LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR TECNICAS DE ESCANOGRAFÍA DE UNA SERIE DE HIPOGEOS PARQUE NACIONAL DE TIERRADENTRO CAUCA

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autores
YANNI NATALIA TOBAR PANCHOAGA
JULIÁN STIVEN BAREÑO HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS
FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERIA TOPOGRAFICA

Bogotá D.C. Mayo, 2024

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR TECNICAS DE ESCANOGRAFÍA DE UNA SERIE DE HIPOGEOS PARQUE NACIONAL DE TIERRADENTRO CAUCA

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autores
YANNI NATALIA TOBAR PANCHOAGA, COD.20212732010
yntobarp@udistrital.edu.co
JULIÁN STIVEN BAREÑO HERNÁNDEZ, COD.20211732026
jsbarenoh@udistrital.edu.co

Modalidad
Monografía

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Topográfico

Director
JULIO HERNAN BONILLA ROMERO
Ingeniero Civil Msc. En Geomática
jbonilla@udistrital.edu.co

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS
FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERIA TOPOGRAFICA

Bogotá D.C. Mayo, 2024

Nota de Aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

JOHN ALEXANDER ORDUÑA DIAZ

Docente evaluador

_____

JULIO HERNAN BONILLA ROMERO

Docente director

BOGOTÁ, D.C. MAYO DE 2024

"Las ideas emitidas por los autores son de exclusiva responsabilidad y no expresannecesariamente opiniones de la Universidad"

(Artículo 117, Acuerdo 029 de 1998).

Dedicatoria

A mi familia, especialmente a mi mamá, quien ha sido la razón, el ejemplo y el apoyo para que esto sea posible y al territorio ancestral del Cauca, porque en la magia que inspiran sus montañas, encontré la razón para seguir este camino.

Yanni Natalia Tobar Panchoaga

Dedico el trabajo de grado que me cambio la vida, a mi hermanita, mi mamá y mi papá, por su apoyo y amor incondicional en todo momento, a mis amigos de toda la vida, y especialmente a Natalia y el profe Julio por confiar en mi para este proyecto.

Julián Stiven Bareño Hernández

Agradecimientos

El desarrollo de este proyecto no sería posible sin la plena confianza y orientación de nuestro director el ingeniero Julio Bonilla, a quien agradecemos su excepcional labor como maestro, el cual nos brindó a lo largo de todo este proyecto, la guía para comprender la importancia de la transversalidad, la apropiación de nuestra historia y la búsqueda e investigación de los rincones de nuestra identidad. Agradecemos también a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por ser el espacio donde aprendimos y formamos las herramientas para desarrollar cada fase de este proyecto, al Instituto Colombiano de Antropología e Historia Nacional por permitirnos ser el primer proyecto en vinculación con la universidad, por habernos dado ese voto de confianza y habernos permitido trabajar en un espacio tan especial como lo es Tierradentro. A don Javier, don Carlos, doña Rosalín, a todos y todas, los y las trabajadores del parque arqueológico nacional de Tierradentro, por habernos brindado su apoyo incondicional desde el primer momento, por las historias, las experiencias, la hospitalidad y el amor con el que fuimos recibidos y acompañados. Al Cauca, y particularmente a la zona de Tierradentro, por permitirnos caminar dentro de su riqueza arqueológica, vivenciar su legado ancestral y reafirmar el sentido de nuestro trabajo. Y finalmente a todos y todas aquellas personas que fueron un apoyo directo e indirecto para que este proyecto se materializará de la forma en que lo hizo, infinitas gracias.

Natalia y Julián

Tabla de Contenido

1. Introducción 27

2. Problema de investigación 29

3. Justificación 31

4. Objetivos 34

4.1. Objetivo General 34

4.2. Objetivos Específicos 34

5. Marco teórico-conceptual 35

6. Marco referencial 38

6.1. Marco Geográfico 38

6.2. Marco contextual. 40

7. Marco Normativo 44

8. Metodología 46

7.1 Recursos 46

7.2.1. Metodología en campo 49

7.2.2. Diagrama de flujo metodología pre actividades de campo 51

7.2.3. Diagrama de flujo Metodología de campo 52

7.2.4. FASE I: Materialización y georreferenciación 53

7.2.5. FASE II: Levantamiento Topográfico mediante RTK. 56

7.2.6. FASE III: Vuelo fotogramétrico 58

7.2.7. FASE IV: Escaneo láser 3D 61

7.3. Metodología en oficina 64

7.3.1. Diagrama de flujo Metodología de oficina 64

7.3.2. FASE V: Cálculo y ajuste de los datos GNSS. 65

7.3.2. FASE VI: Procesamiento de información fotogramétrica. 71
7.3.3. FASE VII: Procesamiento de información LIDAR. 76
7.3.4. Procesamiento en Leica Cyclone Register 360 82
7.3.5. Aproximación de alineaciones astronómicas del alto de San Andrés 92
8. Resultados 101
8.1. Cálculo y ajuste de los datos GNSS. 101
8.2. Procesamiento Fotogramétrico 105
8.2.1. Nube de puntos clasificada 106
8.2.2. Modelo digital de elevación 108
8.3. Escaneo Lidar 109
8.3.2. Informes de registro de escaneos 109
8.4. Cálculo de volúmenes 117
8.5. Análisis Estructural y diseño 121
8.6. Análisis de alineaciones astronómicas del alto de San Andrés 123
8.6.1. Equinoccio 21 marzo 2024 123
8.6.2. Equinoccio 21 septiembre 2024 124
8.6.3. Solsticio 21 junio 2024 126
8.6.4. Solsticio 21 diciembre 2024 127
8.6.5. Simulaciones Animadas del paso del sol 128
8.7. Unión de nubes de punto fotogramétricos con lidar. 129
8.7.1. Nube de puntos fotogramétrica 129
8.7.2. Nube de puntos LiDAR 130
8.7.3. Unión de nubes de puntos Fotogramétricos y LiDAR 131
8.8. Planos topográficos 133

8.9. Realidad Virtual..... 134

9. Conclusiones..... 138

10. Recomendaciones..... 140

11. Anexos..... 142

12. Bibliografía..... 143

Lista de Ilustraciones

Figura 1.....38

Figura 2.....39

Figura 3.....40

Figura 4.....41

Figura 5.....42

Figura 6.....43

Figura 7.....51

Figura 8.....52

Figura 9.....53

Figura 10.....54

Figura 11.....55

Figura 12.....56

Figura 13.....57

Figura 14.....58

Figura 15.....59

Figura 16.....60

Figura 17.....61

Figura 18.....62

Figura 19.....63

Figura 20.....64

Figura 21.....67

Figura 22.....68

Figura 23.....68

Figura 24..... 69

Figura 25..... 72

Figura 26..... 74

Figura 27..... 77

Figura 28..... 78

Figura 29..... 79

Figura 30..... 80

Figura 31..... 81

Figura 32..... 83

Figura 33..... 84

Figura 34..... 85

Figura 35..... 86

Figura 36..... 87

Figura 37..... 87

Figura 38..... 88

Figura 39..... 89

Figura 40..... 90

Figura 41..... 91

Figura 42..... 93

Figura 43..... 94

Figura 44..... 95

Figura 45..... 95

Figura 46..... 96

Figura 47..... 98

Figura 48..... 99

Figura 49..... 99

Figura 50..... 105

Figura 51..... 107

Figura 52..... 107

Figura 53..... 108

Figura 54..... 116

Figura 55..... 117

Figura 56..... 118

Figura 57..... 119

Figura 58..... 119

Figura 59..... 120

Figura 60..... 121

Figura 61..... 122

Figura 62..... 123

Figura 63..... 124

Figura 64..... 124

Figura 65..... 125

Figura 66..... 125

Figura 67..... 126

Figura 68..... 126

Figura 69..... 128

Figura 70..... 128

Figura 71..... 129

Figura 72..... 130

Figura 73..... 130

Figura 74..... 131

Figura 75..... 131

Figura 76..... 133

Figura 77..... 134

Figura 78..... 135

Figura 79..... 136

Figura 80..... 136

Figura 81..... 137

Lista de Tablas

Tabla 1 47

Tabla 2 48

Tabla 3, ... 59

Tabla 4 66

Tabla 5 70

Tabla 6 74

Tabla 7 81

Tabla 8 91

Tabla 9 97

Tabla 10 102

Tabla 11 102

Tabla 12 103

Tabla 13 103

Tabla 14 103

Tabla 15 106

Tabla 16 110

Tabla 17 110

Tabla 18 110

Tabla 19 111

Tabla 20 111

Tabla 21 112

Tabla 22 112

Tabla 23 113

Tabla 24 113

Tabla 25 114

Tabla 26 114

Tabla 27 115

Tabla 28 123

Tabla 29 124

Tabla 30 126

Tabla 31 127

Tabla 32 142

Glosario

Aerofotografía: Fotografía aérea de una sección del terreno terrestre capturada desde unaaeronave.

Ajuste de red geodésica: Proceso por el cual se determinan correcciones para las observaciones realizadas a una figura geodésica y se someten estas a dichas correcciones, a fin de reducir errores por medio del ajuste de la red y compensación.

Ambigüedad: Se refiere al número indeterminado de ciclos de una observación de fase al inicio de esta última. En este proceso, la fase de la onda entrante se compara con la fase de una señal de referencia generada internamente en el receptor. La discrepancia observada entre las fases corresponde a la fracción restante de una onda completa. Inicialmente, el número total de ondas completas entre el observador y el satélite es desconocido. Esta incertidumbre persiste en cuando el receptor busque determinarla mediante una técnica apropiada.

Arqueoastronomía: Estudia las evidencias de yacimientos arqueológicos y su relación con la astronomía, junto a la etnoastronomía estudia las costumbres de un pueblo y su interpretación del cielo. Busca la relación existente entre los astros y la influencia que estos cuerpos celestes ejercen sobre la población sus creencias y actividades cotidianas (Julio Bonilla Romero O. L., 2019).

Base permanente: Es aquélla que siendo extremo de un vector se asume como de coordenadas conocidas. También se la suele llamar "estación de referencia".

Cauca: Es uno de los treinta y dos departamentos que, junto con Bogotá, Distrito Capital, componen el territorio la República de Colombia. Se localiza en el suroeste del país y sus territorios hacen parte de las regiones Andina y Pacífica. Cuenta con una superficie 29.308 Km^2, lo que representa el 2.56 % del territorio nacional. Su capital es la ciudad de Popayán y está dividido política y administrativamente en 42 municipios.

Cosmogonía: Se refiere al estudio o la teoría sobre el origen, la evolución y la estructura del universo. En otras palabras, es el intento humano por comprender cómo se formó el cosmos, desde sus primeros momentos hasta su configuración actual, a través de observaciones científicas, investigaciones filosóficas, mitologías y narrativas religiosas.

Cosmovisión: Se refiere al conjunto de creencias, valores, percepciones y concepciones que una persona o una cultura tienen sobre el mundo, la realidad y el universo en su totalidad. Esta perspectiva abarca aspectos filosóficos, religiosos, científicos y culturales, y puede influir en la forma en que se interpretan y se relacionan con el entorno, así como en las decisiones y acciones que se toman en la vida cotidiana. La cosmovisión proporciona un marco conceptual a través del cual se comprende y se da sentido al mundo que nos rodea.

CORS: La red de Estaciones de referencia de funcionamiento continuo o CORS es la red de estaciones estáticas que proporcionan datos GNSS exactos (fase portadora, rango de códigos, etc.) y también las correcciones. Los topógrafos pueden acceder a esta información para aumentar la exactitud de sus datos topográficos post procesados o para trabajar en RTK in situ. (emild).

Cultura: Es aquella comprende las normas sociales, valores, tradiciones, idiomas y expresiones artísticas de una comunidad. Define la identidad de un grupo, influye en sus comportamientos y modos de vida, y se transmite de generación en generación mediante la educación y la interacción social. Es un aspecto fundamental de la experiencia humana y varía significativamente entre diferentes sociedades y regiones del mundo.

DOP: Los DOP son números adimensionales que cuantifican la contribución de la disposición geométrica relativa de los satélites a la incertidumbre de una posición fija. Es decir, un DOP es una descripción del efecto de la geometría de los satélites que intervienen en la medición sobre el cálculo de las coordenadas del punto y el tiempo. Se representa porun escalar que multiplica al error medio cuadrático de la medida en sí, por lo tanto, a mayor DOP mayor inexactitud en el valor calculado. Los menores DOP están asociados a satélites separados y bien distribuidos sobre la esfera celeste.

