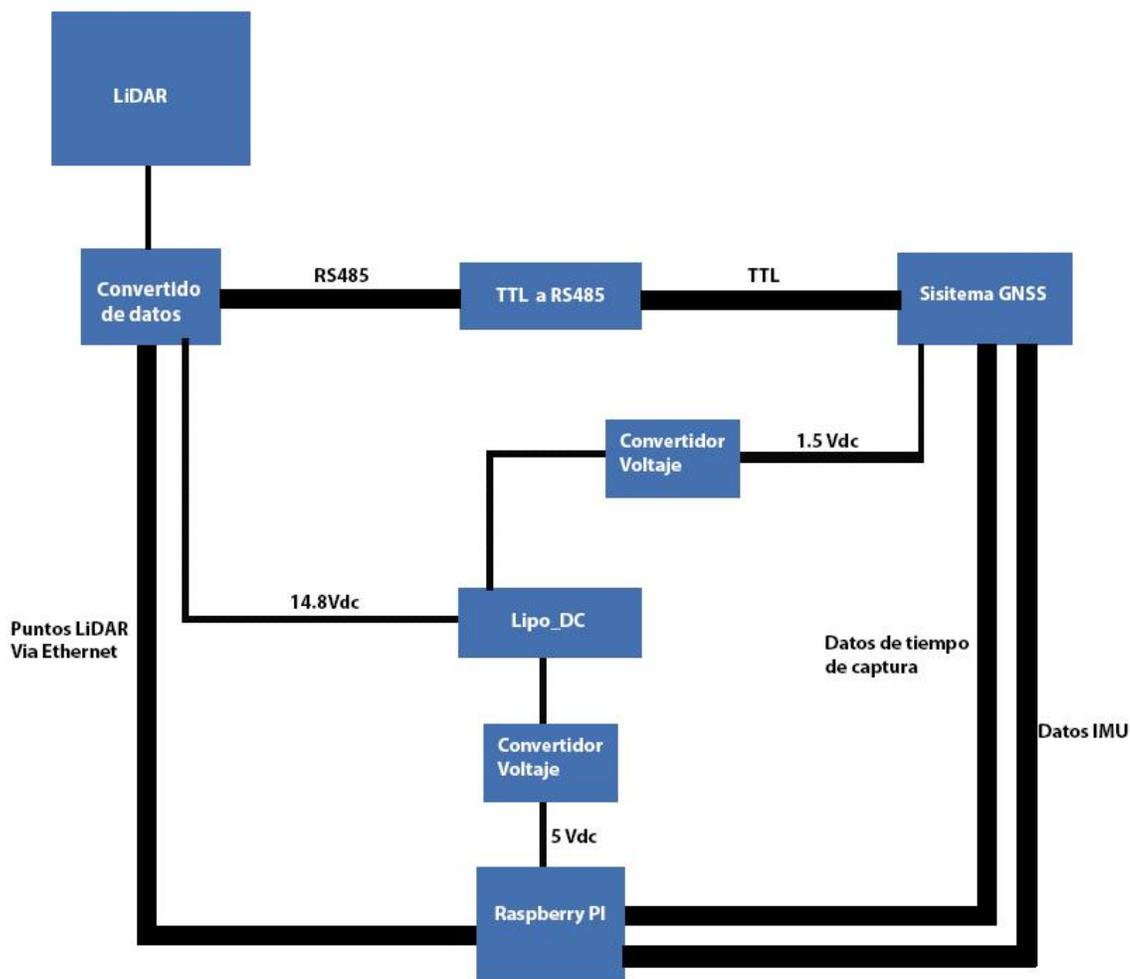
en este caso un vehículo aéreo no tripulado, esto visto en términos generales, no obstante la presente metodología basada en tecnología de bajo costo pretende mostrar el proceso de desarrollo e integración de estos elementos.

En esa medida se planeó el desarrollo en primer lugar del sistema LiDAR y en segundo lugar se concibió la plataforma en la cual fue montado, en este sentido estos dos componentes siempre estuvieron integrados ya que para el sistema aerotransportado teníamos una limitante fundamental y es la carga útil del VANT, lo cual es relevante para su autonomía y estabilidad, en ese sentido el sistema LiDAR no podía superar un peso meta, que en nuestro caso fue de 3kg (este peso incluye el sensor, el case y el sistema de montaje).

Adicionalmente los componentes utilizados fueron aquellos que representaran un menor costo en su adquisición y que nos permitieran tener un rendimiento adecuado esto con el fin de poder crear un sistema que a futuro pueda ser más fácil su adquisición o desarrollo por otros entes de investigación.

Figura 3

Esquema de la plataforma LiDAR



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Al momento de concebir la plataforma LiDAR se tuvieron en cuenta cuatro parámetros, en primer lugar el sensor para la adquisición de la nube de puntos, en segundo lugar el procesamiento y almacenamiento de la información recuperada, en tercer lugar su georreferenciación y por último su alimentación y autonomía. Como se puede ver en el esquema (Ver **Figura 3**) los datos recuperados por el sensor LiDAR son transferidos a un convertidor de datos que alimenta vía

ethernet a la computadora(Raspberry Pi), la cual contiene diferentes algoritmos y librerías que le permiten interpretar los puntos, de forma simultánea la información de ubicación y ángulo de los puntos es sincronizada con el sistema GNSS y transferido a la PI, es decir cada punto recopilado es vinculado con información georreferenciada mediante la información de tiempo de captura, dicho ajuste es enviado a la Pi para su interpretación y ajuste final de la nube de puntos.

Todo el sistema debe estar alimentado por una batería Lipo de alto rendimiento, ya que esta suministra poder a los tres componentes de captura, procesado e interpretación, como se puede ver en el esquema la Plataforma LiDAR maneja diferentes sistemas de voltaje por lo que fue necesario realizar su ajuste mediante convertidores tipo Lm2596Dc-Dc.

Finalmente, para el caso de la plataforma de vuelo se concibió un VANT tipo Hexacóptero, este no fue desarrollado por el equipo de trabajo, ya que nos centramos en la plataforma LiDAR. El VANT utilizado presenta como característica una alta capacidad de carga, un sistema de vuelo confiable y estable y por último una gestión propia de su sistema de energía, imu y ubicación GNSS. Adicionalmente se utilizó un segundo VANT con el fin de poder realizar la captura de datos RGB, mediante fotogrametría, con el objetivo de poder asignar dichos valores RGB a los puntos LiDAR.

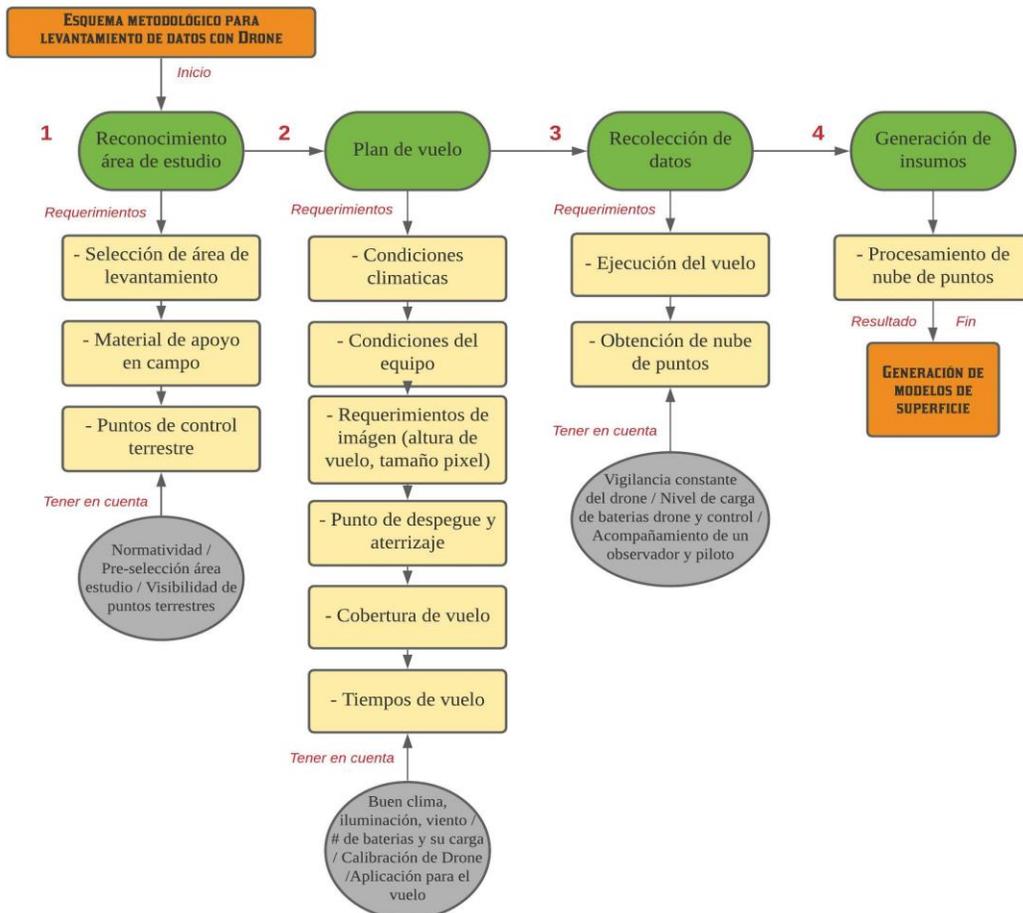
6.2 Captura y procesamiento de datos en campo

Posterior al análisis de la zona y la revisión documental, fue necesario revisar los parámetros del plan de vuelo para los datos LiDAR recolectados con VANT, teniendo en cuenta el sensor, el área de trabajo, la cantidad de datos a recolectar y la plataforma, en este caso se consideraron dos planes de vuelo, uno para la aeronave equipada con el sistema LiDAR y otro para

la aeronave equipada con sensor de cámara. El proceso de recolección de información con vehículos aéreos no tripulados (VANT) tiene una serie de pasos en el momento previo a la captura, en la recolección de datos y el procesamiento de estos, esta serie de medidas estará sujeta siempre al área de estudio, a los requerimientos de imagen del proyecto, análisis de las imágenes tomadas, fecha y equipo a utilizar en la captura y el post-procesamiento. El siguiente diagrama presenta el procedimiento metodológico para el levantamiento de información con VANT:

Figura 4

Esquema metodológico para el levantamiento de datos con VANT

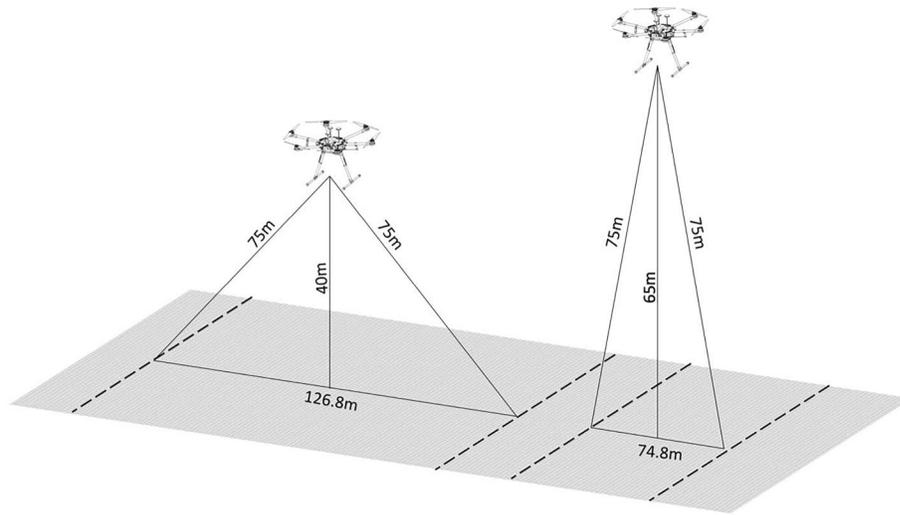


Fuente: Elaboración propia, 2021.

Por otro lado, debido a que la captura de datos está relacionada con el sistema LiDAR se tuvieron en cuenta los parámetros que pudieran dar resultados positivos en el momento de la toma, para ello se consideró que el ancho efectivo de los datos recopilados en el suelo está directamente relacionado con la altura del sensor, por lo que, a mayor altura, mayor cantidad de área cubierta pero menor resolución (Ver **Figura 5**). Adicionalmente se debió considerar el traslape entre nube de puntos cuando se efectúa un cambio en la posición de la aeronave, el cual debe ser de aproximadamente el 10% entre fotogramas o distintas capturas de datos, para garantizar una cobertura completa en el área de estudio. Por lo tanto se decidió realizar tres vuelos estacionarios, es decir volar a una altura predefinida y permanecer estático durante cierta cantidad de tiempo, debido a que el sensor LiDAR utilizado aumenta la cobertura del campo de visión a mayor tiempo de integración, los datos de los vuelos estacionarios se evidencian en el plan de vuelo.