Efemérides: Registro cronológico de las posiciones o coordenadas de un cuerpo celeste a lo largo del tiempo. Puede estar disponible en forma de "efemérides transmitidas" o como "efemérides precisas" que han sido procesadas posteriormente.

Error medio cuadrático: Una medida estadística que evalúa la dispersión de las posiciones calculadas en relación con una solución de posición óptima. El Root Mean Square (RMS por sus siglas en inglés) puede utilizarse para cualquier variable aleatoria.

Fotogrametría: Método para determinar coordenadas tridimensionales que emplea imágenes fotográficas u otros sistemas de percepción a distancia, junto con puntos de referencia topográficos en el terreno, como principal herramienta de medición.

Georreferenciación: Procesamiento en el cual se determina la posición de uno o varios puntos u objetos definiendo un sistema de coordenadas.

HDOP: Es el DOP referido a mediciones horizontales (latitud, longitud).

Hipogeo: Es una estructura arquitectónica subterránea, especialmente una tumba o un conjunto de tumbas. Estas construcciones eran comunes en varias culturas antiguas y se utilizaban como lugares de entierro para individuos o grupos de personas. Los hipogeos suelen estar decorados y pueden contener cámaras funerarias, pasillos y otros elementos arquitectónicos asociados con prácticas funerarias específicas de la cultura que los construyó.

Ingeniería topográfica: Es una rama de la ingeniería que se encarga de la medición, representación y análisis de la superficie de la Tierra y de otros cuerpos celestes. Su principal objetivo es obtener información precisa sobre la forma, dimensiones y características de la superficie terrestre, así como de las estructuras y objetos que se encuentran en ella. Utiliza técnicas como la fotogrametría, la teledetección, el posicionamiento por satélite y el levantamiento topográfico para recopilar datos y crear mapas detallados que son fundamentales en la planificación, diseño y construcción de proyectos de ingeniería civil, arquitectura, urbanismo y gestión del territorio.

LIDAR: Es un sensor óptico activo que transmite rayos láser hacia un objetivo mientras se mueve a través de rutas de topografía específicas. El reflejo del láser del objetivo lo detectan y analizan los receptores en el sensor lidar. (ESRI)

Lugar arqueológico: Es un área donde se han descubierto y excavado vestigios, estructuras o artefactos que datan de períodos antiguos de la historia humana. Estos sitios pueden contener restos de antiguas civilizaciones, como ruinas de edificaciones, herramientas, arte, cerámica, restos óseos y otros objetos que proporcionan información valiosa sobre la vida, las costumbres y la tecnología de las sociedades pasadas. Los lugares arqueológicos son importantes para la comprensión y el estudio de la historia y la evolución de la humanidad.

Mascara de elevación: La elevación mínima, expresada en grados, a la que se permite al receptor seguir un satélite, se calcula desde el horizonte, variando de 0° a 90°. Generalmente se establece en 15 grados desde el horizonte para evitar posibles interferencias ocasionadas por edificaciones, árboles y errores de reflexión múltiple.

MDE: Modelo digital del terreno (MDT) determinado específicamente mediante una red regular de cotas de altitud.

MDT: Una representación numérica en formato digital de la superficie de la Tierra, que incluye datos sobre la ubicación (coordenadas x, y) y la altitud (z) de los elementos presentes en la superficie. El término MDT se utiliza de manera general para describir todoslos modelos digitales, que comprenden tanto los modelos digitales de elevación (MDE) como otros en los que la variable z puede representar distintos aspectos como profundidaddel suelo, densidad poblacional o elevación del terreno, entre otros.

Nube de puntos: Es un producto resultante del escaneo láser o fotogrametría digital, la cual se compone de millones de puntos que son posicionados tridimensionalmente en el espacio. Esta facilita el trabajo en diferentes sectores ya que, de ellos se pueden obtener productos rápidos reducir costos tiempo y los trabajos son de mejor calidad y gran detalle.

Ortofoto: Fotografía con escala constante y propiedades de una proyección ortogonal, formada a partir de una fotografía en proyección central mediante rectificación diferencial.

Parque arqueológico: Son una figura administrativa de manejo y gestión de un área arqueológica protegida cuyas características museables, expositivas y socioculturales propician la visita regular de públicos para su puesta en valor, apropiación social y disfrutedel patrimonio arqueológico (ICANH, 2019).

Patrimonio de la humanidad: Lugares, monumentos o conjuntos a los que se les

atribuyeun valor universal excepcional y forman parte de la lista elaborada por la UNESCO. PDOP: Es el DOP referido a la posición 3D de un punto (latitud, longitud y altura). El mismo está relacionado con los DOP horizontal y vertical.

Pendiente: es la relación entre la diferencia de cotas y la distancia en proyección de dichos puntos.

Pixel: La unidad elemental de información dentro de un conjunto de datos ráster o bitmap, equiparable al concepto de 'celda'.

Posicionamiento: Acción mediante el cual se determinan las coordenadas geográficas, producida por un receptor GPS en modo individual.

Precolombino: se utiliza para nombrar a aquello que sucedió o que existía en América antes de las expediciones de Cristóbal Colón. Puede considerarse, por lo tanto, que el periodo precolombino se inicia con el desarrollo de los primeros asentamientos humanos en él continente y se extiende hasta la conquista europea.

Pueblo NASA: La nasa o Páez son un pueblo indígena, que habita el departamento del Cauca en la zona andina del suroccidente de Colombia. Los municipios con mayor población nasa son Toribio, Páez y Caldono.

Punto de control terrestre: Puntos con coordenadas conocidas en terreno utilizados para georreferenciar imágenes tomadas por vehículos aéreos no tripulados e imágenes terrestres.

Realidad aumentada: Tecnología que combina elementos del mundo real con elementos virtuales generados por computadora en tiempo real. Permite a los usuarios interactuar con objetos digitales superpuestos en el mundo físico a través de dispositivos como teléfonos inteligentes, tabletas o gafas de realidad aumentada.

Realidad virtual: Entorno digital generado por computadora que simula la presencia físicadel usuario y permite su interacción con un mundo artificial tridimensional. Los usuarios pueden experimentar y explorar este entorno utilizando dispositivos de visualización, como gafas de realidad virtual, que los sumergen completamente en la experiencia.

Red magna eco: Una red de comunicación que utiliza tecnologías y prácticas amigables con el medio ambiente para minimizar su impacto ecológico. Esto puede incluir el uso de fuentes de energía renovable, técnicas de eficiencia energética, reciclaje de equipos y materiales, y la reducción de emisiones de carbono en sus operaciones.

Residuales: Corrección o ajuste, de una observación para lograr el cierre completo de una triangulación. También se aplica a cualquier diferencia entre la cantidad observada y el valor calculado para dicha cantidad**.**

Rinex: El acrónimo RINEX proviene de Receiver Independent Exchange Format, que se traduce como "Formato de Intercambio Independiente del Receptor". Este formato consisteen un conjunto de normas estándar para compartir datos de observación de sistemas GPS/GNSS, lo que permite su utilización en diversos programas de post-procesamiento. Incluye definiciones para tres aspectos clave: tiempo, fase y distancia.

Rover: El rover es uno de los dos receptores GNSS que se utiliza para la recolección de datos en escenarios RTK o PPK. El rover es una unidad móvil: el topógrafo utiliza el rover para registrar los puntos, mientras que el rover recibe las correcciones de la base estática.

RTK: La cinemática en tiempo real o RTK es una de las técnicas utilizadas para mejorar la exactitud de los datos recogidos desde los satélites por el receptor. Para el RTK se necesitan dos receptores: una base y un rover. La base envía correcciones al rover en movimiento durante la recogida de datos.

Simetría: Es la disposición de las diferentes partes de un sujeto de una forma ordenada y correspondiente. La simetría supone equilibrio, y la correspondencia exacta en forma, tamaño y posición de las partes de un todo.

Sistema de coordenadas: Conjunto de valores que permiten que las posiciones se transformen en coordenadas de proyección con elevaciones sobre el geoide.

Soluciones Semanales: Las soluciones semanales SIRGAS se refieren al marco de referencia IGS válido en el momento en que se realiza el análisis de los datos GNSS. (SIRGAS, 2021)

Tierradentro: Parque arqueológico de Tierradentro.

Topografía: Tiene por objetivo medir extensiones de tierra, tomando los datos necesarios para poder representar sobre un plano, a escala, su forma y accidentes. (Torres y Villate.

Volumen: Es una medida tridimensional que indica el espacio ocupado por un objeto en el espacio. Se refiere a la cantidad de espacio tridimensional que ocupa un objeto y se calcula multiplicando dimensiones del objeto (longitud, anchura y altura) o utilizando fórmulas específicas dependiendo de la forma del objeto. Se expresa comúnmente en unidades cúbicas, como metros cúbicos (m^3) o centímetros cúbicos (cm^3).

GPD: Punto de control terrestre.

GPS: Global Positioning System. Sistema Global de Navegación por satélite desarrollado en Estados Unidos.

GSD: Ground Sampling Distance.

ICANH: Instituto Colombiano de Antropología e Historia.

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IGS: Servicio Internacional de GNSS.

MDE: Modelo digital de elevación

MDT: Modelo digital de terreno

RINEX: Receiver Independent Exchange Format

RMS: Error Medio cuadrático

RPAS: Real Time Kinematic. Navegación cinemática en tiempo real.

RTK: Real Time Kinematic. Navegación cinemática en tiempo real.

SILP: Estación permanente del SGC en Silvia-Cauca

SUES: Estación permanente del SGC en Suárez-Cauca

POPA: Estación permanente del SGC en Popayán-Cauca UAV: Estación permanente del SGC.

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Resumen

Este proyecto busca realizar un proceso de conservación, análisis y divulgación de tres hipogeos (tumbas subterráneas) ubicados en el alto de San Andrés pertenecientes al patrimonio cultural encontrado en el Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro al norte del departamento del Cauca. Implementando metodologías de captura y procesamiento de la información en conjunto con nuevas tecnologías, se pretende llevar a cabo procesos de topografía convencional, posicionamiento satelital y técnicas de fotogrametría y escenografía laser con el objetivo de obtener información precisa, detallada, fiel a la realidad que permita, además de su conservación, realizar un análisis arqueoastronómico, sustentado en las raíces históricas de las comunidades que habitan y habitaron este territorio.

Palabras clave: Hipogeos, posicionamiento satelital, fotogrametría, escenografía, análisis arqueoastronómico

Abstract

The main goal of this project is to seek the preservation, study and proliferation about three hypogea (underground tombs) which are located in "El alto de San Andres". They belong to the cultural heritage located in "El Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro" that can be found in northern Cauca. We accomplish that by implementing new methodologies to capture and processh data, whereby we use conventional topography, satellite positioning, photogrammetry and laser scenography techniques with the aim of obtaining both precise and detailed information, and authentic. Thus, and so, besides focusing on conservation we scrutinize on showing an archaeo-astronomic analysis, based on the historical roots of the communities that inhabit and inhabited this territory.

Keywords: hypogea, satellite positioning, photogrammetry, scenography, archaeoastronomical analysis.

1. Introducción

En el mundo contemporáneo, la interdisciplinariedad se ha convertido en un aspecto fundamental en el desarrollo de proyectos y la resolución de problemas complejos; en este sentido, la ingeniería topográfica emerge como un campo que trasciende sus límites convencionales, evidenciando su relevancia no solo en la planificación y ejecución de obras civiles, sino también en la preservación y estudio del patrimonio cultural. Al adentrarse en el proceso de formación en esta disciplina, es imperativo reconocer la transversalidad que la caracteriza, así como comprender cómo esta interacción con otras áreas del conocimiento puede desembocar en iniciativas innovadoras con impacto social significativo. Este proyecto aborda precisamente esta convergencia entre la ingeniería topográfica y la conservación del patrimonio, destacando la importancia de comprender que ningún campo de estudio está aislado por completo, pues fue a partir de tal reflexión que, se encaminó un proyecto que fuera prueba evidente de las posibilidades de nuestra profesión; de la mano con el semillero de investigación en arqueoastronomía de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y el Instituto Colombiano de Antropología e Historia fue desarrollado el primer proyecto en vinculación oficial entre estas dos instituciones, basado en la aplicación de tecnologías recientes y metodologías propias en beneficio de la investigación y análisis de una parte del patrimonio cultural de Colombia ubicado en el Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro, al norte del departamento del Cauca.