Figura 5

Compensaciones entre el ancho de la franja liDAR y la altitud del sensor



Fuente: (Casana et al., 2021)

Se identificó el área de trabajo donde fueron efectuados los vuelos, fue necesario previamente mediante un sistema de información geográfica validar la información del área de estudio, en cuanto a extensión y forma de terreno, adicional fue necesario validar las restricciones que por norma se dan al momento de ejecutar cualquier vuelo, según la aeronáutica civil y la zona de vuelo. Esto con el fin de no intervenir en zonas prohibidas o donde en el momento del vuelo se esté generando otra maniobra que interfiera con el vuelo del VANT. En caso tal es necesario contar con los permisos de vuelo y autorizaciones correspondientes. Por otra parte, la validación de la zona de estudio es muy importante para definir el plan de vuelo pues debe ser en zonas libres de obstáculos (árboles, edificaciones, torres) por lo que la altura será un factor importante para determinar, a su vez la altura no puede superar el límite de altura permitido por la aeronáutica civil. Adicionalmente y con el objetivo de verificar y corregir los datos de ubicación se realizó la captura de datos GNSS con un receptor EMLID REACH R+ . Para el proceso de post-procesamiento con GNSS, fue necesario la identificación y posterior demarcación de los puntos de control terrestres,

los cuales se ubicaron en zonas visibles para el VANT, fueron cuidadosamente distribuidos en la zona de estudio (adentro y afuera) para que en el proceso post captura sean identificados en los datos para la georreferenciación y ajuste de coordenadas.

6.2.1 Plan de vuelo

Para llevar a cabo el plan de vuelo se diseñó una plantilla de ingreso de la información requerida, la cual fue diligenciada previo a la salida de campo, esta plantilla se diseñó con el fin de facilitar el acceso a esta información el día del vuelo, además de considerar su uso en otro tipo de investigaciones que requieran del uso de vehículos aéreos no tripulados.

Figura 6

Plantilla recolección de datos plan de vuelo

Plan de vuelo N° _____				
			Fecha:	
			Hora:	
			Lugar:	
			Piloto:	
		Temperatura	Nubosidad	
Condiciones climaticas:				
		Nombre del equipo	% Bateria UAV	% Bateria control
Condiciones del equipo:				N° Baterias
		Altura de vuelo (m)	Tamaño de pixel	
Requerimientos de imagen:				
		Latitud	Longitud	
Coordenadas despegue:				
		Latitud	Longitud	
Coordenadas aterrizaje:				
		Cobertura de vuelo:	<i>m²</i>	
		Tiempo de vuelo:	<i>minutos</i>	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.2.3 Recolección de datos

Para recolectar los datos LiDAR con VANT normalmente es necesario el uso de aplicaciones especializadas en la recolección de datos en campo, donde se plasma el plan de vuelo definido previamente, este proceso se realizó únicamente con el VANT Phantom 4 Pro, en este caso se hizo uso de la aplicación Pix4Dcapture, en esta aplicación es posible definir la trayectoria, la altura, el tiempo y el traslape necesario para obtener un producto conforme. En contra posición, debido a que los vuelos con el sistema LiDAR y el VANT Matrice 600 se realizaron en modo estacionario, se conectó la plataforma con la aplicación DJI GO, donde se ejecutó el vuelo de

forma manual. Adicional en la toma de datos se debió contar con una persona de apoyo llamada observador el cual estuvo encargado de realizar acciones de apoyo y vigilancia del VANT manteniendo el contacto visual constantemente en caso de que el piloto estuviera ejecutando la misión del vuelo y perdiera de vista el equipo. El piloto y el observador tuvieron una comunicación continua antes, durante y después del despegue de las aeronaves. Durante la captura fue necesario tener siempre control sobre el estado de las baterías del VANT y del control, pues por motivos ajenos estas pueden durar menos de lo pensado obligando al piloto a ejecutar maniobras de aterrizaje fuera del plan de vuelo. Una vez finalizada la captura de datos el piloto de VANT recolecto la información de la memoria de almacenamiento para el postproceso.

6.2.2 Post-procesamiento y generación de insumos

El proceso de post-procesamiento requirió del uso de diferentes software, el primero de ellos usado en el procesamiento de los datos resultado del sensor LiDAR, fue un software especializado de tipo fotogramétrico para el procesamiento de la información recolectada en campo, llamado CloudCompare, pues la nube de datos obtenida venia con información de posición y altura (X, Y, Z) en un sistema de referencia dado, y múltiples registros de puntos con estos atributos. Con la exportación de los datos al software es posible obtener la nube densa de puntos, la cual fue procesada mediante una reclasificación manual con el fin de obtener un modelo digital de elevación, modelos en 3d y demás capas producto del análisis. Para llevar a cabo estos procesos el software fue ejecutado en una maquina con la capacidad de memoria necesaria para ejecutar este tipo de acciones pues normalmente consumen bastante espacio en computador. El siguiente software utilizado se relaciona con el procesamiento de los datos GNSS, el cual permite la manipulación de los datos resultantes del receptor RTK Emlid REACH R+ y su posterior

corrección con datos GNSS de alta precisión obtenidos de la estación base, el software usado en este proceso se llama RTK LIB. el cual es un programa de código abierto, que permite el posicionamiento GNSS en tiempo real y en post procesamiento, y arroja como resultado las coordenadas corregidas de los puntos tomados. Por último, se hizo uso del software Agisoft Metashape para el procesamiento de las imágenes capturadas con el vehículo Phantom 4 pro, esta aplicación permite procesar imágenes capturadas por el equipo y generar diferentes datos para uso SIG.

Tabla 2

Especificaciones técnicas receptor RTK Emlid REACH R+.

Mecánico	Dimensiones	145x145x85 milímetro
	Peso	690 gramos
	Temperatura	-20°C – 65°C
Eléctrico	Autonomía	Hasta 30 horas
	Carga	MicroUSB 5 V
Posicionamiento	Estático horizontal	5 mm + 1 ppm
	Estático vertical	10 mm + 2 ppm
	Cinemático horizontal	7 mm + 1 ppm
	Cinemático vertical	14 mm + 2 ppm
Conectividad	Rango de frecuencia	868/915 MHz
	Distancia	Hasta 8 km

Datos	Almacenamiento interno	8 GB
	Registro de datos	RINEX con eventos con tasa de actualización de hasta 14 Hz
GNSS	Señal rastreada	GPS / QZSS L1, GLONASS G1, BeiDou B1, Galileo E1, SBAS
	Número de canales	72
	IMU	9DOF

Fuente: Adaptada de Emlid Ltd. (<https://emlid.com/reachrs/>)

6.3 Análisis de datos y comprobación en campo

Una vez recuperados los datos se realizó su respectivo análisis para ellos se buscó principalmente comprender la superficie topográfica de la zona de trabajo, en ese sentido el procesamiento de los datos tanto LiDAR como de los puntos de control y del vuelo con el VANT equipado con la cámara RGB se enfocó principalmente a tener una mejor documentación de la superficie del área de trabajo.

6.3.1 Datos LiDAR

Los puntos recopilados con el sistema LiDAR fueron post-procesados principalmente con el fin de eliminar los posibles errores producto del desplazamiento de ciertos elementos del paisaje como lo son las aves, peatones o incluso el polvo. Para dicha gestión se utilizó el software gratis CloudCompare, este software tiene la capacidad de realizar una gran cantidad de procesos y ajustes a las nubes de puntos adicionalmente el sistema es lo suficientemente intuitivo para que la curva de aprendizaje sea corta.

Las herramientas de análisis y gestión de los datos se centraron en dos grupos: en primer lugar, aquellas que nos permitieron realizar ajustes como la limpieza del ruido, la asignación de color y la creación de secciones. El segundo grupo consiste en las herramientas que buscan identificar cierto comportamiento de los puntos como es su clasificación por su ubicación en Z(altura), su clasificación (suelos vs vegetación) y finalmente su transformación en una capa ráster.

6.3.1.1 Ajustes iniciales

Limpieza: para el proceso de limpieza se utilizó la herramienta filtro de ruido, esta herramienta nos permite definir un radio constante para la búsqueda del vecino más cercano, cada punto es analizado en relación con un plano, en caso de que dicho punto se aleje demasiado del plano que comparte con otros puntos es eliminado.

Asignación de color: como el sensor integrado no utiliza un sistema de captura RGB y con el objetivo de tener una mejor visualización de los puntos se utilizó la herramienta de interpolación de color por otra entidad, esta herramienta analiza la similitud entre la entidad de referencia (en este caso fue el vuelo con el VANT equipado con la cámara RGB) y la entidad a asignar color, la asignación de color se da mediante la comprensión de la conexión de los componentes.

Creación de secciones: esta herramienta se utilizó para crear secciones de perfil de las áreas muestreadas, en ese sentido cada toma de datos con el LiDAR, se le realizó un corte de aproximadamente 5 metros de ancho para poder analizar las posibles variaciones en un nivel más preciso.

6.3.1.2 Herramientas de análisis

Campo Escalar: se utilizó esta herramienta para evidenciar las diferencias de las nubes de punto en relación con su valor Z, en ese sentido se buscó generar la primer división de los datos según su posición en el eje Z.

Clasificación de puntos CSF: a partir de los datos obtenidos mediante el campo escalar, se realizó la clasificación de los puntos en dos grandes entidades, los puntos asociados al suelo y los puntos asociados a la vegetación. Para ello se tuvo en cuenta tres elementos: el tamaño de la grilla, el número de iteraciones del análisis y la clasificación del umbral (Zhang et al., 2016).

Raster: Finalmente y tras la obtención del terreno se realizó la conversión de la nube de puntos en un ráster, para ello se tuvieron en cuenta elementos como la resolución, la interpolación de los datos en las zonas donde el láser no penetra, el campo escalar y la dirección en z.

Finalmente, mediante los datos obtenidos se realizó un análisis de la superficie del terreno, como lo que se quería ver es la posibilidad de identificar características como zonas de arado, cárcavas o pequeños hundimientos en el suelo que nos permitieran ver si estas zonas se están depositando los materiales producto de las transformaciones postdeposicionales se decidió realizar un análisis sistemático de la zona de estudio.

6.3.2 Comprobación en Campo

Con el objetivo de ver si las modificaciones identificadas coincidían con la presencia de materiales arqueológicos o una mayor cantidad se realizó la comprobación en campo, para ello se siguieron los métodos establecidos por Drennan (2006), en ese sentido el área se dividió en lotes

de 20 x20 metros y se realizó la inspección superficial de cada lote esto teniendo la información de la superficie del terreno obtenida con los datos LiDAR, en caso de encontrar materiales en superficie se realizó un anillo de recolección de 2.5 metros de diámetro y durante 3 minutos se recopiló la totalidad de elementos en superficie, en esa medida la totalidad de cuadrantes fueron analizados y se comparó posteriormente dichos resultados con lo arrojado por el LiDAR.

Fotografía 1

Imagen del proceso de recolección de materiales



Fuente: Elaboración propia, 2021.

7 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ejercicio investigativo, primero se presentará el desarrollo de la integración de la plataforma LiDAR y posteriormente se presentarán los datos obtenidos, su análisis y aporte en la documentación de los contextos arqueológicos.

7.1 Plataforma LiDAR V1.0

A partir del esquema planteado para el desarrollo de la plataforma LiDAR se inició su posterior desarrollo, en ese sentido se utilizó el sensor LiDAR Livox Mid-40 desarrollado por la compañía Livox Technology la cual surgió como una innovación abierta de la empresa DJI Technology, es un sensor de bajo costo pues usa componentes de fácil acceso, como elementos usados en ópticas, adicionalmente tiene un diseño eléctrico que permite su alto rendimiento en condiciones de temperatura extrema (ver **Tabla 3**).