El proyecto reconoce el papel fundamental que juega en las investigaciones arqueológicas, puesto que, dentro de los alcances de este, proporciona herramientas avanzadas para la recopilación, análisis y visualización de datos espaciales de los hipogeos. Dentro del proceso de captura de datos se emplearon tecnologías como el escaneo láser terrestre, la fotogrametría aérea y los sistemas de posicionamiento global (GPS), que permitieron obtener información

geoespacial de alta precisión, además de documentar la forma y distribución de la zona de una manera precisa y detallada; el procesamiento, cálculo y ajuste de los datos dio como resultado una serie de productos base, como modelos digitales de superficie y terreno, nubes de puntos de cada uno de los hipogeos intervenidos, coordenadas precisas dentro de la normatividad actual, una ortofotografía del alto de San Andrés, planos topográficos, entre otros. Cada producto permitió visualizar el paisaje en su totalidad y explorar la distribución de características arqueológicas con gran detalle; en beneficio de la divulgación del patrimonio, el proyecto implementó las posibilidades dadas dentro de la realidad virtual, creando un espacio donde las personas puedan llevar una experiencia inmersiva a partir del escaneo Lidar, de esta manera además de servir como insumo para investigaciones arqueológicas se promueva el conocimiento e interés de cualquier ciudadano en el patrimonio de la República de Colombia.

.

2. Problema de investigación

Desde un enfoque constante y resonante de "desarrollo" en una sociedad llena de necesidades, el valor asignado a ciertas áreas de estudio y disciplinas se ha medido según sus contribuciones tangibles. Las soluciones prácticas y directas se convierten en herramientas y pasos inmediatos hacia el gran objetivo. Esto recalca y mantiene la separación entre diversas ramas del conocimiento, que, según estas exigencias diarias, son "completamente diferentes" e incluso, algunas más importantes que otras.

Desde hace más de un siglo, áreas como la ingeniería han recibido una mayor inversión en comparación con las ciencias humanas, lo que ha provocado un desinterés, por ende, un abandono de los estudios e investigaciones en campos como la arqueología, antropología, historia y cultura. Sin embargo, desde una posición privilegiada en comparación con la realidad del país, se propone una interdisciplinariedad que evidencie la necesidad de un desarrollo integral en todos los aspectos que conforman una sociedad. Esto implica reconocer la indiferencia que se ha dado desde profesiones como la ingeniería topográfica que se sienten ajenas hacia la conservación, estudio y divulgación del patrimonio cultural. Además, se debe identificar que esta transversalidad debe ser aprovechada desde una visión más amplia que los conceptos puramente técnicos.

Este proyecto demuestra el vasto alcance y la aplicabilidad de las técnicas de ingeniería en campos aparentemente ajenos, como la conservación y la arqueología. Al fusionar conocimientos interdisciplinarios, se establece una conexión e interacción directa entre profesiones que, a primera vista, podrían parecer distantes. Esta sinergia ha permitido abordar desafíos complejos desde una perspectiva innovadora, potenciando el avance en ambas áreas. Los resultados obtenidos subrayan la importancia de fomentar la colaboración interdisciplinaria y mantener una mentalidad abierta, ya que la integración de diversos

enfoques puede conducir a soluciones más completas y eficaces. En definitiva, este proyecto sienta un precedente alentador para futuras iniciativas que busquen trascender los límites convencionales y explorar nuevos terrenos en la intersección de campos aparentemente disímiles.

3. Justificación

Las zonas de conflicto, el difícil acceso a diversas regiones de Colombia, así como los pocos recursos destinados a profundizar en estas investigaciones, han hecho que el entendimiento y la cercanía que la comunidad en general tiene de los pueblos y culturas humanas que han habitado el territorio colombiano se vea reducida. Comprender el valor de estos espacios como parte de la historia humana es clave, así como comprender estos hipogeos como parte del ingenio de la humanidad, de su conocimiento del territorio y de su relación profunda con la muerte.

En Colombia hay más de cinco lugares declarados por la UNESCO como Patrimonio de la Humanidad entre los cuales se encuentra el puerto y fortalezas monumental de Cartagena, el Parque Nacional de Los Katíos, el Parque Arqueológico de San Agustín, el Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro y el centro histórico de Santa Crux de Mompox, todos importantes y determinantes no solo para el conocimiento de las poblaciones pasadas a nivel internacional, sino también para la estructura y definición de la multiculturalidad que caracteriza al país. Es por ello que la conservación y divulgación del patrimonio contribuyea todo tipo de aspectos en pro del desarrollo de la sociedad y, por ende, implica metodologías interdisciplinarias que se desarrollen en beneficio de estas.

La ingeniería topográfica ha sido participe a nivel mundial en proyectos de conservación e investigación del patrimonio, brindando información útil y verificable que ha permitido realizar grandes descubrimientos arqueológicos que a su vez les han dado riqueza cultural, económica e histórica a diversas sociedades; como profesionales en formación, es el deber reconocer e identificar el valor y la importancia de la preservación e investigación del patrimonio, puesto que, los egresados son quienes en algún momento tendremos potestad y criterio profesional para opinar, desarrollar, y establecer proyectos que incluyanterritorios

que requieran conservación del patrimonio, conocimiento cultural y caracterización social, que nos permita orientar dichos proyectos hacía objetivos más conscientes, empáticos y consecuentes con las diversas realidades que tiene este país.

El concepto o ejercicio de conservación del patrimonio cultural de un país se ve mencionado, establecido y desarrollado a partir de leyes, planes de ordenamiento, entidades u organizaciones, investigaciones, profesionales e inclusive de la participación ciudadana, su importancia recae en la constitución de un conjunto de rasgos que brindan identidad social, nos permite entender la capacidad que como ser humanos tenemos para relacionarnos y evolucionar con el entorno, conocer el sentido de lo que estructura la cultura colombiana “El patrimonio cultural en su más amplio sentido es a la vez un producto y un proceso que suministra a las sociedades un caudal de recursos que se heredan del pasado, se crean en el presente y se transmiten a las generaciones futuras para su beneficio. Es importante reconocer que abarca no sólo el patrimonio material, sino también el patrimonio natural e inmaterial. Como se señala en Nuestra diversidad creativa, esos recursos son una riqueza frágil”, (UNESCO, s.f.), y como tal requieren políticas y modelos de desarrollo que preserven y respeten su diversidad y su singularidad, ya que una vez perdidos no son recuperables

Es por ello que una nación se encarga de establecer una normatividad pertinente que garantice la seguridad y conservación tanto del patrimonio tangible como el intangible, en la siguiente cita se presenta una de las muchas leyes diseñadas para la conservación y defensa del patrimonio nacional: “Se pronuncia sobre la constitucionalidad de los artículos 115, 116 y 117 de la Ley 1617 de 2013. La Constitución Política de 1991 le dedica un amplio espacio a la cultura. Con un propósito claro de defensa del patrimonio cultural en sus distintas manifestaciones, y como expresión de la diversidad de las comunidades, de la

riqueza humana y social de los pueblos y como instrumento para construir sociedades organizadas. En lo que se refiere específicamente a la defensa del patrimonio cultural y arqueológico y al régimen constitucional de protección, su fundamento surge directamente del artículo 63, en el que se consagra que el patrimonio arqueológico de la Nación y los demás bienes que determine la ley son inalienables, imprescriptibles e inembargables; y, de manera especial, del artículo 72, que prevé que el patrimonio cultural de la Nación está bajo la protección del Estado." (COLOMBIA, 2009)

"Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro

Este parque agrupa estatuas monumentales prehispánicas de personajes humanos y contiene numerosos hipogeos que datan de los siglos VI a X. Estas vastas tumbas subterráneas de enormes dimensiones (algunas cámaras mortuorias tienen 12 metros de anchura) están ornamentadas con motivos que reproducen la decoración interior de las viviendas de ese periodo. Los monumentos del parque atestiguan la complejidad social y la riqueza cultural de una sociedad prehispánica de la región andina septentrional."(UNESCO, s.f.)

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

- Contribuir a los procesos de investigación, preservación y divulgación del patrimonio arqueológico de las comunidades que habitaron el norte del departamento del Cauca, por medio de un estudio topográfico y un análisis arqueoastronómico de un conjunto de hipogeos ubicados en el parque arqueológico Nacional de Tierradentro.

4.2. Objetivos Específicos

- Contextualizar el proyecto por medio de una indagación acerca de las poblaciones indígenas que habitan y habitaron este territorio.
- Georreferenciar dos vértices topográficos por medio de un posicionamiento satelital con equipos receptores GNSS.
- Realizar un vuelo fotogramétrico por medio de un equipo RPAS, que permita generar una nube de puntos densa, un orto mosaico de alta resolución y un modelo digital de terreno de la zona en estudio.
- Llevar a cabo un levantamiento topográfico en 3D de una serie de hipogeos, por medio de un escaneo Lidar terrestre, que permita generar un modelo digital a partir de una nube de puntos.
- Elaborar un análisis arqueoastronómico del paso del sol a partir de los productos obtenidosy la caracterización geográfica del proyecto.

5. Marco teórico-conceptual

En esta sección se presentan los conceptos relevantes, investigaciones previas y literatura existente que sustenten una base sólida sobre la cual se fundamenta este proyecto, se exploran diversas teorías y conceptos relacionados con la conservación del patrimonio cultural, la ingeniería topográfica y las tecnologías de documentación espacial. Se examina cómo estas disciplinas convergen para abordar los desafíos actuales en la preservación del patrimonio y se identifican las mejores prácticas para la aplicación efectiva de metodologías topográficas en contextos patrimoniales.

Los textos presentados aquí, se dan en forma de cita, teniendo en cuenta las ideas principales de cada uno, las cuales jugaron un papel fundamental en el proceso investigativo para contextualizar, analizar y orientar el proyecto.

"El patrimonio es, pues, un concepto que se construye en el contexto de los territorios de las naciones modernas; consolida la noción de propiedad, heredad, patria, y, en el ámbito de lo público, articula acciones que propenden al restablecimiento del vínculo social, es decir de la identidad cultural, fragmentada por una identidad de consumo que está desplazando y des territorializando otros ámbitos de significación establecidos por los grupos sociales." (Eduardo Forero Lloreda, 2006)

En referencia al Parque arqueológico de Tierradentro Cauca, "Este parque agrupa estatuas monumentales prehispánicas de personajes humanos y contiene numerosos hipogeos que datan de los siglos VI a X. Estas vastas tumbas subterráneas de enormes dimensiones (algunas cámaras mortuorias tienen 12 metros de anchura) están ornamentadas con motivos que reproducen la decoración interior de las viviendas de ese periodo. Los monumentos del parque atestiguan la complejidad social y la riqueza cultural de una sociedad prehispánica de la región andina septentrional." (UNESCO, s.f.)

“Los denominados «hipogeos» son las estructuras más representativas y asombrosas de Tierradentro. Esas tumbas subterráneas (figura 1), talladas en roca blanda de origen volcánico (tobas andesíticas), aunque reciben el nombre de hipogeos, podrían corresponder, en términos meramente arqueológicos, a tumbas de pozo y cámara o tumbas de tiro. También contamos con el término atribuible a los indígenas nasa: ju’gtewe’sx çxab, «la ciudad de nuestros mayores antepasados»” (Rubén Cejudo, 2022)

“Vemos que en Tierradentro se encuentran superpuestos dos tipos de sepulturas, mediante las cuales desarrollaron los hipogeos, como solución a sus creencias y como reflejo de su vivienda doméstica. En consonancia con la accidentada topografía de esta región los hipogeos fueron hechos en sitios altos aprovechando los dorsos de las lomas y cerros, costumbre que muestra la preferencia que tuvieron por las montañas como sitios dedicados al culto funerario. En uno de estos sitios, El Aguacate, cavaron en una hilera que sigue la cresta de la montaña alrededor de sesenta y ocho hipogeos. En otros lugares como San Andrés, Segovia y El Duende, estos se encuentran concentrados en espacios muy reducidos, aprovechando al máximo estos sitios de especial significación religiosa. Algunos se hicieron tan cerca unos de otros que, a veces, solo los separa una delgada pared,como es el caso de dos hipogeos contiguos de Segovia, que actualmente se encuentran comunicados de manera ocasional, por un hueco hecho por los guaqueros al saquear estos enterramientos” (Hinestrosa, 1982).