Tabla 3

Especificaciones técnicas sensor Livox Mid-40

Rango de detección	260 metros
Campo de visión FOV	Circular 38.4°
Tasa de puntos	100.000 Ptos/seg.
Precisión de rango	2 cm
Precisión angular	0.05°

Rango de temperatura	-20°C - 65°C
Patrón de escaneo	No repetitivo
Peso	750 gramos

Fuente: Adaptada de Livox Tech (<https://www.livoxtech.com/mid-40-and-mid-100>)

Fotografía 2

Imagen detallada del sensor Livox Mid-40



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Adicionalmente se adquirió una computadora Raspberry Pi4, con 8GB de Ram y memoria microSD de 64GB, al interior de la PI se programa el sistema de análisis e interpretación de los datos, para ello se programa sobre la base de la localización y mapeo simultaneo (SLAM) el cual se configuro bajo dos algoritmos, el primero consiste en realizar odometría a una alta frecuencia, pero baja fidelidad para estimar la velocidad del LiDAR. el segundo algoritmo se ejecuta a una frecuencia de un orden de magnitud más bajo para la coincidencia fina y el registro de la nube de puntos (Zhang, Ji & Singh, 2014). La totalidad del sistema fue programado bajo la plataforma de

ROS Melodic. Adicionalmente se programa la Pi en Linux para que realizara el lanzamiento automático de cada algoritmo tan pronto es encendida. Con el fin de poder tener un control en el tiempo de lectura se programó para que la lectura tomara solo 3 minutos y posteriormente cerrara los procesos y guardar un archivo de respaldo. La integración total tanto de los lanzadores de los algoritmos como los de respaldo fue programado principalmente en Linux pero todo el paquete integrado fue realizado en Python.

Figura 7

Detalle de la programación del sistema LiDAR

```
5 from time import sleep
6
7
8 def run_livox():
9     print('Livox 1')
10    subprocess.run(['bash', '/home/ubuntu/lanzar_livox_1.sh'])
11    sleep(20)
12    print('Livox 2')
13    subprocess.run(['bash', '/home/ubuntu/lanzar_livox_2.sh'])
14
15
16 def leer_PID():
17     with open('/home/ubuntu/LIVOX_DATA/pid_livox_1.txt', 'r') as f:
18         for line in f:
19             for word in line.split():
20                 pid_livox_1 = word
21
22     with open('/home/ubuntu/LIVOX_DATA/pid_livox_2.txt', 'r') as f:
23         for line in f:
24             for word in line.split():
25                 pid_livox_2 = word
26
27     return pid_livox_1, pid_livox_2
28
29
30 def respaldar_datos():
31     subprocess.run(['bash', '/home/ubuntu/respaldo.sh'])
32
33
34 def matar_proceso(pid_livox_1, pid_livox_2):
35     subprocess.run(['kill', pid_livox_1])
36     subprocess.run(['kill', pid_livox_2])
37
38
39 def run():
40     #VEINTE_MINUTOS = 1200
41     #CINCO_MINUTOS = 300
42     sleep(10)
43     run_livox()
44     sleep(300)
45     pid_livox_1, pid_livox_2 = leer_PID()
46     matar_proceso(pid_livox_1, pid_livox_2)
47     sleep(30)
48     respaldar_datos()
49
```

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Adicionalmente y con el fin de tener los datos georreferenciados se utilizó un sistema IMU de la empresa Intertial Sense, el sistema μ INS cuenta con giroscopio, acelerómetro, barómetro, y GPS. Tanto los datos de la IMU, como los datos del LiDAR fueron sincronizados en términos de ajuste de tiempo.

Tabla 4

Especificaciones técnicas Raspberry Pi4 y IMU μ INS

Raspberry PI4	μINS
Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz	Velocidad de datos de salida IMU e INS de hasta 1 kHz
8GB LPDDR4-3200 SDRAM	Actitud (balanceo, cabeceo, guiñada, cuaterniones), velocidad y posición sincronizada con la hora UTC
2 USB 3.0 ports; 2 USB 2.0 ports	IMU redundantes duales calibradas para sesgo, factor de escala y alineación entre ejes
2 \times micro-HDMI ports	CalibrationCalibración de temperatura del sensor de -40 ° C a 85 ° C
Micro-SD card slot for loading operating system and data storage	Receptores de GPS (GNSS) u-Blox L1 integrados
Power over Ethernet (PoE) enabled (requires separate PoE HAT)	Registro de datos (SDK y software de aplicación)

Por otro lado, para integrar el sistema LiDAR con el VANT fue necesaria la creación de una estructura personalizada que permitiera el soporte de todos los elementos que componen el sistema sin interferir en la toma de datos y en el vuelo. La estructura se creó a partir de las dimensiones completas del sistema, estimando el peso y la posición en el centro de masas de la aeronave desarrollado en esta primera fase (este sistema aún es un prototipo, actualmente se está modelando un Gimbal para mejorar el sistema de posicionamiento).

Fotografía 3

Case de integración del sistema

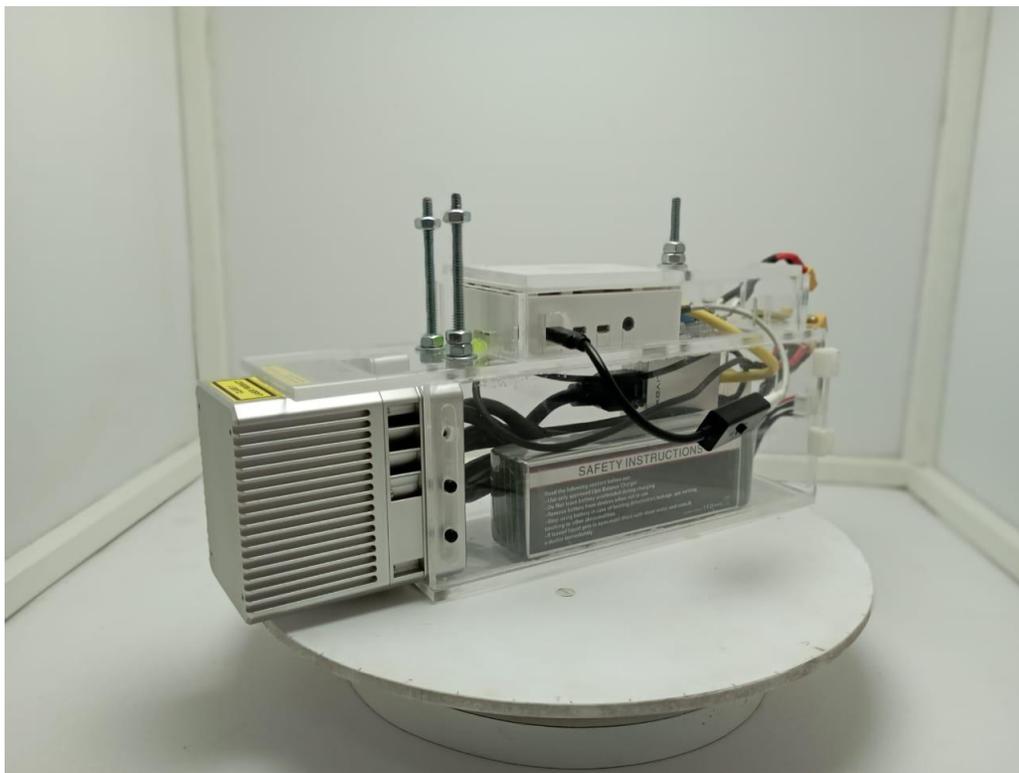


Fuente: Elaboración propia, 2021.

Todo el sistema es alimentado por una batería Lipo de 14.8v y 6000 mAh, el sistema cuenta con conexiones de energía tipo XT60 para una mejor conexión. Adicionalmente se desarrolló una base inicial para el montaje del VANT y el LiDAR por lo que se modelaron los soportes y se imprimieron en una impresora Pegasus Lite 3D a una resolución de 0.6 micras, en total el sistema alcanza un peso de 2.6 kg

Fotografía 4

Montaje del sistema LiDAR



Fuente: Elaboración propia, 2021.

7.1.1 VANT

Como se mencionó uno de los elementos claves del sistema LiDAR aerotransportado es la plataforma, la cual debido a la carga del sistema es necesario que sea robusta para evitar problemas en el vuelo, en este caso la plataforma fue el hexacóptero DJI Matrice 600, el cual es uno de los vehículos aéreos mas grandes vendidos por la empresa DJI Technology, este vehículo es capaz de

tener una carga útil de 6 kilogramos y autonomía de vuelo de 15 minutos con la carga en un vuelo estacionario, este tiempo mejora si el peso disminuye. No obstante, el vehículo presenta una serie de dificultades, como la falta de sensores para la detección de obstáculos y que los tiempos de vuelo son máximo de 15 o 20 minutos dependiendo el peso del sistema, pues el VANT por si solo pesa 9,1 kilogramos debido a que cuenta con 6 baterías, 6 hélices, 6 brazos del bastidor y 1 soporte de GPS desplegados. En la tabla 3. Se muestran las especificaciones técnicas del vehículo.

Tabla 5

Especificaciones técnicas aeronave Matrice 600

Estructura	Distancia entre ejes	1133 milímetros
	Dimensiones de la aeronave	1668 mm x 1518 mm x 759 mm (hélices, brazos del bastidor y soporte de GPS desplegados)
	Peso (con seis baterías TB47S)	9,1 kilogramos
Rendimiento	Precisión de vuelo estacionario	Vertical: $\pm 0,5$ m, Horizontal: $\pm 1,5$ m
	Máxima velocidad	18 m / s (sin viento)
	Tiempo de vuelo estacionario (con seis baterías TB47S)	Sin carga útil: 35 min, carga útil de 6 kg: 16 min
Batería	Modelo	TB47S
	Voltaje	22,2 V
	Peso	595 gramos
	Cantidad	seis

Fuente: Adaptada de DJI Technology (<https://www.dji.com/matrice600>)

Fotografía 5

VANT DJI M 600 con sistema LiDAR



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Para obtener datos en el reconocimiento del área de estudio y otros insumos para el post-procesamiento de los datos LiDAR, se hizo uso de un VANT Phantom 4-Pro2, también desarrollado por la empresa DJI Technology, el cual cuenta con un sensor de cámara que permite tener 1 pulgada de pixeles efectivos además de ser una de las mejores opciones del mercado para este tipo de proyectos pues es un VANT de nivel profesional que es accesible para diferentes personas. Además, cuenta con cinco sensores para la detección de obstáculos y tiene una autonomía de 30 minutos de vuelo en condiciones óptimas.

7.2 Captura de datos

La captura de los datos fue realizada en octubre de 2021 en un área de la granja de la Universidad del Magdalena, seleccionando el lugar de acuerdo a las características del paisaje que permitían despegar y aterrizar los VANT sin dificultades, debido a que en la zona no hay ninguna estructura, ni está cerca a áreas restringidas, por otro lado en esta zona se adelanta el proceso de reconocimiento arqueológico por parte del grupo de investigación de arqueología de la Universidad del Magdalena, por lo que fue ideal para realizar los sobrevuelos.

Como primera medida se posicionaron los puntos de control terrestres para el ajuste de coordenadas en postproceso de la zona de estudio, teniendo en cuenta que la cantidad de puntos de control puede mejorar de forma significativa el ajuste del modelo, se definieron un total de 6 puntos de control, donde el tiempo de captura de datos con el receptor RTK Emlid REACH R+, fue distribuido de la siguiente manera, 3 puntos fueron tomados durante un tiempo de una hora, los cuales correspondían a las diagonales de la nube de puntos y los siguientes 3 se tomaron en un tiempo estimado de media hora. La ubicación de los puntos de control fue en zonas visibles para que el sistema LiDAR los pudiera reconocer, este proceso se llevó a cabo en dos días debido a la cantidad de tiempo que lleva tomar los datos, dando como resultado en total 6 archivos en formato RINEX 2.11, con la coordenada del punto en un tiempo de cuatro horas y media. Para este procedimiento se realizó un montaje con un trípode correctamente nivelado sobre cada punto de control teniendo como línea base una plomada.

Fotografía 6

Montaje del receptor RTK Emlid Reach R+



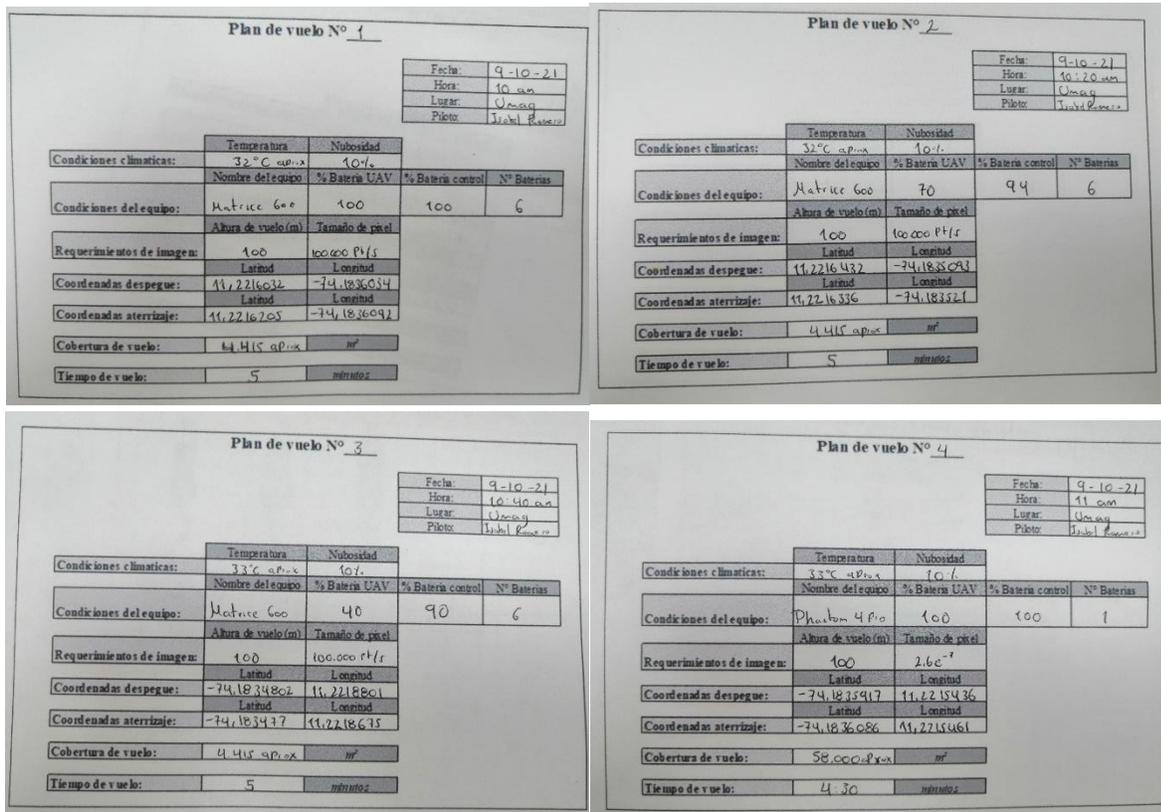
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Paralelo a este proceso se realizaron tres vuelos estacionarios con el sistema LiDAR, cada uno de ellos a una altura de 100 metros y con un tiempo estimado de seis minutos, donde el primer minuto se usó para llevar el VANT desde el punto de despegue hasta la posición de 90° sobre el objetivo, posteriormente la aeronave se mantuvo en vuelo estacionario por cuatro minutos debido a la configuración del LiDAR para que usara este tiempo de captura de datos y el último minuto de retorno de la aeronave a la zona de aterrizaje, el vuelo fue ejecutado de forma manual. Una vez la aeronave retornara se debió esperar alrededor de 10 minutos antes de seguir con la siguiente toma, pues este es el tiempo que le toma al sistema LiDAR en reconocer y alojar los datos en la

Raspberry Pi. Adicionalmente por cada vuelo se diligencio la ficha del plan de vuelo, esto con el objetivo de evitar algún tipo de accidente (Ver **Figura 8**).

Figura 8

Planes de vuelo VANT Matrice 600 y VANT Phantom 4 pro



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como resultado se obtuvieron una serie de archivos en relación con cada toma de datos, los cuales corresponden a tres archivos de nube de puntos, el primero de ellos es la nube de puntos total, el segundo es la nube de puntos denominada Surf la cual contiene únicamente datos de superficie y la tercera es la nube de puntos Corner, la cual contiene los puntos que delimitan las

estructuras. Para el procesamiento se trabajó la nube de puntos total de cada uno de los vuelos estacionarios.

Fotografía 7

Vuelo realizado con VANT Matrice 600 y sistema LiDAR



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Adicionalmente se realizó el vuelo con el VANT Phantom 4 pro, con el fin de extraer las imágenes y realizar el proceso de fotogrametría para obtener la ortofoto de la zona y poder asignar los valores RGB a la nube de puntos LiDAR. Este procedimiento se realizó con ayuda del software

Pix4Dcapture, donde se configuraron los parámetros para realizar el vuelo de forma automática. En la siguiente figura (Ver **Figura 9**) se muestra el resultado de la configuración del vuelo en el aplicativo.

Figura 9

Configuración aplicativo Pix4Dcapture vuelo VANT Phantom 4 pro



Fuente: Elaboración propia, 2021.

7.3 Post-procesamiento / análisis de datos

A continuación, se abordaron los diferentes datos obtenidos en la fase de captura de información, los cuales se muestran en orden de procesamiento. El primer grupo de datos trabajado fue el obtenido con el receptor GNSS, como ya se mencionó se descargaron del equipo los archivos UBX que corresponden a las observaciones realizadas en modo estático de cada uno de los seis puntos armados. Paralelamente se descargaron de la página del Instituto Geográfico Agustín Codazzi los archivos de la antena SAMA en formato RINEX de los días de la captura de los datos,

también se verificó la información de la antena en la página SIRGAS, con el fin de comprobar las coordenadas en X, Y y Z de la estación. El procesamiento de los datos se llevó a cabo en el software libre RTK LIB donde se corrigieron cada una de las posiciones del receptor, obteniendo resultados con un error aproximado de 0.003 metros en horizontal y 0.004 en vertical, en las siguientes tablas (Ver **Tabla 6** y Fuente: Elaboración propia, 2021).

Tabla 7) se muestra el listado de las seis coordenadas corregidas en post-procesamiento.

Tabla 6

Datos del ajuste de los puntos GPS

GPS Obs Quality					
Name	dN (m)	dE (m)	dHt (m)	Horz RMS (m)	Vert RMS (m)
SAMA-Uno	-404,650	419,384	-9,253	0,004	0,008
SAMA-Dos	-448.539	400.092	-9.839	0.005	0.009
SAMA-Tres	-410.245	402.892	-9.571	0.005	0.009
SAMA-Cuatro	-429.532	396.958	-9.962	0.005	0.012
SAMA-Cinco	-398.802	390.485	-9.635	0.002	0.005
SAMA-Seis	-374.227	393.654	-9.592	0.001	0.003

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 7

Coordenadas resultantes para cada punto

Adjusted Point Quality

Name	Latitude	Longitude	Ell.Height (m)	Code
Uno	11°13'17,69006"N	74°10'59,74024"W	14,572	1
Dos	11°13'16,30306"N	74°11'00,34978"W	13.921	2
Tres	11°13'17,54664"N	74°11'00,26369"W	15.102	3
Cuatro	11°13'16,91894"N	74°11'00,45930"W	14.711	4
Cinco	11°13'17,91902"N	74°11'00,66075"W	14.474	5
Seis	11°13'18,71879"N	74°11'00,55629"W	14.516	6

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El siguiente paso consistió en trabajar las imágenes obtenidas con la cámara del VANT Phantom 4 pro, el procesamiento se llevó a cabo en el software Agisoft Metashape. En el vuelo realizado a una altura de 100 metros, durante 4 minutos y medio se recogieron un total de 37 imágenes, se cubrió un área de 0.0602 km² y se obtuvo una resolución de 2.85 cm/pix. En el software se orientaron las imágenes y se realizó el proceso de georreferenciación usando como referencia los puntos de control terrestre previamente armados y corregidos. Posteriormente se generó la nube densa de puntos y mapas de profundidad con parámetros de precisión y calidad alta, la nube densa de puntos se compuso por 8'844.508 puntos. Con este insumo se generó la superficie del modelo digital de elevación y por último la ortofoto en color RGB de la zona de estudio de dimensiones 10,594 x 10,578, en el sistema de coordenadas WGS 84 (EPSG::4326).

Figura 10

Ortofoto de la zona de estudio



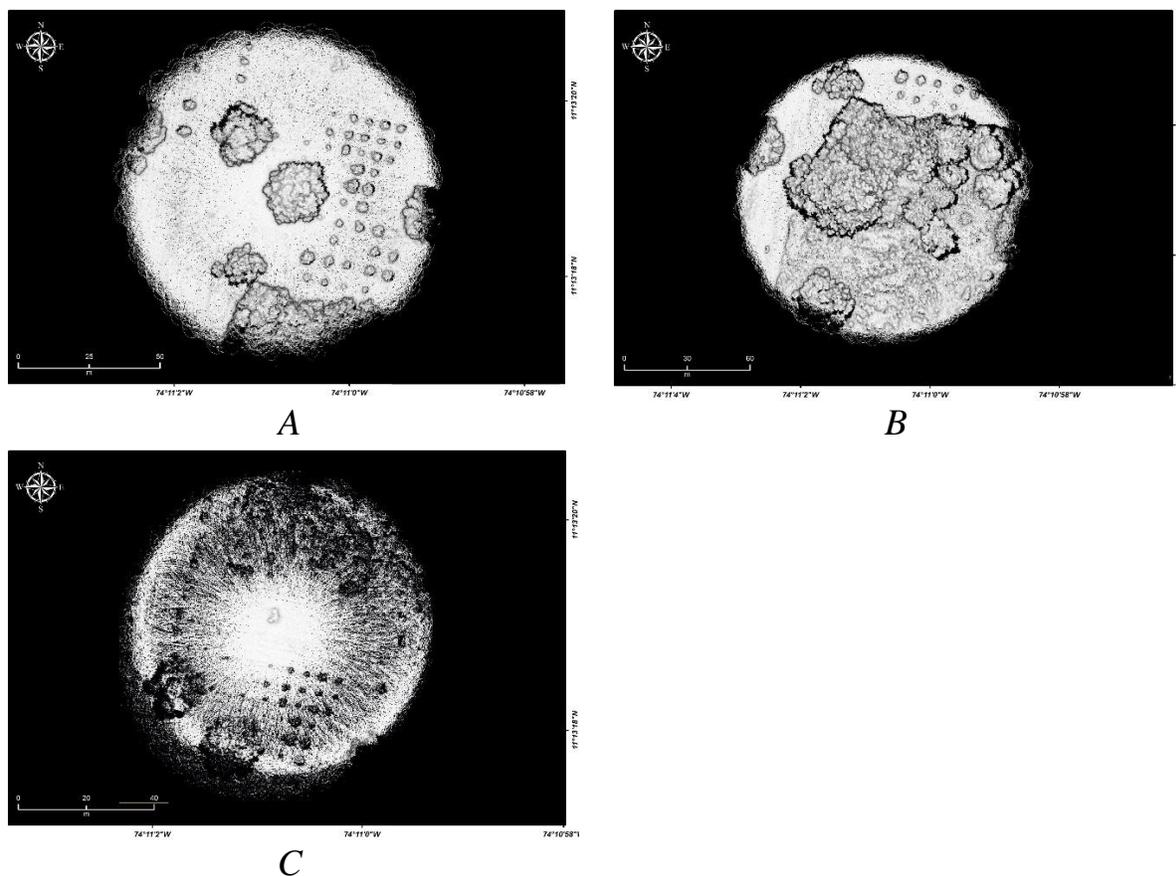
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Posteriormente se abordó el siguiente grupo de datos, el cual corresponde al sistema LiDAR, tal como se mencionó previamente se usó el archivo de nube de puntos completo de cada una de las tomas realizada. Para el procesamiento se uso el software CloudCompare, donde se realizó el montaje de los archivos individuales, arrojando como resultado tres nubes de puntos diferentes, allí se pudo evidenciar el tamaño de la nube de puntos el cual fue de aproximadamente 75 metros de diámetro para cada una, a su vez se pudo comprobar el traslape entre tomas de puntos, el cual supero el 10 %, ideal para realizar la unión de estos datos.

La primera toma de datos arrojó un total de 5'400.000 puntos, esta se ajustó de acuerdo con la herramienta Noise Filter, debido a que en la toma pueden quedar puntos aislados de la nube de puntos, al ejecutar esta herramienta se ajusta localmente el plano eliminando los puntos que están demasiado lejos de este. El ajuste lo realiza usando el vecino más cercano de acuerdo con un radio de búsqueda, como resultado se eliminan los puntos más aislados. Para la toma uno, después del ajuste, el número de puntos cambió a 5'155.478, eliminando el 4,5 % de la nube de puntos total. La segunda y tercera toma arrojaron una nube de puntos total de 4'790.000 y 4'750.000 respectivamente, posterior al proceso de limpieza o filtro de ruido, los valores quedaron para cada una en 3'157.927 y 2'153.366. Eliminando así para la toma dos el 34,07% de los datos iniciales y para la tercera toma el 54,66 %. Con estos resultados se evidencia que la toma tres tenía particularmente gran cantidad de ruido, estos datos anómalos se pueden dar por diferentes factores, tanto climáticos como del paisaje, en nuestro caso, la zona al momento de vuelo tenía gran cantidad de libélulas y algunos pájaros pudiendo provocar el ruido en la nube de puntos.