“Tierradentro pertenece a las culturas megalíticas andinas que, junto con la agustiniana, se desarrollaron al sur de Colombia durante el período preclásico inferior. Por consiguiente, sus manifestaciones artísticas, que la diferencian totalmente de las que se encuentran en otras culturas, como son la arquitectura y la pintura funerarias son creaciones específicas de

este pueblo, que allí consiguieron su máximo desarrollo y esplendor. Estas manifestaciones: monumentos funerarios, escultura y orfebrería, continuarán planteando un problema muy interesante hasta tanto se pueda conocer la secuencia crono [1] lógica que les corresponde. Mientras tanto no se podrá saber, como ya se había planteado, si se trata de una sola cultura o si son varias, y cuál es su verdadera procedencia" (Hinestrosa, 1982)

"Según Sevilla (2009), fueron cuatro los colores empleados en los diseños: el negro (de mayor predominación visual), el rojo, el amarillo ocre (el de menor uso) y el blanco (que servía de base, pero implicaba resaltar la forma). Chávez & Puerta (1986) indican que la pintura blanca muestra todos los caracteres de una arcilla blanca (que pudo ser aplicada con la mano o un artefacto plano). Se trata de un material muy plástico. La roja, es simplemente un ocre rojo, fácilmente disgregable al ser tratado por el agua. La pintura negra es un material insoluble al agua; mediante un simple lavado con agua, se separa en forma de escamas negras. Funde por debajo de seiscientos grados centígrados y durante la fusión, su color varía hacia el blanco. Se trata de un material compuesto de pizarra negra arcillosa." (Araújo, 2013)

Con respecto a lo funerario, "Para finalizar, el culto a la muerte permitió que esta cultura evolucionara en su pensamiento geométrico y métrico en cuanto al desarrollo de la pintura mural y fue la configuración de las superficies al servicio de la idolatración lo que les permitió, en este espacio de trabajo, sujeto a sus técnicas y herramientas propias al oficio, crear o dinamizar nociones que, con el paso del tiempo, irían evolucionando y que en el presente se constituyen un orgullo cultural para la Nación." (Araújo, 2013)

6. Marco referencial

6.1. Marco Geográfico

El Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro se encuentra ubicado en el nororiente del departamento del Cauca, en la región andina del suroccidente de Colombia. Situado a 113 kilómetros al oriente de la ciudad Popayán, capital del Cauca. A 1.500 metros al norte del municipio de San Andrés de Pisimbala y en las inmediaciones de los municipios de Belalcázar e Inzá. El parque tiene una topografía escarpada montañosa, ya que se sitúa en los ríos Páez y Ullucos, en la vertiente oriental de la cordillera Central de los Andes, y perteneciente a la hoya hidrográfica del río Magdalena.

Figura 1

Ubicación Parque Arqueológico nacional de Tierradentro Cauca.

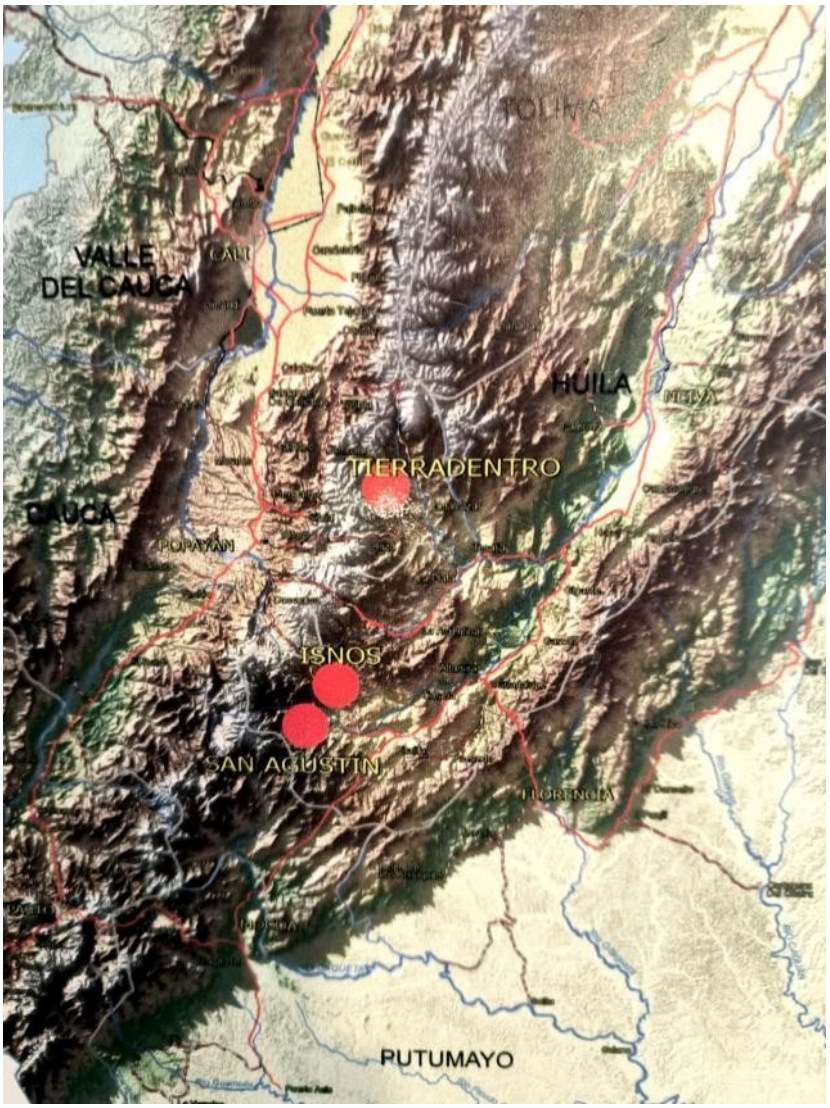


Fuente Tomada del Museo Parque Arqueológico Nacional Tierradentro

Cuenta con una extensión de 4.264 hectáreas y una altitud que oscila entre los 1000 y 1900 m.s.n.m. El clima es variado, desde el páramo pasando por el inclemente frio hasta un clima templado. Se estima que el 17% de su territorio se encuentra en la zona media cálida, el 46% en la fría y el 37% en la zona alta. Las temperaturas varían según la altitud y época del año.

Figura 2

Ubicación Parque Arqueológico nacional de Tierradentro



Fuente. Tomada del Museo Parque Arqueológico Nacional Tierradentro

6.2. Marco contextual.

Los pueblos indígenas de Latinoamérica, con su rica diversidad de culturas, lenguas y tradiciones, constituyen un pilar fundamental de las sociedades modernas en la región. Su invaluable legado cultural, que abarca desde idiomas, arte, tradiciones, música, danza y religión, hasta su profunda sabiduría ancestral sobre la naturaleza y la medicina, nutre la identidad y el desarrollo de cada territorio. Más allá de su riqueza cultural, los pueblos indígenas han contribuido significativamente al desarrollo de la región en diversos ámbitos, principalmente el agrícola.

Colombia según censo realizado por el DANE en 2018, cuenta con 1.905.617 personas que se auto reconocen como indígena, distribuidos en los 32 departamentos, siendo el Cauca el segundo departamento con mayor número de población indígena, con un 24.1%,el cual se constituye en seis etnias indígenas principales; Nasa-Paéces, Yanaconas, Misak,Coconuco, Totoró y Eperara siapidara. El pueblo Nasa se ubican en la zona de Tierradentro desplegándose por las regiones de Inzá, San Andrés de Pisimbala, Belalcázar, Páez, entre otras.

Figura 3

Padre e hijo indígenas Nasa.



Fuente. Tomada del Museo Parque Arqueológico Nacional Tierradentro

La región de Tierradentro en su basta historia data que desde aproximadamente hace 3000 años entraron y se establecieron los primeros grupos humanos, 1100 años después, ya asentados en esta se tallaron estatuas y casas bajo tierra para depositar urnas amanera de osarios basados en una cosmovisión (o cosmogonía) acerca de la muerte y la vida, fue esta que inspiro tales construcciones y por lo cual dieron origen a una de las arquitecturas más sorprendentes presentes en el departamento del Cauca. Al rededor de 1577 la invasión y colonización española alcanzo los rincones de los andes adentrándose en las altas montañas del norte del cauca, fundando San Pedro de Guanacas, y treinta y seis años después construyen capillas doctrineras en Guanacas, Santa Rosa y Yaquiva, allí bajo un adoctrinamiento más que una lucha violenta, se impusieron creencias occidentales basadas en una religión que discriminaba y prohibía toda clase de parecido con las cosmogonías latinoamericanas de la época, pues los nuevos allegados veían los hipogeos como lugares de poca fe, llegando a prohibirlos y satanizarlos ante la población, obligándolos a transformar sus prácticas culturales.

Figura 4

Monjas clarisas con niños nasa, frente a la capilla doctrinera del resguardo indígena de Calderas.

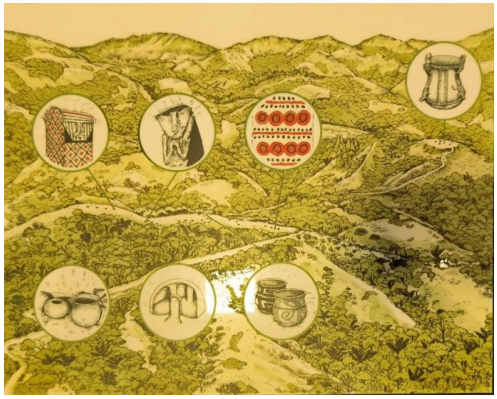


Fuente. Tomada del Museo Parque Arqueológico Nacional Tierradentro

A pesar de la prohibición y satanización de los hipogeos por parte de los colonizadores españoles, estos impresionantes monumentos funerarios subterráneos lograron perdurar a través de los siglos. En esta primera mitad del siglo XX de varias expediciones, destacan las del Arqueólogo Gregorio Hernández de Alba, en 1936, que realizó las primeras investigaciones y excavaciones en el sitio para inspeccionarlas. Del Geólogo George Burg, patrocinado por la Universidad del Cauca, que realizaba estudios de suelos de San Agustín y Tierradentro. Loa aportes dados por las investigaciones realizadas por Hernández de Alba fueron publicadas en El tiempo, dando notoriedad a estos valiosos espacios arqueológicos precolombinos, generando un interés en el Gobierno Nacional colombiano y sus habitantes, con ello en 1947 el gobierno colombiano declaró la zona Monumento Nacional y encomendó su protección al Instituto Colombiano de Cultura (COLCULTURA). Durante décadas, COLCULTURA se encargó de la investigación, conservación y divulgación de Tierradentro. En 1993, la administración del parque arqueológico se transfirió al Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH), entidad que desde entonces vela por la preservación de este valioso legado cultural.

Figura 5

Diseños de diversos, petroglifos, artesanías, hipogeos entre otros.



Fuente. Tomada del Museo Parque Arqueológico Nacional Tierradentro

El Instituto Colombiano de Antropología e Historia, es una entidad pública adscrita al Ministerio de Cultura de Colombia. Se creó en 1941, con el objetivo de investigar, conservar, proteger y divulgar el patrimonio antropológico y riqueza histórica y cultural de la nación colombiana. Una de sus funciones designadas es la administración de cinco parques arqueológicos. El Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro lo administra desde 1993 el ICANH, mediante el Decreto 776 de 3 de mayo. Dicha transferencia se dio luego que en 1979 los Hipogeos de Tierradentro fueran declarados Monumento Nacional de Colombia, por lo cual protege y conserva importantes vestigios de las culturas precolombinas, y su estado de conservación, además tiene una relevancia histórica y cultural con alto potencial investigativo. Posterior a esto, en 1995 San Agustín y Tierradentro son incluidos en la lista de Patrimonio Arqueológico de la humanidad por las Naciones Unidas por la Educación, la Ciencia y la Cultura *(UNESCO, s.f.)*

Figura 6

Lugares donde se ha realizado el Saakhelu.



Fuente. Tomado de Capacitación Radiofónica. Cartilla N. 1. Programa Tierradentro ÇXHAB WALA, Cristabell L, 2005.

7. Marco Normativo

En el desarrollo de proyectos técnicos, es fundamental conocer y cumplir con las leyes, normas y resoluciones que los regulan. En este caso particular, se abordará la normativa aplicable a las actividades topográficas en Colombia, cuyo ente regulador es el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Además, debido a la vinculación del proyecto con áreas como la arqueología y el patrimonio, es necesario considerar la normativa vigente que vela por la protección y adecuada intervención en espacios arqueológicos. Por consiguiente, en este capítulo se presentará de manera detallada el marco legal y regulatorio que rige tanto las actividades topográficas como la gestión de sitios arqueológicos, con el fin de garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos y asegurar el respeto por el patrimonio cultural.