Figura 11

A) Nube densa de puntos Toma 1. B) Nube densa de puntos Toma 2. C) Nube densa de puntos Toma3.

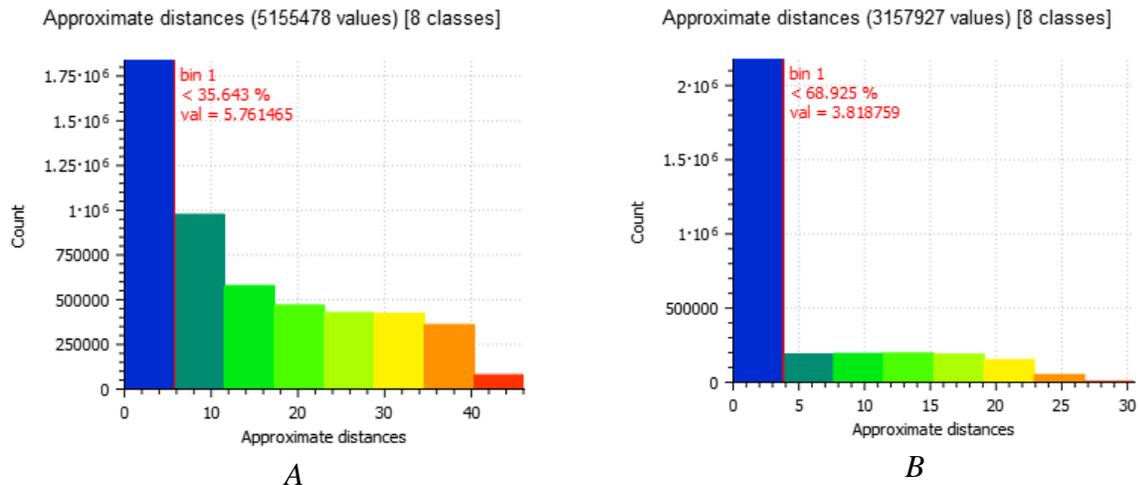


Fuente: Elaboración propia, 2021.

Luego del proceso de limpieza del ruido de los datos, se comprobó el traslape entre las tomas realizadas, para esto se usó la herramienta Distance Computation, donde se estima la distancia entre las nubes de puntos y se calcula el porcentaje de área compartida. Como resultado se obtiene un histograma del área compartida. Para la Toma 1 y la Toma 2, el área de traslape fue de 35,643 %, y para la Toma 2 y la Toma 3, el porcentaje de traslape es de 68,925 % superando el mínimo valor requerido de 10% de traslape entre fotografías.

Figura 12

A) Área compartida Toma 1 y Toma 2. B) Área compartida Toma 2 y Toma 3.

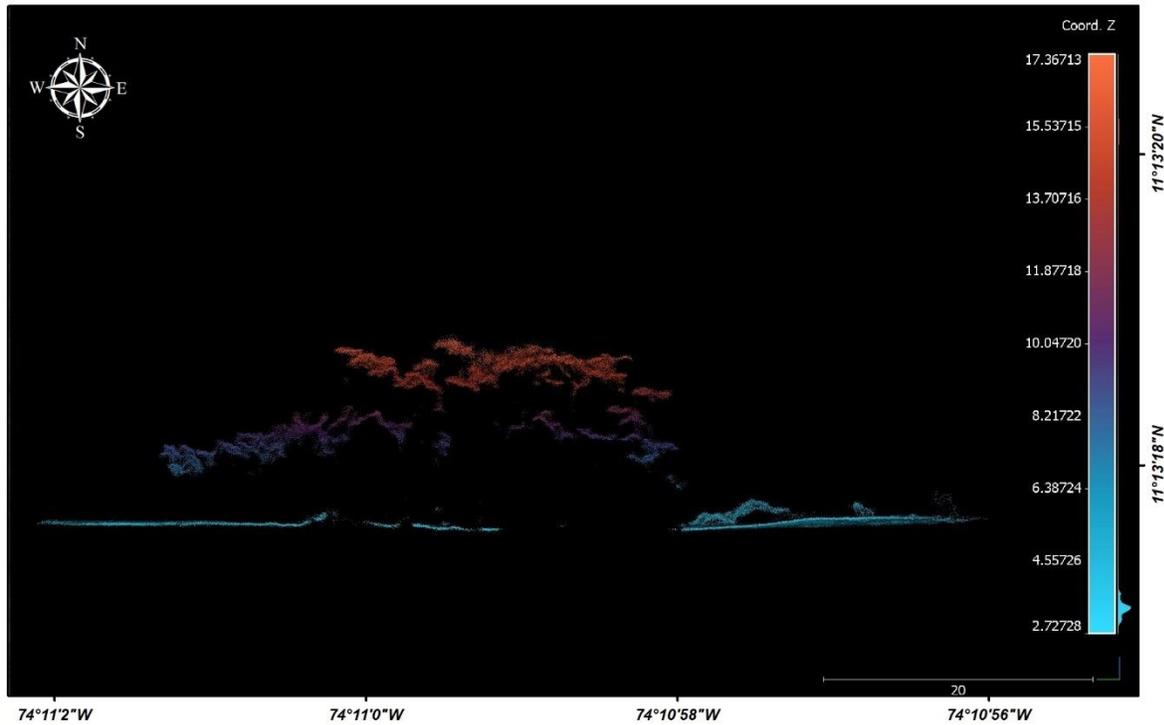


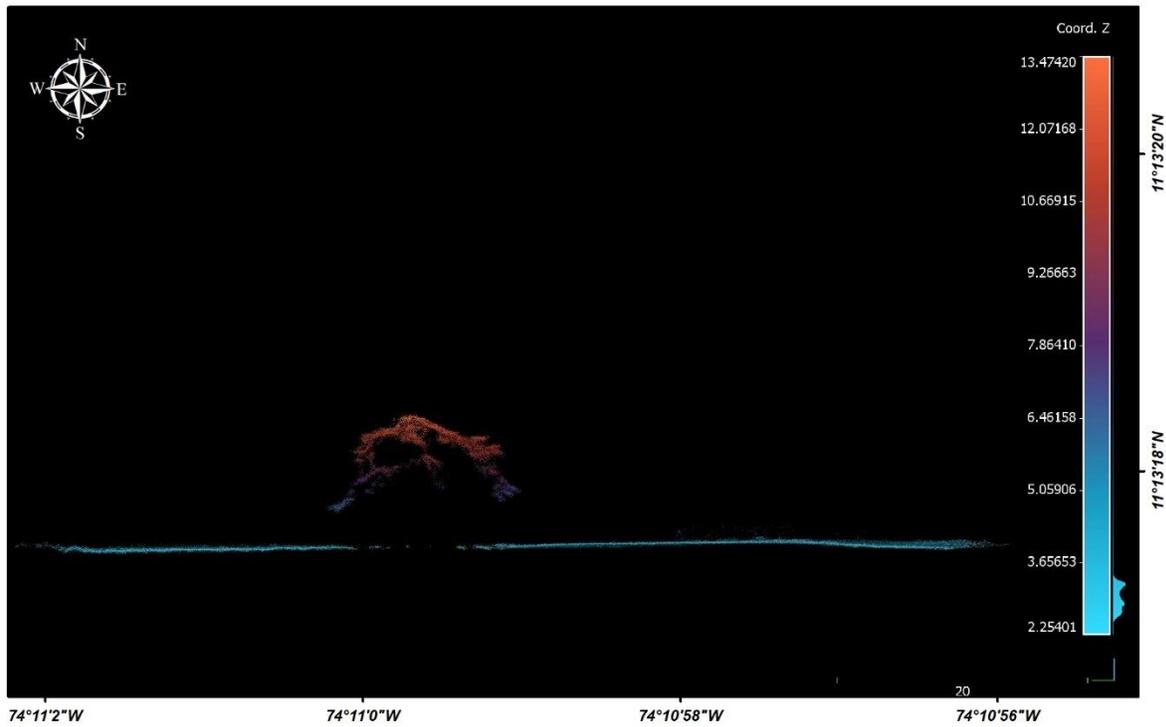
Fuente: Elaboración propia, 2021.

El siguiente paso consistió en analizar el valor de altura o Z para las tres tomas, para ello se aplicó la herramienta Scalar Field o Campo Escalar, con el fin de segmentar la nube de puntos en relación con un valor Z, es decir que se muestran los valores de altura de cada punto asociado a una rampa de color. Para ello se hizo una selección de una franja de cada toma en sentido nort-sur, donde el tamaño de cada sección quedó con dimensiones de 5 metros de ancho y 75 metros de largo aproximadamente. Como resultado se obtuvo tres perfiles donde se evidencia no solo las alturas sino la acumulación de los datos en torno a una altura específica, en las tres secciones se puede observar que los datos se acumulan en alturas bajas entre 2 y 3 metros, mostrando que la zona de estudio está en su mayoría comprendida por vegetación baja.

Figura 13

A) Perfil sección Toma 1. B) Perfil sección Toma 2. C) Perfil sección Toma3.





Fuente: Elaboración propia, 2021.

Una vez comprobado el traslape y hecha la revisión de las alturas por perfil de cada nube de puntos, se realizó la unión de las tres tomas, mediante la herramienta Merge, la cual fusiona las tres nubes de puntos, para ejecutar este paso se hizo una copia de los datos individuales para tener un respaldo de los datos.

Figura 14

Nube de puntos completa



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Posteriormente se realizó la revisión de los puntos de control tomados con el receptor RTK Emlid, con el fin de comprobar la posición de la nube puntos. Como resultado se obtuvo que efectivamente los datos tomados en campo y corregidos en post-proceso, coinciden con el geoposicionamiento de la nube de puntos completa.

Figura 15

Verificación puntos de control



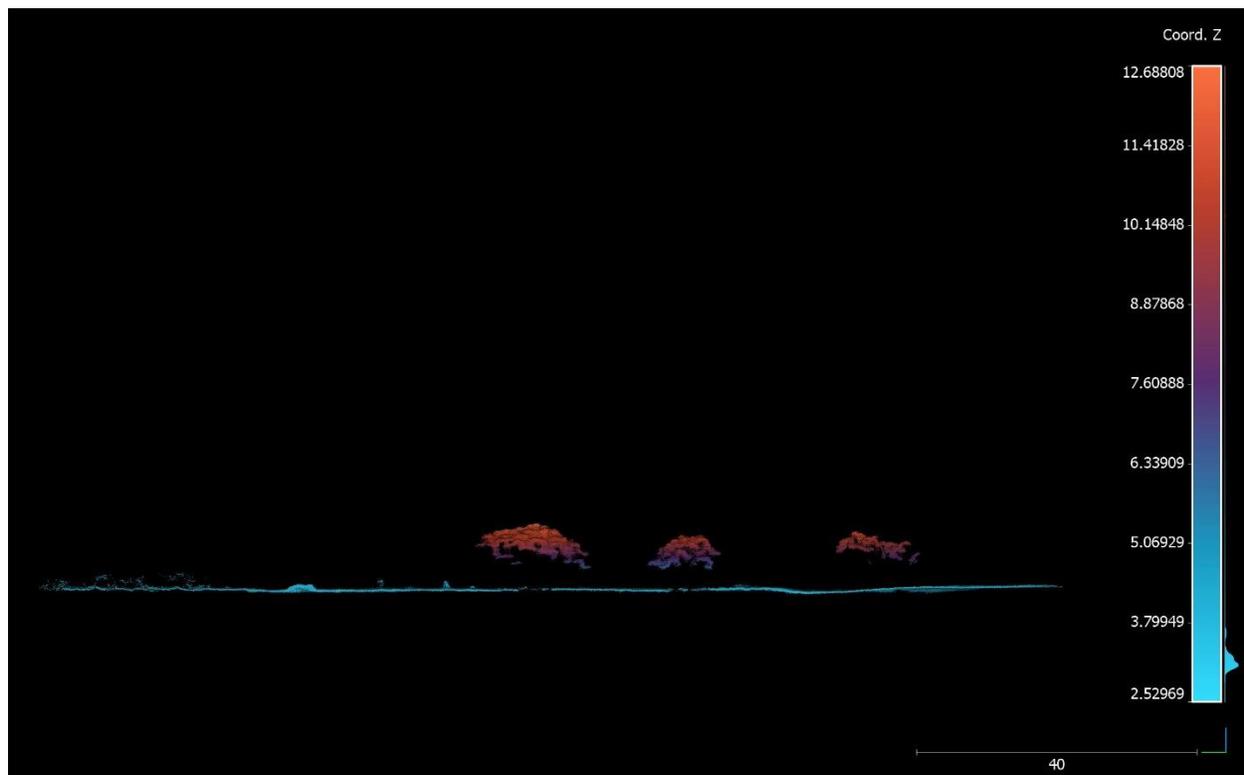
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Adicionalmente se ejecutó el proceso de Scalar Field sobre la nube densa de puntos completa, con el fin de revisar las alturas y la acumulación de los valores. cómo se puede evidenciar el rango de valores de altura de la nube de puntos esta entre 2,52969 y 12,68808 metros, y que la mayor acumulación de los valores de cada punto esta entre el valor inferior y 3,79949 metros de altura (Ver **Figura 16**), lo cual indica que los datos obtenidos en su mayoría

corresponden a objetos con esta altura, pudiendo significar vegetación baja u otro tipo de estructura. En nuestro caso la zona no contaba con objetos asociados a edificaciones, por lo que podríamos decir que estas alturas están asociadas a vegetación baja.

Figura 16

Perfil sección de la nube de puntos completa



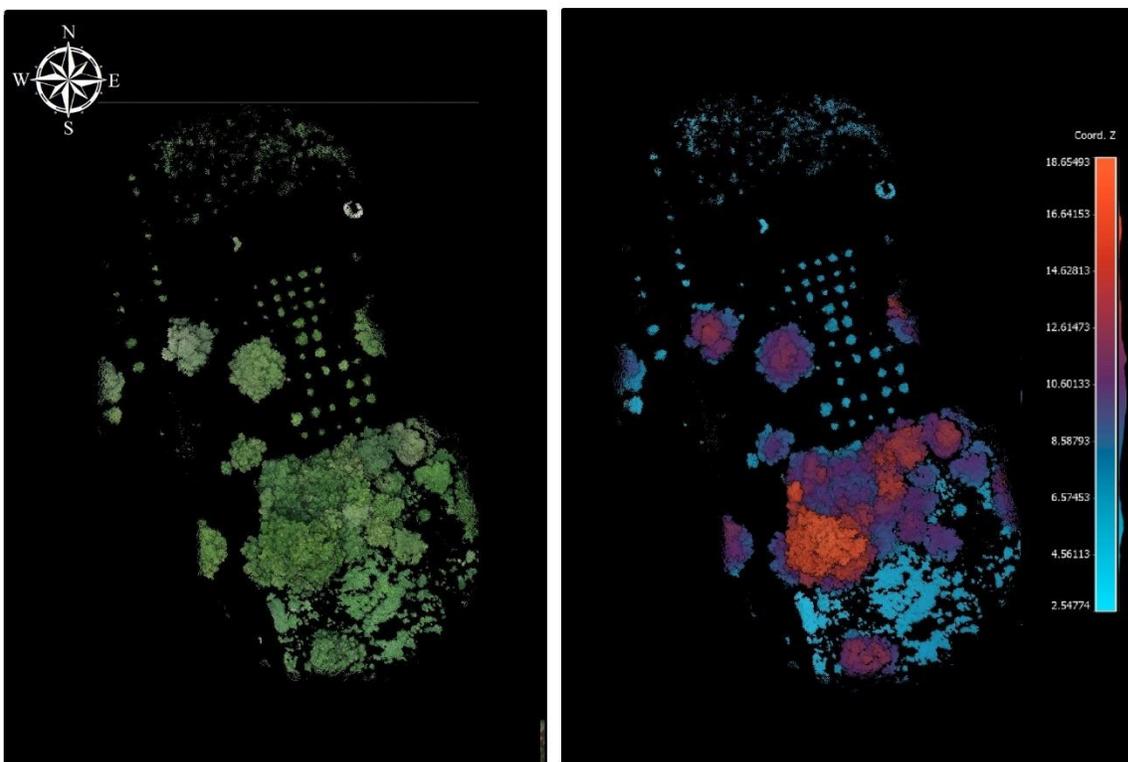
Fuente: Elaboración propia, 2021.

No obstante, es necesario comprobar que los datos que se están analizando corresponden efectivamente a vegetación, para ello el siguiente paso consistió en la clasificación de la nube de

puntos, este proceso se realizó mediante el plugin Cloth Simulation Filter (CSF), el cual separa los puntos en mediciones terrestres y no terrestres. Entre los parámetros de entrada se seleccionó como escena Relieve y resolución de puntos de 0.5. Como resultado se obtiene la separación de la nube de puntos en dos diferentes superficies, la primera de ellas una superficie de suelo y la segunda una superficie de vegetación, lo que permite analizar no solo la altura de los datos obtenidos sino obtener un modelo de suelo, que sirve como base para generar el modelo digital de elevación.

Figura 17

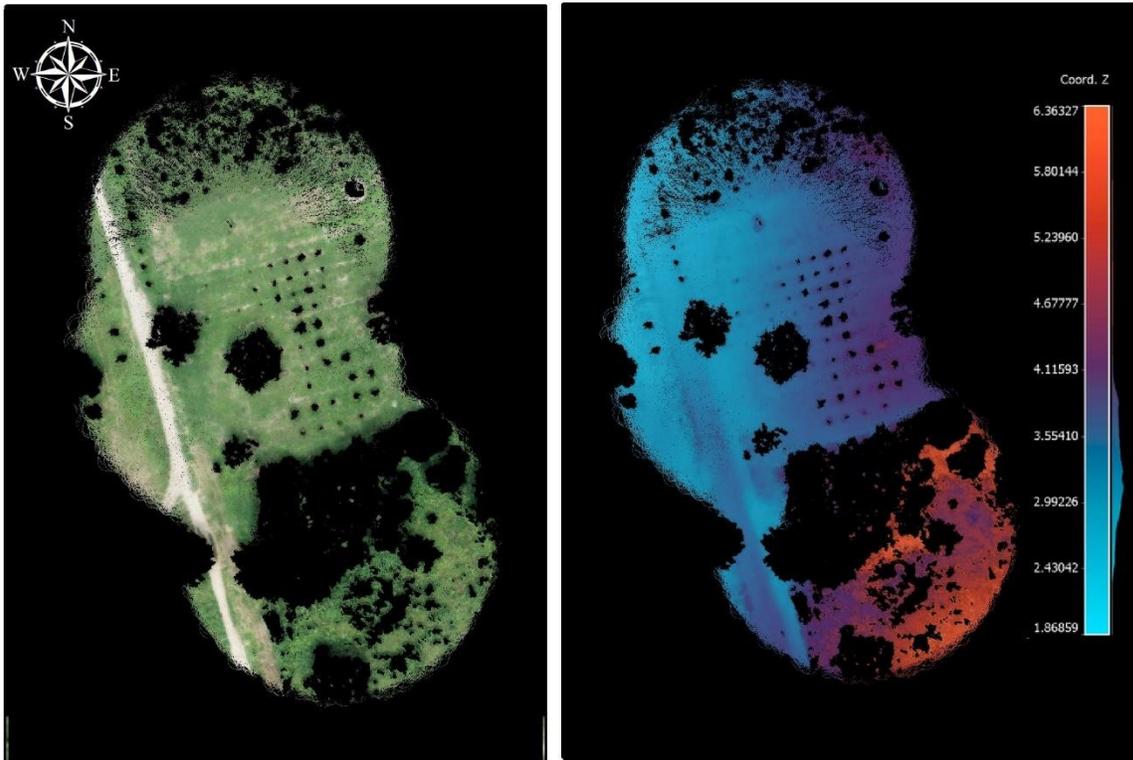
Clasificación de la vegetación en RGB y rampa de altura



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 18

Clasificación del suelo en RGB y rampa de altura



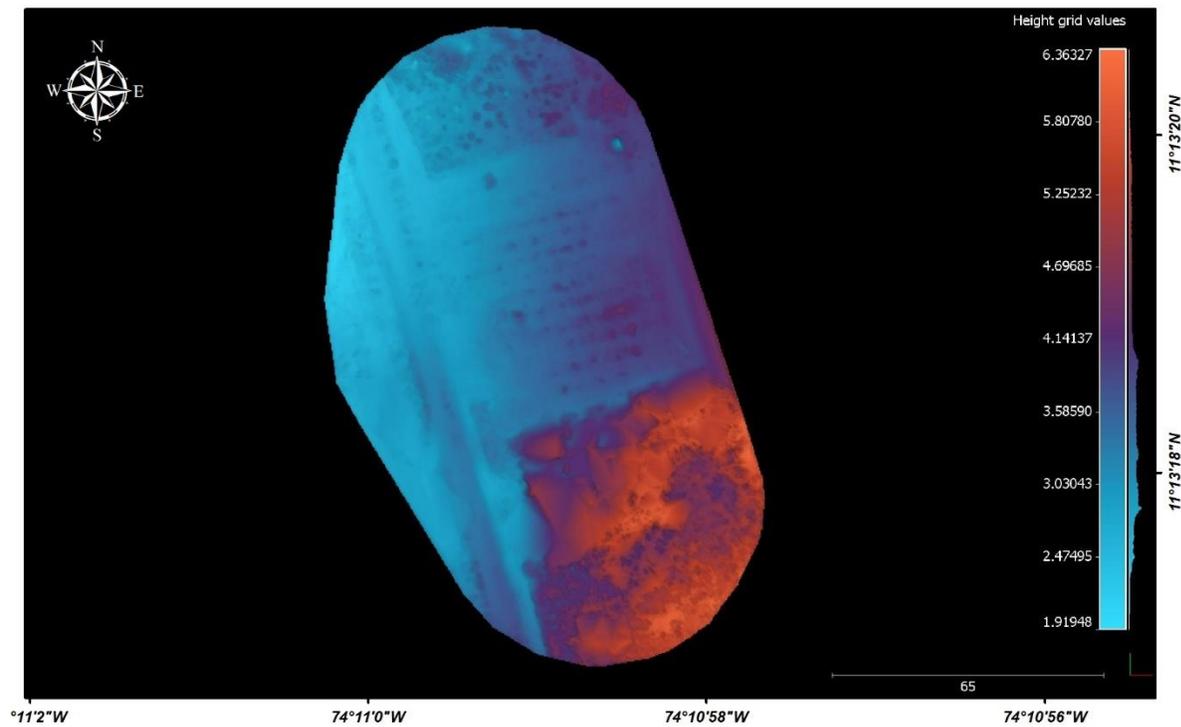
Fuente: Elaboración propia, 2021.

El siguiente paso consistió en la generación del modelo digital de elevación a partir de la superficie obtenida de la clasificación de la nube de puntos en suelo, con el fin de visualizar las variaciones del terreno y poder evaluar la posibilidad de tener relación con hallazgos arqueológicos. Para ello se usó la herramienta Rasterize, donde se modificaron parámetros principales como el tamaño de cuadrícula de 0.5, se seleccionó la dirección de la proyección el valor Z y se tomó como altura, la altura promedio de los valores de los puntos, al igual que la selección de exportación de los datos que también fue el promedio de los valores. Como resultado

se obtuvo el modelo digital de elevación del área de estudio, el cual tiene un rango que va desde una altura de 1,92 metros a 6,36 metros.

Figura 19

Modelo digital de elevación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Luego con el resultado obtenido de la fotogrametría (VANT Phantom 4 Pro2), se cargó la nube densa de puntos de este proceso (8'0844.508 puntos) en el entorno de la aplicación Cloud Compare con el fin de darle un valor RGB real a los datos LiDAR. Se ejecuto esta técnica en la nube de puntos completa y en la clasificación de la superficie de vegetación para comprobar la fiabilidad de los datos en esta cobertura.