- Resolución 643 del 30 de mayo de 2018 “Por la cual se adoptan las especificaciones técnicas de levantamiento planimétrico de las actividades de barrido predial masivo y las especificaciones técnicas del levantamiento topográfico planimétrico para casos puntuales” (IGAC, 2018)
- Resolución 1468 del 29 de septiembre de 2021 “Por medio de la cual se establecen los lineamientos técnicos mínimos requeridos en la materialización, medición y administración de vértices geodésicos para su integración a la Red Geodésica Nacional de la República de Colombia” ((IGAC), 2021)
- Resolución 1421 del 15 de septiembre de 2021 “Por la cual se establecen las condiciones de validación técnica y oficialización de productos cartográficos básicos y se dictan otras disposiciones” (Codazzi, 2021)
- NTC 6271 “relaciona los instrumentos más utilizados en estudios topográficos y presenta lineamientos en forma general para una correcta captura, procesamiento y

control, al igual que las condiciones de aceptación o rechazo de los servicios y productos elaborados.” (INTERNACIONAL, 2018)

- Decreto 138 de 2019 “Por el cual se modifica la Parte VI "Patrimonio Arqueológico" del Decreto 1080 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Cultura” (Pública, 2019)

8. Metodología

En este capítulo se describe la metodología empleada para desarrollar el proyecto, abordando las diversas fases de desarrollo en campo y en oficina, proporcionando una visión integral del proceso realizado. Se presentan de manera estructurada las metodologías, técnicas y tecnologías empleadas durante el transcurso del proyecto, así como los tiempos y procesos involucrados en cada etapa (Recursos, metodología en campo y metodología en oficina) lo cual ofrece no solo un marco de referencia para comprender la ejecución del mismo, sino también una guía para replicar y validar los resultados obtenidos.

7.1 Recursos

Para el desarrollo de las diferentes fases metodológicas del proyecto, fue necesario disponer de una serie de recursos técnicos, equipos, software y materiales especializados. En este subcapítulo se relacionan las etapas de desarrollo y los insumos empleados, cada una de las características y especificaciones técnicas se adjuntan dentro de los anexos del proyecto (ver tabla de anexos).

Tabla 1

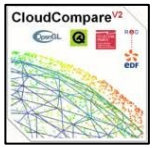
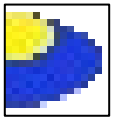
Recursos de Metodología en Campo

	FASE	PROCESO	RECURSO	IMAGEN
CAMPO	I y II	-Materialización y georreferenciación - Levantamiento topográfico	- Herramienta menor, cemento, arena, gravilla, agua, pala, madera - Placa de acero marcada (2 unidades) - Equipo receptor GNSS doble frecuencia Survey E300 con colector - Trípode con una base nivelante. - Bastón de aluminio.	
	III	-Vuelo fotogramétrico	- Dron Mavic 2 Zoom. - Targets para puntos de control terrestre. - Software Pix4D	
	IV	-Escenografía de la zona en estudio	- Escáner laser FARO 350. - Esferas y targets. - Trípode de aluminio	

Fuente. Propia

Tabla 2

Recursos de Metodología en Oficina

	FASE	PROCESO	RECURSO	IMAGEN
OFICINA	V	- Cálculo y ajuste de los datosGNSS. - Ajuste de levantamiento RTK	- Equipo de computo - Software comercial Leica Infinity - Microsoft Excel	 
	VI	- Procesamiento de informaciónfotogramétrica.	- Equipo de computo - Software comercial Agisoft Metashape.	
	VII	- Procesamiento de informaciónLIDAR.	- Equipo de computo - Software comercial FARO Scene - Software comercial Cyclone Register 360 - Software libre CloudCompare	  
		- Procesamiento arqueoastronómico	- Equipo de computo - Software libre Stellarium - Software libre SunPath - Software libre SunEarthTools - Software libre MeshLab	   

Fuente. Propia

7.2.1. Metodología en campo

La metodología implementada se estructuró en fases secuenciales, las cuales fueron organizadas y definidas siguiendo el flujo de trabajo requerido para el proyecto. Dicha secuencia consideró la dependencia entre ciertos procesos previos y sus consecuentes. En este subcapítulo se exponen las actividades desarrolladas durante la etapa de campo, detallando las técnicas utilizadas para la recolección de datos primarios, así como los procedimientos automatizados que fueron ejecutados durante esta fase inicial del proyecto. Durante la etapa inicial del proyecto, se llevó a cabo una gestión conjunta con el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH), lo cual permitió realizar una primera visita de reconocimiento. El objetivo principal de esta visita fue evidenciar las necesidades prioritarias del parque arqueológico en términos de estudios e investigaciones requeridas, teniendo en cuenta los trabajos previos realizados en la zona. Se efectuó un recorrido por los cinco altos que conforman el parque, en compañía de dos profesionales del ICANH, con el fin de contextualizar in situ las metodologías, estudios, alcances y coberturas que tendría el proyecto a desarrollar.

Dentro de este proceso se expusieron las propuestas de ambas partes, considerando las necesidades del parque, que para el momento se proponían los altos del Aguacate y San Andrés como las principales zonas de estudio, y las propuestas dadas desde las posibilidades, teniendo en cuenta los recursos económicos disponibles, el apoyo y gestión del parque, los equipos requeridos, el acceso y desplazamiento hacia las zonas de interés, las condiciones de orden público, entre otros factores relevantes.

Posterior a la primera visita, se presentó y explicó en detalle una propuesta metodológica, en la cual se desglosaron las distintas fases a desarrollar. Esta propuesta comprendía una

descripción específica de cada una de las etapas técnicas, tanto las actividades de campo como las de oficina, evidenciando los alcances y posibilidades del proyecto de manera integral. Tras un proceso de gestión y organización con el ICANH, este aprobó y respaldó el proyecto, posibilitando la realización de una segunda visita en compañía de dos profesionales. Durante esta segunda visita, se implementó la metodología propuesta previamente, la cual se expone a continuación. (el documento referido a la propuesta metodológica se adjunta en los anexos del proyecto).

7.2.2. Diagrama de flujo metodología pre actividades de campo

Figura 7

Diagrama de flujo Metodología pre actividades de campo

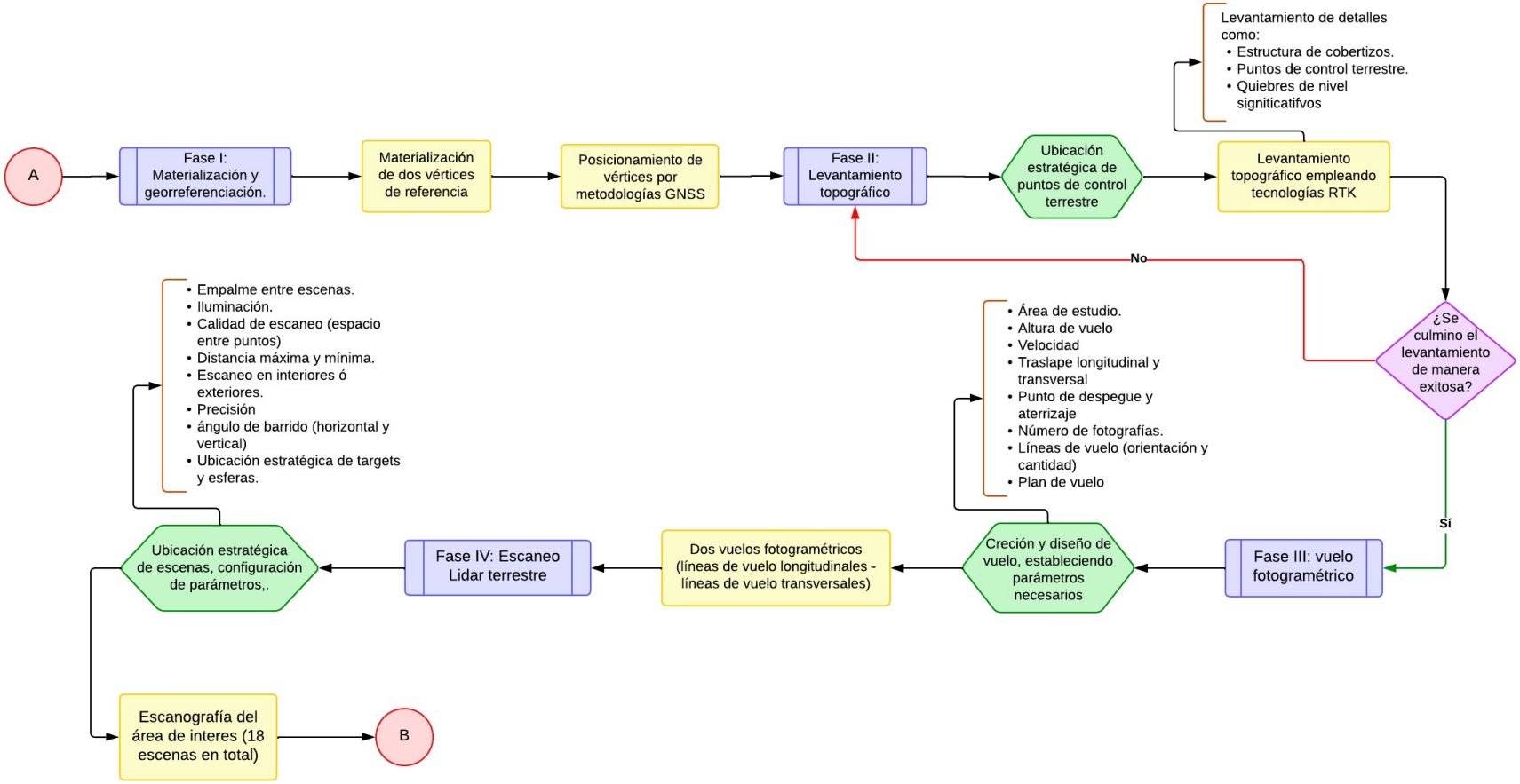


Fuente. Propia

7.2.3. Diagrama de flujo Metodología de campo

Figura 8

Diagrama de flujo Metodología de oficina



Fuente. Propia

7.2.4. FASE I: Materialización y georreferenciación

Como proceso inicial, se llevó a cabo la materialización de dos vértices geodésicos de referencia, ubicados estratégicamente en el alto de San Andrés, considerando factores clave como Inter visibilidad, áreas despejadas, zonas de poca intervención. Si bien estos procedimientos se encuentran parametrizados por la Resolución 643 de 2018 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, la materialización se realizó acatando las especificaciones establecidas en el Decreto 138 de 2019 (Título IV "Intervención sobre el patrimonio arqueológico"). En consecuencia, las placas se materializaron con dimensiones de 0.3 metros de largo por 0.3 metros de ancho y 0.2 metros de profundidad, orientadas hacia el punto cardinal sur. Cada una cuenta con una placa de aluminio en la que se marcó la información referida al proyecto: "GPS-ICANH-UD-01"(ver figura 10) y "GPS-ICANH-UD-02.

Figura 9

Materialización GPS 1



Fuente. Propia

Figura 10

Materialización GPS 1



Fuente. Propia

A partir de esta pareja de vértices, se realizó un posicionamiento estático diferencial en cada uno de ellos (ver figuras 11 y 12). Los parámetros y especificaciones técnicas para esta actividad se definieron de acuerdo con lo estipulado en la Resolución 643 de 2018 y sus derivados normativos. Siguiendo dichos lineamientos y teniendo en cuenta las especificaciones y alcance de los equipos empleados, se estableció un tiempo mínimo de rastreo de 7.5 horas,considerando la distancia desde la zona de estudio hasta las bases

permanentes de la red MAGNAECO, que para el caso fueron POPA, SILP y SUES todas ubicadas en el departamento del Cauca.

Figura 11

Materialización GPS 1



Fuente. Propia

Figura 12

Equipo GPS armado en GPS-1



Fuente. Propia

7.2.5. FASE II: Levantamiento Topográfico mediante RTK.

El levantamiento topográfico se llevó a cabo a partir de un posicionamiento cinemático en tiempo real RTK (por su nombre en inglés) el cual es un método de posicionamiento en tiempo real que utiliza señales de satélite para obtener coordenadas geoespaciales, proporcionando correcciones en tiempo real a partir de la estación (punto base) de referencia, que para el caso se fue la placa GPS-ICANH-UD-01. La recolección de datos se realizó teniendo en cuenta los objetos geográficos de interés para el proyecto, contemplando

la ubicación de los hipogeos, puntos de control terrestre (tanto para el vuelo fotogramétrico como para los puntos de control del escaneo LIDAR), estructuras de importancia, entre otros. Este proceso permitió capturar datos adicionales y validar la precisión del levantamiento fotogramétrico (ver figura 13 y 14), asegurando una representación completa y precisa.

Figura 13

Levantamiento RTK punto de control 7



Fuente. Propia

Figura 14

Levantamiento RTK punto de control 5



Fuente. Propia

7.2.6. FASE III: Vuelo fotogramétrico

Con el objetivo de obtener una base cartográfica precisa, así como datos tridimensionales del entorno, se realizaron dos vuelos teniendo en cuenta las condiciones de la zona en estudio y los equipos que se dispusieron para tal fin. Empleando un dron Mavic 2 Zoom en conjunto con la aplicación Pix4D, se definieron dos planes de vuelos controlados con las siguientes configuraciones (ver figura 15):

Tabla 3,

Características de vuelo

PARÁMETROS	VUELO I	VUELO II
Área de vuelo	39200 m²	38302 m²
Altura	60 m	50 m
Traslape longitudinal	80%	80%
Traslape transversal	80%	80%
Velocidad	10.8 km/h	10 km/h
Líneas de vuelo	9 transversales	6 longitudinales
N° de imágenes	58	70

Fuente. Propia

Figura 15

Vuelo de dron en app Pix4D



Fuente. Propia

Figura 16

Fotografía ortogonal de dron



Fuente. Propia

Dichos vuelos subministraron 158 imágenes totalmente ortogonales que posteriormente se emplearon para realizar los productos derivados del procedimiento (ver fase VI), dentro del proceso de georreferenciación del vuelo, se dispusieron doce (12) puntos de control terrestre foto identificables (Telas blancas con negro de 0.5m x 0.5m), los cuales fueron ubicados alrededor de toda el área de estudio y levantados durante la fase II del proyecto.

Adicionalmente se realizaron tres vuelos más, de manera manual con el objetivo de capturar una serie de escenas y fotografías de la zona, que nos permitieron complementar el aspecto audiovisual del proyecto (ver figura 17).

Figura 17

Fotografía panorámica del a las montañas del Cauca al sur oriente



Fuente. Propia

7.2.7. FASE IV: Escaneo láser 3D

Finalmente se realizó un escaneo de las zonas más relevantes, comprendidos por tres hipogeos (dos subterráneos y uno socavado) y dos cobertizos (estructura de protección para los hipogeos) un área aproximada de 640 metros cuadrados y un perímetro aproximado de 120 metros. Las configuraciones dadas variaron en cada escena, teniendo en cuenta factores como: escaneo de interiores o exteriores, calidad (espacio entre puntos), resolución,escaneo a color, ángulo horizontal y vertical, entre otros.

En los hipogeos se realizaron cuatro y seis escaneos lidar (primer y segundo hipogeo) respectivamente, distribuidos estratégicamente en diferentes posiciones. La configuración de los escaneos se estableció en calidad media, capturando información con nubes de puntos a color y con una duración aproximada de ocho minutos por cada escena escaneada. Debido a que los hipogeos son estructuras subterráneas sin ningún tipo de iluminación natural, fue necesario emplear un sistema de iluminación artificial. Este consistió en una extensión de bombillos LED de luz cálida, cuyo funcionamiento se alimentaba a partir de paneles solares recargables. Las luces se dispusieron de manera perimetral en el suelo del hipogeo, con el

objetivo de capturar adecuadamente los detalles del arte rupestre presente en las paredes y techos de la estructura. Adicionalmente y como parte estratégica para la unión de la información, se ubicaron cinco esferas en cada una de las escenas realizadas, tomándose como puntos en común y distribuidas teniendo en cuenta la visibilidad y cobertura completa del entorno (ver figura 18).

Figura 18

Toma de datos lidar dentro de hipogeo SA-5



Fuente. Propia

En el caso de las escenas capturadas en entornos exteriores o abiertos, la configuración del escáner se estableció en calidad media, adquiriendo información con nubes de puntos a color y con una duración aproximada de once minutos por cada escena y una resolución de 28.2

Megaptos/4x. Se realizó un total de dieciocho escaneos de manera consecutiva, siguiendo un flujo de oriente a occidente. Este flujo incluyendo los hipogeos SA-5, SA-4 y SA-3, el escaneo del hipogeo socavado y se procuró mantener una visualización adecuada de los puntos de control terrestre previamente georreferenciados.

Figura 19

Toma de datos lidar dentro de hipogeo SA-3 socavado



Fuente. Propia

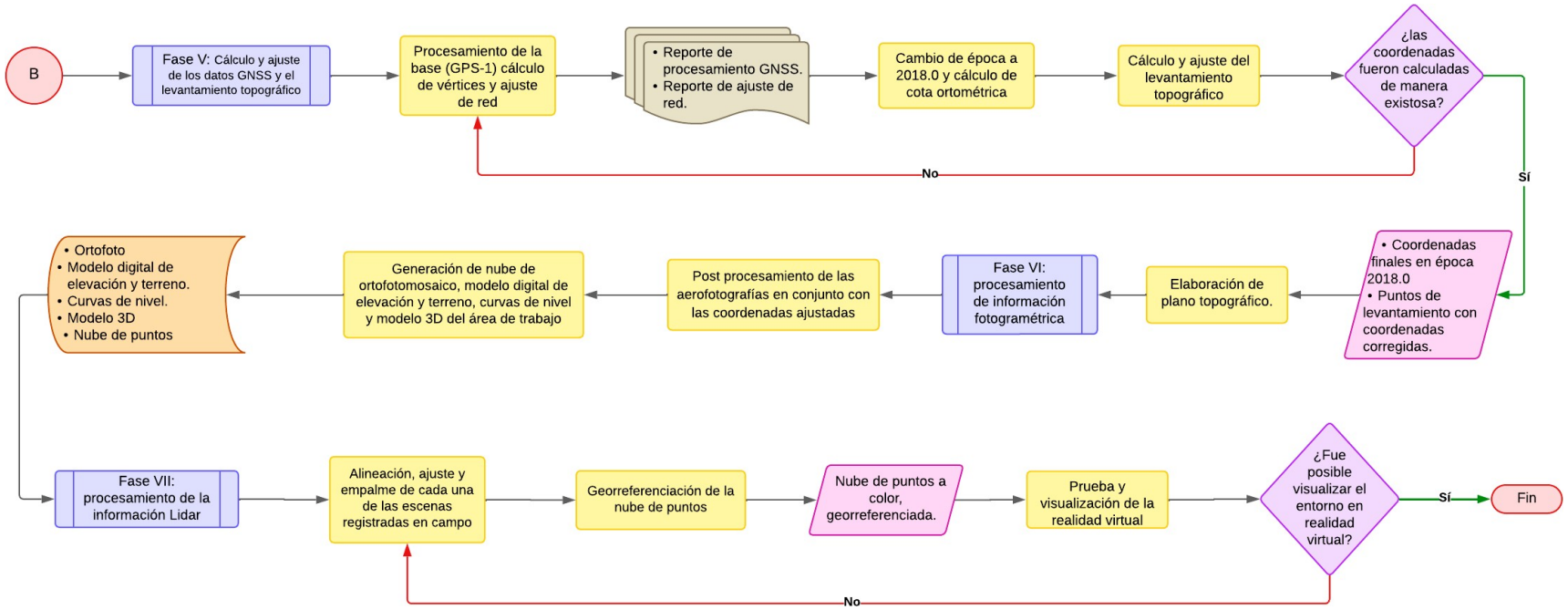
Como resultado, se obtuvieron dieciocho escenas escaneadas en total, conformando un circuito que logró registrar la mayor parte del área correspondiente al Alto de San Andrés. Esta cobertura posibilitó la adquisición de información detallada y fiel a las características reales del terreno y las estructuras presentes en el sitio arqueológico.

7.3. Metodología en oficina

7.3.1. Diagrama de flujo Metodología de oficina

Figura 20

Diagrama de flujo Metodología de oficina



Fuente. Propia

7.3.2. FASE V: Cálculo y ajuste de los datos GNSS.

A partir del proceso llevado a cabo en campo se realizó un cálculo y ajuste de los datos GNSS de cada una de las bases posicionadas, teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la resolución 388 de 2020 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Para dicho proceso se empleó software comercial Leica Infinity a partir de un flujo de trabajo usual, el cual se resume en dos procesos principales: la corrección y procesamiento de líneas base o vértices y el ajuste de la red, que para este caso se encuentra conformada por una única base posicionada.

Inicialmente, se organizó la información a procesar siguiendo la estructura de carpetas establecida en los parámetros expuestos por el IGAC (información necesaria para ambos softwares). Para ello, fue necesario descargar datos complementarios, comenzando por los archivos RINEX de las estaciones permanentes POPA, SILP, SUES y CALI de la red MAGNA-ECO, previamente seleccionadas para el posicionamiento en campo. Adicionalmente, se descargaron los archivos de efemérides precisas, soluciones semanales del SIRGAS y del IGAC, y el archivo de antenascalibradas de la NOA.

7.3.1.1. Leica Infinity

Antes de iniciar el procesamiento de la información fue necesario establecer los parámetros de configuración del proyecto, teniendo en cuenta el sistema de coordenadas en las cuales se trabajó el proyecto, que para el caso fueron coordenadas planas de Gauss-Kruger origen Oeste, considerando que dentro del inventario local del software no se encontraba dicho sistema fue necesario crearlo desde ceros siguiendo los parámetros establecidos para ello:

Tabla 4

Orígenes colombianos

Origen	Coordenadas Elipsoidales		Coordenadas Gauss-Kruger	
	Latitud (N)	**Longitud (W)**	**Norte [m]**	**Este [m]**
Bogotá-MAGNA	4° 35´ 46,3215”	74° 04´ 39,0285”	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Central – MAGNA	4° 35´ 46,3215”	71° 04´ 39,0285”	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Este – MAGNA	4° 35´ 46,3215”	68° 04´ 39,0285”	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste – MAGNA	4° 35´ 46,3215”	77° 04´ 39,0285”	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste Oeste – MAGNA	4° 35´ 46,3215”	80° 04´ 39,0285”	1 000 000,0	1 000 000,0

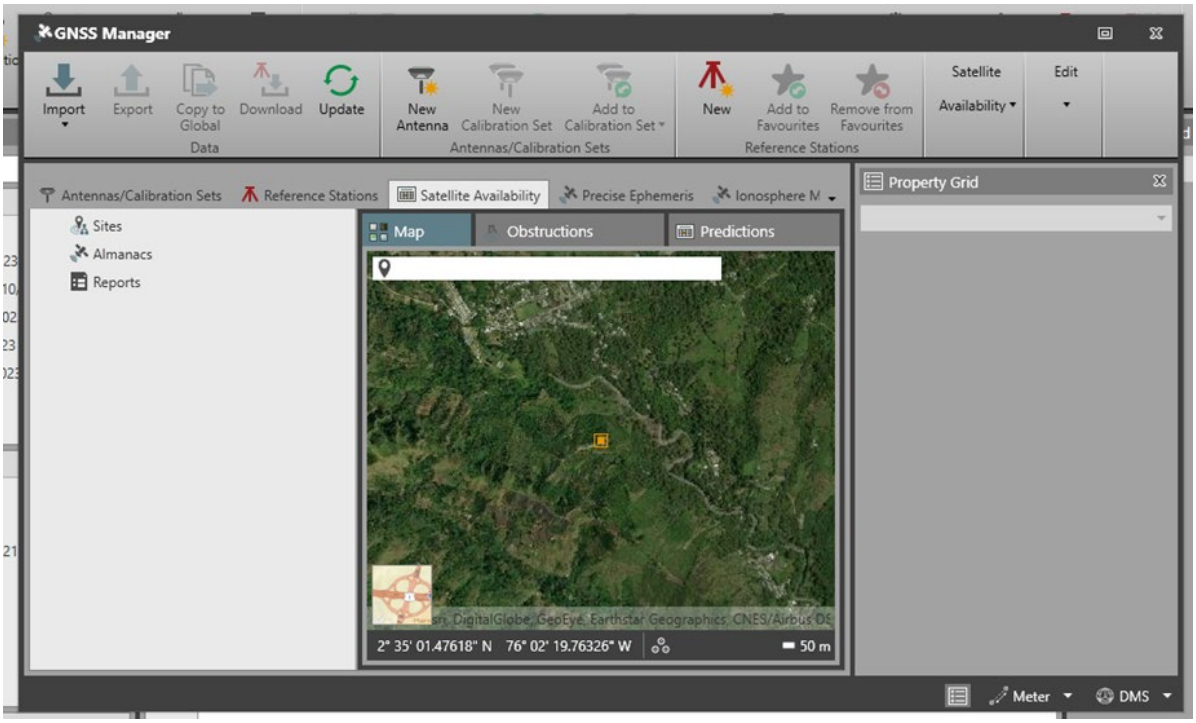
Fuente. Tomado de Instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2024.