Figura 20

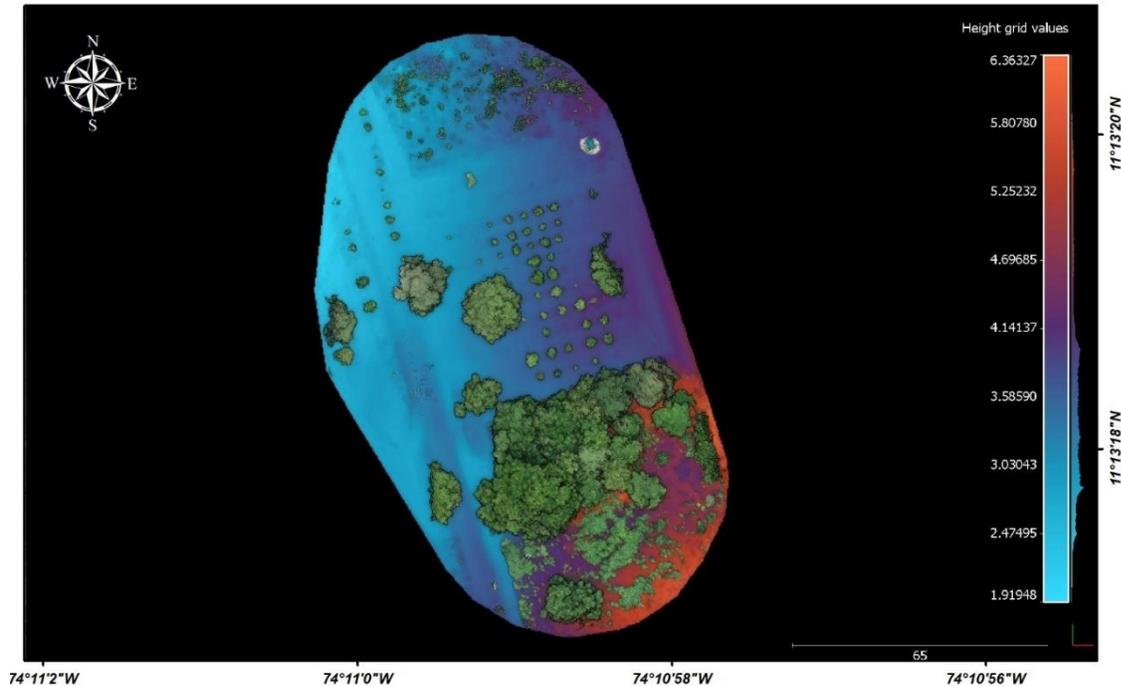
Nube de puntos completa con asignación de colores RGB



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 21

Modelo digital de elevación con superficie de vegetación RGB



Fuente: Elaboración propia, 2021.

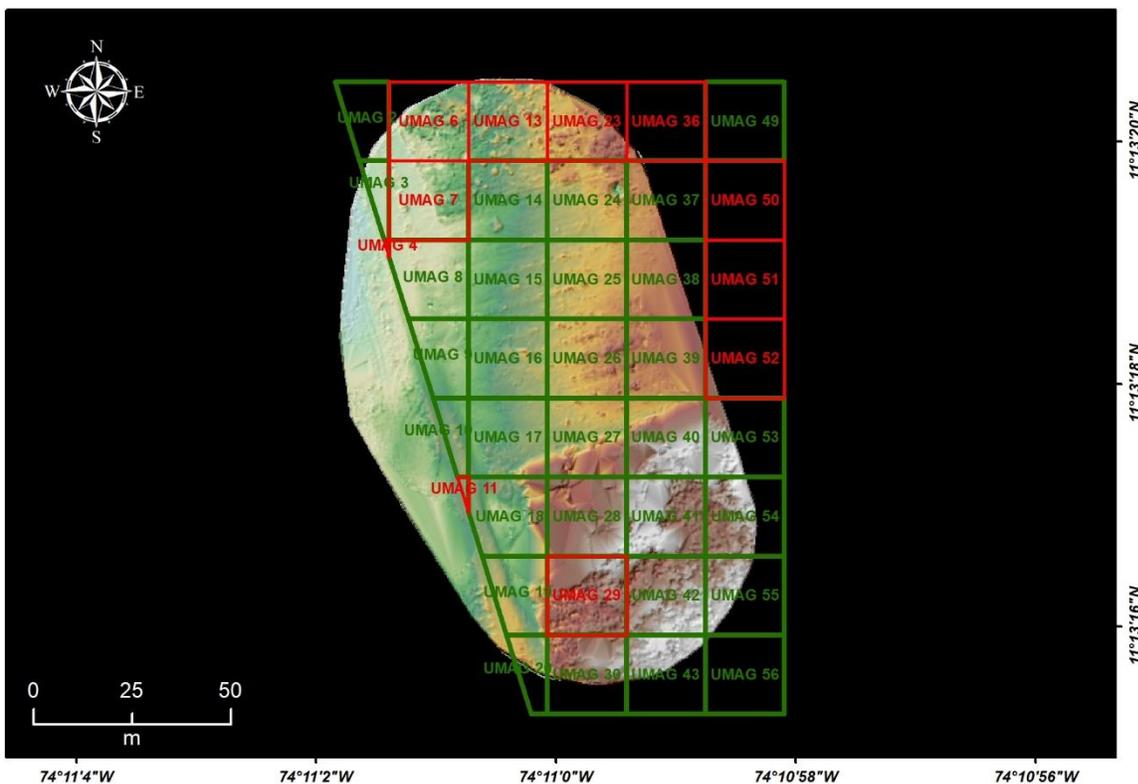
7.4 Reconocimiento arqueológico

La última etapa del proceso consistió en realizar un reconocimiento mediante la técnica arqueológica de recolección superficial, que como ya se mencionó, es un método no destructivo el cual es llevado a cabo mediante recolección de material asociado a hallazgos arqueológicos que se encuentren en la superficie del suelo. Para este proceso se tomó como base una cuadrícula de reconocimiento del proceso de diagnóstico y prospección, con el apoyo del grupo de investigación de arqueología de la universidad del Magdalena, se realizó el reconocimiento en campo. Como se puede evidenciar en la figura a continuación (Ver **Figura 22**) en la zona de estudio se localizan 41

cuadrículas de un tamaño de 20 x 20, de las cuales 30 arrojan resultados positivos, evidenciando la presencia de material en la zona de estudio.

Figura 22

Resultado del reconocimiento arqueológico en el área de estudio (las cuadrículas verdes indican positivo para material arqueológico)



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Adicionalmente como parte del ejercicio de reconocimiento se recolectaron los materiales asociados a los contextos arqueológicos identificados, con el fin de estimar la cantidad de material asociado a las diferentes cuadrículas, este dato fue fundamental para evaluar la relación del paisaje con los hallazgos arqueológicos, como se puede observar en la **Fotografía 8** en el área de análisis

se logró recuperar una relevante cantidad de materiales arqueológicos, que posiblemente están asociados a la cultura Tayrona. A su vez en la **Tabla 8**. se muestra la cantidad de material encontrada por todo el grupo de investigación en las diferentes cuadrículas.

Fotografía 8

Material arqueológico encontrado asociado a las cuadrículas 18, 19, 20 y 40.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 8

Cantidad de material arqueológico asociado a las cuadrículas.

ID_Lote	Cantidad N°	ID_Lote	Cantidad N°	ID_Lote	Cantidad N°
UMAG 2	5	UMAG 19	4	UMAG 39	1
UMAG 3	4	UMAG 20	6	UMAG 40	7
UMAG 8	1	UMAG 24	4	UMAG 41	5
UMAG 9	6	UMAG 25	5	UMAG 42	2
UMAG 10	31	UMAG 26	2	UMAG 43	6
UMAG 14	12	UMAG 27	1	UMAG 49	5
UMAG 15	5	UMAG 28	2	UMAG 53	2
UMAG 16	4	UMAG 30	1	UMAG 54	2
UMAG 17	5	UMAG 37	9	UMAG 55	4
UMAG 18	4	UMAG 38	3	UMAG 56	3

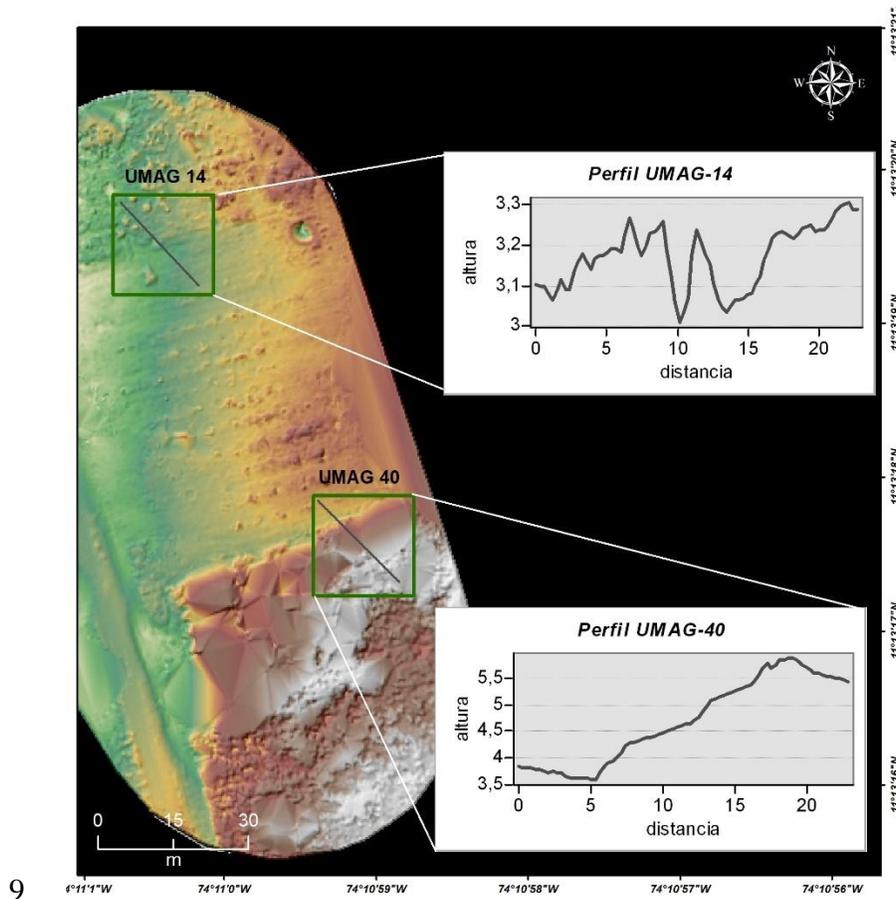
Fuente: Elaboración propia, 2021.

8 Discusión de resultados

Una vez obtenida la cantidad de material encontrado, se analizó el resultado del modelo digital de elevación con estos datos, puntualmente se analizó el modelo de las cuadrículas UMAG-14 y UMAG-40, debido a que en estas zonas se encontró gran cantidad de material y además están totalmente contenidas en el área de estudio.

Figura 23

Perfiles cuadrícula UMAG 14 y UMAG 40



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como parte de los resultados se generaron los perfiles asociados a la cuadrícula UMAG 14 y UMAG 40. Dichos perfiles muestran una serie de puntos donde la altura disminuye, este resultado indica una relación entre la mayor acumulación de material en superficie con los puntos más bajos del modelo digital de elevación, a pesar de ser unos datos iniciales creemos que es posible que la presencia de materiales en esa densidad en superficie es producto principalmente de los procesos postdeposicionales actuales, la creación de surcos para cultivo ha generado que los materiales salgan a la superficie, estos posteriormente son arrastrados por el agua durante la época de lluvia que serán finalmente depositados en estas zonas bajas, las cuales podemos analizar con el DEM.

Los resultados obtenidos son fundamentales para la investigación arqueológica en un futuro, el uso de sistemas LiDAR nos permite tener modelos muy detallados en zonas donde la información es poca o en nuestro caso nula, adicionalmente es fundamental continuar con las pruebas, uno de los resultados que observamos es que a una altura de 100 metros el LiDAR no logro penetrar la vegetación baja, esto no permitió tener una mejor resolución en el sector sur del área de trabajo, y generó confusiones con respecto a la división de las superficies terrestres y no terrestres del modelo.

Por otro lado a pesar que uno de los resultados esperados es la integración de un sistema LiDAR de bajo costo, es aún necesario continuar tanto con las pruebas del mejor punto de adquisición de datos como en el desarrollo de elementos que conforman el sistema, como en el caso de la IMU, la cual actualmente se está trabajando para tener este sistema sin el costo que implica la adquisición en el mercado.

9 Conclusiones

La presente investigación demuestra las diferentes posibilidades de integración de múltiples tecnologías para obtener un sistema de detección LiDAR de bajo costo, que, aunque todavía se encuentra en fase de desarrollo expuso resultados altamente positivos pues obtiene datos detallados de las características del paisaje con una excelente resolución. No obstante, es importante resaltar que aún algunos de los elementos tecnológicos usados siguen siendo bastante costosos en comparación con otro tipo de tecnologías y su despliegue requiere tener en cuenta diferentes herramientas (hardware y software), lo que todavía lo hace un sistema complejo de ejecutar.