Una vez creado y configurado el sistema de coordenadas, se procedió a crear el proyecto diligenciando la información base restante. La interfaz del software muestra un flujo de trabajo lógico de izquierda a derecha, siguiendo una metodología basada en pasos principales: primero, se importaron los datos RINEX correspondientes al punto rastreado y las cuatro bases seleccionadas para su ajuste. Además, se importó el archivo de efemérides precisas y antenas calibradas con el fin de cargar toda la información necesaria para el

procesamiento.

Figura 21

Inicio procesamiento GNSS en Leica Infinity



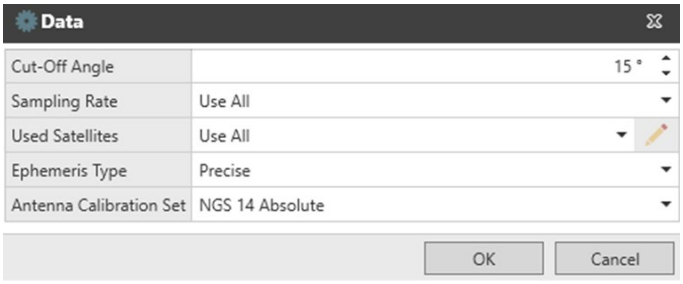
Fuente. Propia, Leica Infinity

A partir de esta información se realizó el cálculo y corrección de las líneas base (vectores), mediante una revisión minuciosa, se aseguraron y definieron datos como la altura instrumental, las bases de corrección y el punto a calcular. Empleando las soluciones semanales, se determinaron las coordenadas geocéntricas de cada una de las bases utilizadas para el ajuste, adicionalmente y para garantizar un mejor resultado, se llevó a cabo una limpieza de las sesiones de rastreo de cada uno de los puntos (tanto bases de corrección como punto posicionado). Los parámetros de procesamiento se establecieron teniendo en cuenta las condiciones de posicionamiento en campo, correspondientes a un ángulo de

apertura de 15°, las constelaciones de satélites GPS, GLONASS y GALILEO, el uso de efemérides precisas de los tres días correspondientes, frecuencias L1, L2 y E1, y una tasa de muestreo de 5 segundos. Cabe resaltar que todas estas configuraciones se encuentran especificadas en el reporte de procesamiento GNSS y el de ajuste de red (ver tabla de anexos).

Figura 22

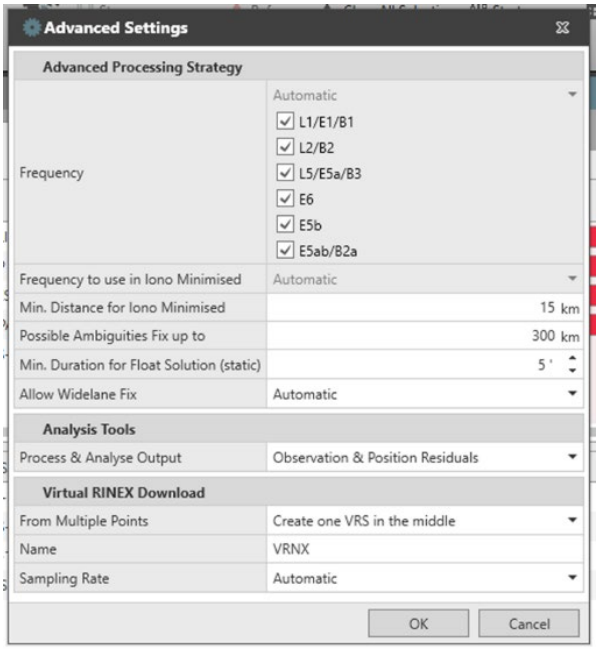
Data en Leica Infinity



Fuente. Propia, Leica Infinity.

Figura 23

Opciones avanzadas en Leica Infinity



Fuente. Propia, Leica Infinity.

Los valores arrojados en el cálculo y corrección de bases cumplieron los estándares previstos a excepción del vértice comprendido entre la estación de CALI y el punto GPS-1, los cuales presentaban la mayor distancia entre sí, por ende, dicho vértice no fue contemplado para el ajuste de red, considerando que el software permite escoger las bases con las que se realizará dicho procedimiento. Finalmente, a partir de los vectores calculados, se procedió a ajustar la red geodésica empleando la herramienta de ajuste en 2D y 3D del software. El ajuste se realizó considerando las tres bases fijas utilizadas en el proceso inicial (SILP, POPA y SUES) (ver figura 24).

Figura 24

Esquema de determinación



Fuente. Propia, Leica Infinity.

Como se estipula en la normativa del IGAC, las coordenadas fueron trasladadas a la época de referencia 2018.0, empleando el software MAGNA SIRGAS PRO 5.0, de igual manera las coordenadas fueron transformadas a los cuatro sistemas de coordenadas más relevantes:

Origen Único Nacional, Planas cartesianas de Gauss-Kruger, elipsoidales y geocéntricas. Considerando que el procesamiento se desarrolló a partir de cotas elipsoidales, se empleó la ondulación geoidal en ese punto, con el fin de calcular la cota ortométrica, dándole un mayor acercamiento al nivel verdadero de la zona en estudio y realizar la corrección del levantamiento, con el fin de obtener coordenadas ajustadas en la época requerida.

La corrección del levantamiento topográfico se realizó utilizando el software EXCEL. Tomando como referencia la base ajustada, se calcularon las diferencias entre las coordenadas finales obtenidas y las coordenadas del chequeo realizado en campo mediante corrección en tiempo real. Estas diferencias permitieron efectuar los ajustes horizontales y verticales necesarios sobre la totalidad de los datos levantados topográficamente.

Tabla 5

Cuadro de análisis de Leica Infinity

Cuadro de análisis de Leica Infinity

Aspecto	Leica Infinity
Interfaz de usuario	Interfaz intuitiva con una disposición lógica de las herramientas y paneles. Menús contextuales y herramientas agrupadas por función, siguiendo un flujo de trabajo lógico.
Procesamiento de datos	Configuración y definición de parámetros de procesamiento, fáciles de identificar y entender No cuenta con un inventario amplio de sistemas de coordenadas, no se contempla mayor información con respecto a los países de América del Sur No cuenta con un inventario de modelos geoidales que sea aplicable a estas zonas del país.

	La optimización de los datos se realiza de una manera fácil y práctica, en conjunto con una buena visualización de la información. La definición de puntos base y el diligenciamiento de las coordenadas es mucho más eficiente y práctica en comparación a otros softwares.
Visualización de la información.	Las herramientas adicionales como el visualizador de Google Earth permitieron confirmar la veracidad de los datos. La visualización de las sesiones de rastreo, diferenciadas a su vez en colores según su calidad, facilitaron la optimización de la información Los paneles por separado entre la información de los puntos y su respectiva configuración, permitieron mantener un proceso lógico entre procesamientos
Precisiones y resultados	Los resultados del procesamiento de líneas base se dieron a partir de una serie de iteraciones realizadas, se procuró no tener un M0 mayor a 1.0 en cada vector. La determinación de las bases empleadas para el ajuste de red, así como los ajustes horizontales y verticales, permitieron definir únicamente las bases con mejores resultados, dejando un F-test dentro de las tolerancias establecidas

Fuente. Propia, Leica Infinity.

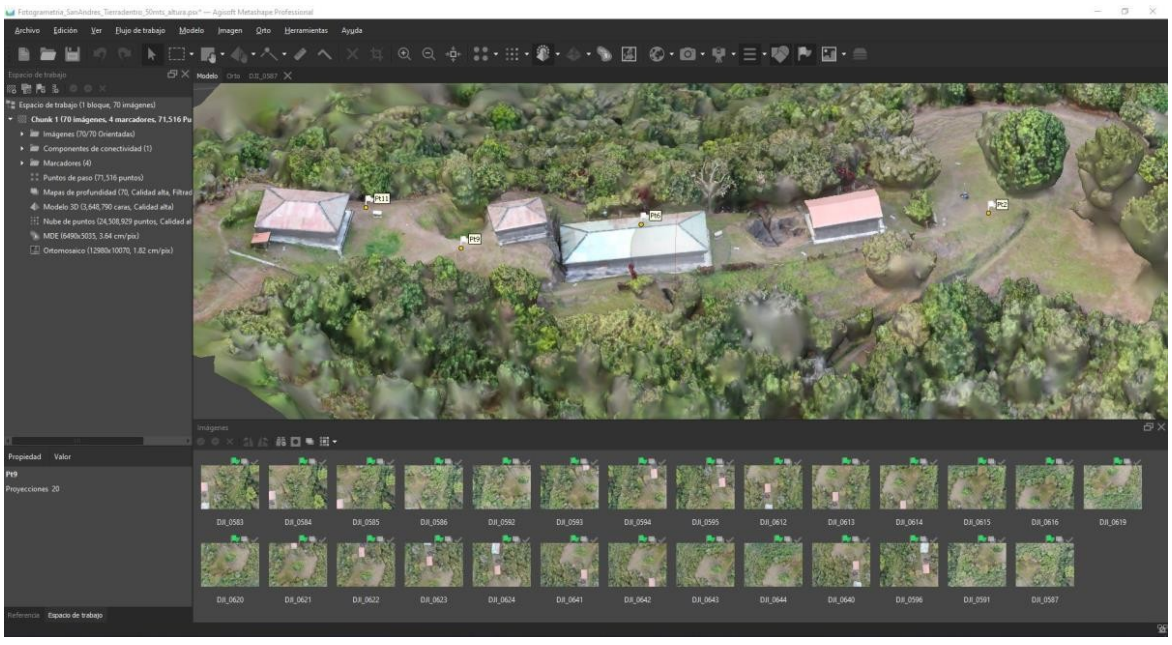
7.3.2. FASE VI: Procesamiento de información fotogramétrica.

Según el proceso ejecutado en campo se realizará el post procesamiento de las aerofotografías para generar los productos requeridos y mencionados en el alcance del proyecto. Una vez seleccionadas las fotografías, se eligió el software Agisoft Metashape Professional para su procesamiento. Inicialmente, de las 158 fotografías iniciales, se seleccionaron 70 tomadasen un vuelo a 60 metros de altura, siendo este el grupo óptimo

para que Metashape, mediante correlación de píxeles, alineara 70 de ellas en alta calidad. Posteriormente, considerando 12 puntos de control ubicados sobre la superficie del área de trabajo, se seleccionaron los 4 mejores puntos con coordenadas previamente corregidas por el levantamiento RTK. De acuerdo con la ubicación y coordenada de cada punto, se genera un error medio cuadrático y un error en píxel, factores que determinan la calidad de la georreferenciación del modelo. A partir de las fotografías, se generó una nube de puntos de 27.350.069 puntos en alta calidad, debido al nivel de detalle requerido para caracterizarel área de trabajo, evidenciando detalladamente el hipogeo socavado, las cubiertas y la topografía completa del lugar (ver figura 25). Posteriormente, esta nube de puntos densa se correlacionará y unirá con la nube del escaneo lidar realizado.

Figura 25

Procesamiento en Agisoft Metashape



Fuente. Propia, Agisoft Metashape.

Después de la georreferenciación, la generación de la nube de orto mosaico, el modelo

digital de elevación (MDE) y terreno, así como las curvas de nivel y el modelo 3D del área de trabajo, son funciones vitales para la obtención de información detallada y precisa del entorno escaneado. Estas herramientas permiten una representación exhaustiva del terreno y la topografía, facilitando su análisis y visualización. La nube de orto mosaico ofrece una vista corregida del área escaneada, entre tanto que el MDE y el terreno proporcionan datos sobre elevaciones y características del terreno, complementados por las curvas de nivel que ofrecen una comprensión visual de la topografía. Además, el modelo 3D permite una representación tridimensional completa del entorno, facilitando su aplicación en campos como la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la arqueología.

Estas funciones son esenciales para una variedad de aplicaciones, desde la planificación de rutas hasta la evaluación de riesgos naturales. La combinación de la nube de orto mosaico, el MDE ylas curvas de nivel proporciona una representación precisa del terreno, entre tanto que el modelo 3D ofrece una vista tridimensional detallada del área de trabajo. Esto permite a los usuarios analizar yvisualizar el entorno escaneado con gran precisión, facilitando la toma de decisiones informadas enuna variedad de campos profesionales. En resumen, estas herramientas en Metashape son fundamentales para la obtención y comprensión de datos topográficos y tridimensionales a partir de escaneos, impulsando la eficiencia y la precisión en el proyecto.

Figura 26

Orto mosaico en Agisoft Metashape



Fuente. Propia, Agisoft Metashape.

Se presenta el cuadro de análisis del software Agisoft Metashape, (ver tabla 6).