En ese sentido, los datos capturados en la investigación hicieron parte de la fase de pruebas del sistema LiDAR de bajo costo, que si bien se desarrolló sin inconvenientes, si presentó una serie de desafíos en el momento de la interpretación de los datos y su aplicación en la presente investigación, el primero de ellos, asociado a la altura de vuelo del sistema, la cual debe ajustarse dado que la penetración del láser del sensor en la vegetación no fue la esperada, obviando características importantes de la vegetación más baja, como pastos limpios y enmalezados y en segundo lugar, debe ajustarse la temporada de vuelo, dado que la vegetación en temporada seca permite con mayor facilidad la penetración del sensor que en temporadas de lluvias.

Por último, se pudo corroborar en campo mediante la técnica de recolección superficial de material, el potencial arqueológico de la zona de estudio, si bien los hallazgos no fueron de tipo estructural como en la mayoría de ejercicios con LiDAR que han demostrado efectividad en la búsqueda de sitios arqueológicos, la obtención del modelo digital de elevación nos permitió

evidenciar la relación de la cantidad de hallazgos con el paisaje, ejercicio fundamental para entender el contexto arqueológico de los materiales.

10 Recomendaciones

Se recomienda ejecutar pruebas del sistema LiDAR en otros contextos arqueológicos, para poder evaluar no solo la precisión del modelo digital de elevación sino para poder evidenciar en los datos características de tipo arqueológico, con el fin de obtener información detallada de sitios arqueológicos nuevos, así como la documentación de los ya existentes. Pues el sistema permite tener el detalle suficiente para realizar este tipo de actividades, también es importante tener en cuenta que no solo es posible usar el sistema LiDAR en reconocimiento aéreo, sino que se puede usar en el reconocimiento terrestre.

Del mismo modo se recomienda la continuación de las pruebas del sistema en relación con la temporada de captura de datos y la altura de vuelo, pues de esta manera se podría encontrar el punto más óptimo donde el sistema arroje los resultados esperados, dado que estos factores son limitantes al momento de interpretar la información.

Por otro lado el reconocimiento en campo es aún fundamental en el desarrollo de estas tecnologías, que si bien evidencian características del paisaje aún no son del todo precisas en contextos de vegetación baja, pues tiende a presentar datos confusos, para ello la confirmación de los datos en campo va de la mano con cualquier metodología de reconocimiento no destructiva como el sistema LiDAR.

11 Referencias

- Aeronáutica Civil de Colombia. (2015). Circular Reglamentaria No 002. *Diario Oficial*, 34. http://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/sistema-de-aeronaves-pilotadas-a-distancia-rpas-drones/Documents/CR_Requisitos_grales_de_Aeronavegabilidad_y_Operaciones_RPAS.pdf
- Agnesi, A., & Pirzio, F. (2013). Neodymium-doped yttrium aluminum garnet (Nd:YAG) and neodymium-doped yttrium orthovanadate (Nd:YVO4). *Handbook of Solid-State Lasers: Materials, Systems and Applications*, 256–282. <https://doi.org/10.1533/9780857097507.2.256>
- Almudena, H. G. (1992). Enfoques teóricos en Arqueología. *SPAL. Revista de Prehistoria y Arqueología de La Universidad de Sevilla*, 1(1), 11–35. <https://doi.org/10.12795/spal.1992.i1.01>
- Álvarez Vidaurre, E. (2007). Interpretación en Arqueología: teorías del conocimiento. *Cuadernos de Arqueología de La Universidad de Navarra*, 15, 9–30.
- Bandini, F., Sunding, T. P., Linde, J., Smith, O., Jensen, I. K., Köppl, C. J., Butts, M., & Bauer-Gottwein, P. (2020). Unmanned Aerial System (UAS) observations of water surface elevation in a small stream: Comparison of radar altimetry, LIDAR and photogrammetry techniques. *Remote Sensing of Environment*, 237(October 2019), 111487. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111487>
- Bernardini, F., Sgambati, A., Montagnari Kokelj, M., Zaccaria, C., Micheli, R., Fragiaco, A., Tiussi, C., Dreossi, D., Tuniz, C., & De Min, A. (2013). Airborne LiDAR application to karstic areas: The example of Trieste province (north-eastern Italy) from prehistoric sites to Roman forts. *Journal of Archaeological Science*, 40(4), 2152–2160. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.12.029>
- Binford, L. (1988). En busca del pasado: Descifrando el registro arqueológico. In *En Busca del pasado*.
- Casana, J., Laugier, E. J., Hill, A. C., Reese, K. M., Ferwerda, C., McCoy, M. D., & Ladefoged, T. (2021). Exploring archaeological landscapes using drone-acquired lidar: Case studies from Hawai'i, Colorado, and New Hampshire, USA. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 39(August), 103133. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103133>
- Chase, A. F., Chase, D. Z., Weishampel, J. F., Drake, J. B., Shrestha, R. L., Slatton, K. C., Awe, J. J., & Carter, W. E. (2011). Airborne LiDAR, archaeology, and the ancient Maya landscape at Caracol, Belize. *Journal of Archaeological Science*, 38(2), 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.09.018>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección* (S. . Ediciones Rialp (Ed.); Segunda ed).

- Colin Renfrew, P. B. (2015). *Archaeology Essentials Theories/Methods/Practice*. (T. & Hudson (Ed.); Third Edit).
- David Wheatley, M. G. (2002). *Spatial Technology and Archaeology*. Taylor & Francis e-Library.
- Doneus, M. (2013). Openness as visualization technique for interpretative mapping of airborne lidar derived digital terrain models. *Remote Sensing*, 5(12), 6427–6442. <https://doi.org/10.3390/rs5126427>
- Drennan, R. D. (2006). *Prehispanic Chiefdoms In the Valle De La Plata. Vol 5: Regional Settlement Patterns*.
- Fisher, C. T., Fernández-Díaz, J. C., Cohen, A. S., Cruz, O. N., Gonzáles, A. M., Leisz, S. J., Pezzutti, F., Shrestha, R., & Carter, W. (2016). Identifying ancient settlement patterns through LiDAR in the Mosquitia region of Honduras. *PLoS ONE*, 11(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159890>
- Golden, C., Murtha, T., Cook, B., Shaffer, D. S., Schroder, W., Hermitt, E. J., Alcover Firpi, O., & Scherer, A. K. (2016). Reanalyzing environmental lidar data for archaeology: Mesoamerican applications and implications. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, 293–308. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.07.029>
- Gómez, A. (2011). Hacia una arqueología del paisaje en Colombia: reflexiones necesarias. *Boletín de Antropología*, 25(42), 231–254.
- Gordillo, I. (2014). La noción de paisaje en arqueología. Formas de estudio y aportes al patrimonio. *Jangwa Pana*, 13(1), 195. <https://doi.org/10.21676/16574923.1382>
- Greene, K., & Moore, T. (2010). *Archaeology: An Introduction (Fifth Edition)*.
- Horn, S. W., & Ford, A. (2019). Beyond the magic wand: methodological developments and results from integrated Lidar survey at the ancient Maya Center El Pilar. *Science and Technology of Archaeological Research*, 5(2), 164–178. <https://doi.org/10.1080/20548923.2019.1700452>
- Ilici, V., & Toth, C. (2020). High definition 3D map creation using GNSS/IMU/LiDAR sensor integration to support autonomous vehicle navigation. *Sensors (Switzerland)*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/s20030899>
- James R. Wiseman, & El-Baz, F. (Eds.). (2007). *Remote Sensing in Archaeology* (Vol. 1). Springer-Verlag New York.
- Jozkow, G., Toth, C., & Grejner-Brzezinska, D. (2016). UAS TOPOGRAPHIC MAPPING WITH VELODYNE LiDAR SENSOR. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III–1(July), 201–208. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-iii-1-201-2016>
- Kokalj, Ž., & Mast, J. (2021). Space lidar for archaeology? Reanalyzing GEDI data for detection

- of ancient Maya buildings. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 36(January). <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102811>
- Lasaponara, R., Leucci, G., Masini, N., & Persico, R. (2014). Investigating archaeological looting using satellite images and GEORADAR: The experience in Lambayeque in North Peru. *Journal of Archaeological Science*, 42(1), 216–230. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.10.032>
- Lasaponara, R., & Masini, N. (2011). Satellite remote sensing in archaeology: Past, present and future perspectives. *Journal of Archaeological Science*, 38(9), 1995–2002. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.02.002>
- Lozić, E., & Štular, B. (2021). Documentation of archaeology-specific workflow for airborne LiDAR data processing. *Geosciences (Switzerland)*, 11(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010026>
- Matteucci, S., & Scheisohn, V. (2004). Procesamiento de imágenes, SIG y modelos ecológicos aplicados a la arqueología. *Geofocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 0(4), 93–109.
- McCoy, M. D. (2021). Defining the geospatial revolution in archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 37(October 2020), 102988. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102988>
- Montufo Martín, A. M. (1992). Remote sensing in Archaeology. A critical review; APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN EN ARQUEOLOGÍA. UNA REVISIÓN CRÍTICA. *Cuaderno de Prehistoria de Granada*, 16–17, 425–451. <http://revistaseug.ugr.es/index.php/cpag/article/view/1311>
- Muhadi, N. A., Abdullah, A. F., Bejo, S. K., Mahadi, M. R., & Mijic, A. (2020). The use of LiDAR-derived DEM in flood applications: A review. *Remote Sensing*, 12(14), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs12142308>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. <http://volaya.github.io/libro-sig/>
- Paine, D., & Kiser, J. (2012). Aerial photography and image interpretation. In *The Photogrammetric Record* (Vol. 3). https://doi.org/10.1111/j.0031-868x.2004.295_6.x
- Quintus, S., Clark, J. T., Day, S. S., & Schwert, D. P. (2015). Investigating regional patterning in archaeological remains by pairing extensive survey with a lidar dataset: The case of the Manu'a Group, American Samoa. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2, 677–687. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2014.11.010>
- Renfrew, C., & Bahn, P. (2008). *Arqueología. Conceptos clave* (p. 345). Taylor & Francis.
- Reyes, A. D. O., Lazalde, J. R. V., Pérez, G. Á., Birdsey, R., & Peduzzi, A. (2015). LiDAR AEROTRANSPORTADO PARA EL MANEJO DE RECURSOS FORESTALES. AVANCES Y PERSPECTIVAS DE GEOMÁTICA CON APLICACIONES AMBIENTALES, AGRÍCOLAS Y URBANAS, December.
- Sexton, J. O., Bax, T., Siqueira, P., Swenson, J. J., & Hensley, S. (2009). A comparison of lidar,

- radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 1136–1147. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.022>
- Štular, B., Lozić, E., & Eichert, S. (2021). Airborne LiDAR-derived digital elevation model for archaeology. *Remote Sensing*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/rs13091855>
- Thompson, A. E. (2020). Detecting classic maya settlements with lidar-derived relief visualizations. *Remote Sensing*, 12(17), 1–29. <https://doi.org/10.3390/rs12172838>
- Toumazet, J. P., Vautier, F., Roussel, E., & Dousteysier, B. (2017). Automatic detection of complex archaeological grazing structures using airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, 569–579. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.03.012>
- Traviglia, A., & Cottica, D. (2011). Remote sensing applications and archaeological research in the Northern Lagoon of Venice: The case of the lost settlement of Constanciacus. *Journal of Archaeological Science*, 38(9), 2040–2050. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.10.024>
- Vilbig, J. M., Sagan, V., & Bodine, C. (2020). Archaeological surveying with airborne LiDAR and UAV photogrammetry: A comparative analysis at Cahokia Mounds. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 33(March), 102509. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102509>
- von Schwerin, J., Richards-Rissetto, H., Remondino, F., Spera, M. G., Auer, M., Billen, N., Loos, L., Stelson, L., & Reindel, M. (2016). Airborne LiDAR acquisition, post-processing and accuracy-checking for a 3D WebGIS of Copan, Honduras. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5, 85–104. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.11.005>
- Wang, X., Pan, H., Guo, K., Yang, X., & Luo, S. (2020). The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 502(1), 1–12. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/502/1/012008>
- Westley, K. (2021). Satellite-derived bathymetry for maritime archaeology: Testing its effectiveness at two ancient harbours in the Eastern Mediterranean. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 38(January), 103030. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103030>
- White, D. A. (2013). LIDAR, Point Clouds, and Their Archaeological Applications. In *Mapping Archaeological Landscape from Space* (pp. 175–186). <https://doi.org/10.2307/j.ctvx1hst1.17>
- Zhang, Ji & Singh, S. (2014). LOAM: Lidar Odometry and Mapping in real-time. Robotics: Science and Systems Conference (RSS). *LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-Time. Robotics: Science and Systems Conference (RSS)*, 109–111.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs8060501>