Tabla 6

Cuadro de análisis de Agisoft Metashape

Cuadro de análisis de Agisoft Metashape	
Aspecto	**Determinación**
Interfaz de usuario	Interfaz intuitiva y fácil de usar, con una disposición lógica de herramientas y paneles. Navegación sencilla y acceso rápido a las funciones principales del software. Personalización limitada de la interfaz en comparación con otros programas similares.

Procesamiento de imágenes	Potentes herramientas para el procesamiento de imágenes digitales y la generación de modelos 3D a partir de fotografías. Algoritmos avanzados de correlación de imágenes para la creación de modelos precisos y detallados. Capacidad para procesar grandes conjuntos de datos de manera eficiente. Soporte para imágenes de alta resolución y de diferentes tipos (RGB, multiespectral, térmicas, etc.).
Generación de modelos	Funciones para generar modelos 3D texturizados, ortofotos y mallas digitales a partir de las imágenes procesadas. Herramientas para la creación de modelos digitales del terreno (DEM) y modelos de superficie. Opciones para la optimización y edición de modelos generados, como la eliminación de artefactos y la suavización de superficies.
Exportación	Soporte para una variedad de formatos de archivo para la exportación de modelos y datos, incluyendo OBJ, PLY, DXF y Geo TIFF, entre otros. Integración con software de diseño y GIS para facilitar el intercambio de datos y la colaboración en proyectos.
Precisión	Reconocido por su precisión en la generación de modelos 3D a partir de imágenes fotográficas. La precisión final depende en gran medida de la calidad y la cantidad de las imágenes utilizadas en el proceso de modelado.
Topografía	Su fuerte es la fotogrametría de espacios o topográficos

Fuente. Propia

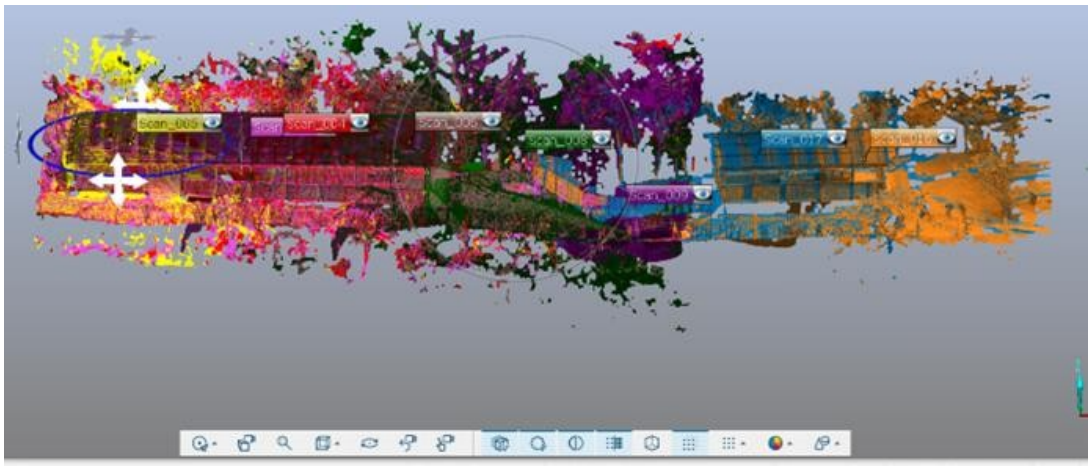
7.3.3. FASE VII: Procesamiento de información LIDAR.

Se escoge el software de la misma casa Faro Technologies llamado Faro Scene, para el procesamiento de nubes de puntos 3D capturadas por escáneres láser. Permite registrar y alinear múltiples escaneos, editar y limpiar los datos, realizar mediciones y anotaciones precisas, generar mallas 3D a partir de las nubes de puntos, exportar los datos en diversos formatos. Es ampliamente utilizado en industrias como construcción, arquitectura, ingeniería, fabricación, topografía y preservación del patrimonio cultural, donde la captura y procesamiento preciso de datos 3D es fundamental.

Faro Scene proporciona un ambiente de trabajo ergonómico e intuitivo, con un flujo de trabajo ordenado de izquierda a derecha. Comienza con la creación del proyecto, seguido de la importaciónde los 18 escaneos realizados en campo. Estos escaneos se organizan en tres grupos diferentes, uno por cada hipogeo, en tanto que el grupo restante contiene los escaneos de la superficie. De esta manera, se genera una conexión entre todo el espacio de trabajo, abarcando los ingresos a los dos hipogeos principales, el hipogeo socavado y el ingreso al cuarto hipogeo, al cual no se pudo acceder por razones de seguridad. Este enfoque sistemático facilita la gestión y el procesamiento de los datos de escaneo en un entorno cohesivo y eficiente, teniendo un procesamiento individualizado de estos tres grupos, ya que se refleja en oficina que hizo falta unas escenas de conexión al ingreso de los hipogeos.

Figura 27

Registro de escenas Faro Scene



Fuente. Propia, Faro Scene.

En el procesamiento de los escaneos se pueden definir los criterios de este, tales como hacer la creación de puntos de escaneo, y fundamentalmente la coloración activada, se puede configurar filtros de distancia o escenas en oscuridad o filtros de movimiento donde se podrá seleccionar la sensibilidad o el umbral de superposición y la iteración del procesamiento las cuales entre más iteraciones sube la calidad, pero más tiempo de procesamiento y para su posterior registro se define qué objetivos se tuvieron en el momento del escaneo, en este caso se seleccionó esferas y marcadores. Se procesa por grupo individualmente. Faro Scene, otorga la posibilidad de generar un informe por cada procesamiento donde se pueden evaluar la calidad de este.

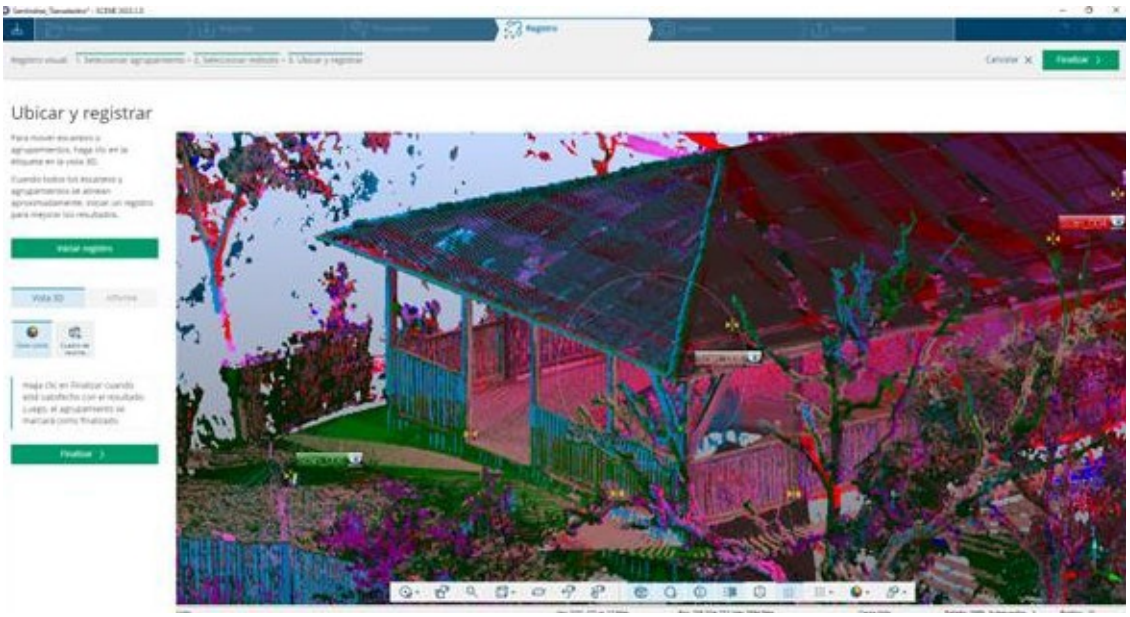
El registro de escaneos es una de las funciones clave de Faro Scene. Este proceso permite combinar múltiples escaneos individuales realizados en campo en un único modelo 3D completo y coherente. La alineación precisa de los escaneos es fundamental para obtener una representación precisa del entorno escaneado. El software utiliza algoritmos avanzados para identificar automáticamente objetivos y características comunes entre los diferentes

escaneos. Utilizando estos puntos de referencia compartidos, realiza una alineación inicial aproximada de los escaneos superpuestos. Luego, emplea técnicas de ajuste fino para optimizar y refinar esta alineación, minimizando las discrepancias entre las áreas superpuestas. Durante el proceso de registro, se puede visualizar los escaneos alineados en una vista 3D y verificar visualmente la calidad del alineamiento. Es posible identificar y corregir manualmente cualquier desalineación o problema antes de proceder a la unión final de los escaneos.

Una vez que los escaneos están correctamente alineados, el software los combina en un único modelo 3D unificado, eliminando las áreas superpuestas redundantes y fusionando los datos de nube de puntos. Este modelo unificado proporciona una representación completa y precisa del entorno escaneado, lo que sienta las bases para el posterior análisis y aprovechamiento de los datos.

Figura 28

Ubicación y registro de nubes de puntos

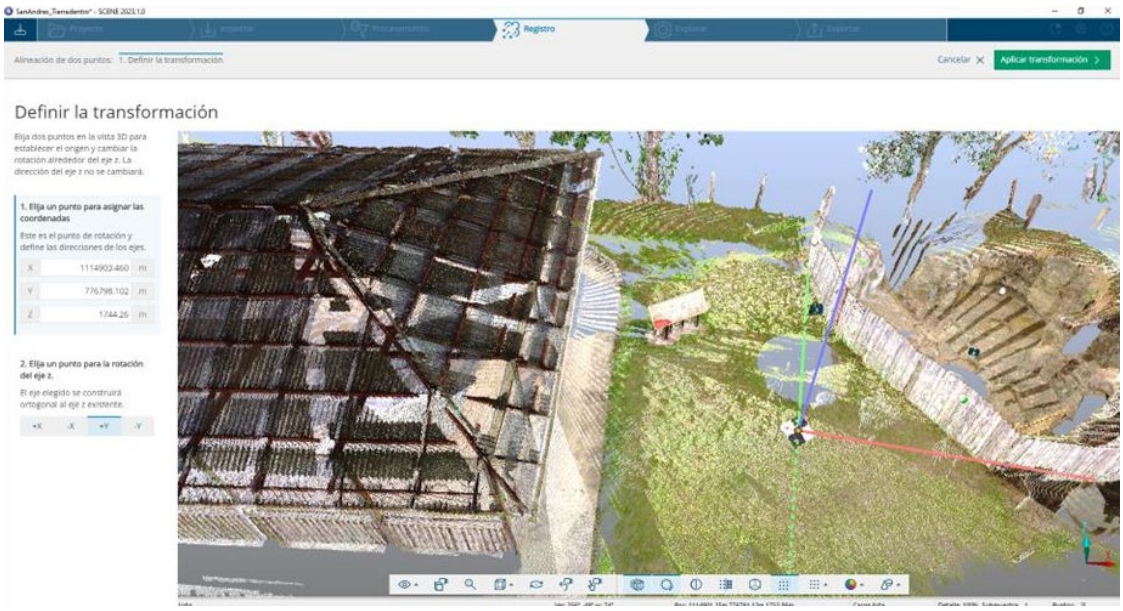


Fuente. Propia, Faro Scene

Se realiza la georreferenciación del proyecto con los puntos de control, en el escaneo se evidencian 2 puntos de control, de los que se puede hacer una alineación manual precisa entre dos escaneos usando la herramienta de alineación por dos puntos. Este proceso implica identificar puntos de referencia comunes y distintivos en ambos escaneos, luego utilizar la herramienta "Añadir vínculo de puntos" para seleccionar un punto en un escaneo y el punto correspondiente en el otro, creando un vínculo o restricción entre ellos. Se repite esto para agregar varios vínculos de puntos no colineales, al menos tres. Posteriormente, se utiliza la herramienta "Aplicar alineación" para que el software calcule y ajuste la transformación necesaria para alinear los dos escaneos de acuerdo con los vínculos establecidos. Finalmente, se verifica visualmente la alineación resultante y se miden distancias adicionales para refinar si es necesario, agregando más vínculos. Esta herramienta brinda un control manual preciso sobre la alineación de escaneos.

Figura 29

Georreferenciación Faro Scene



Fuente. Propia, Faro Scene.

Figura 30

Panorámica desde Faro Scene



Fuente. Propia, Faro Scene.

Para limpiar escaneos y eliminar manualmente puntos de las escenas, se sigue un proceso detallado. Se identifican áreas problemáticas o puntos no deseados en la nube de puntos yse utilizan herramientas de filtrado y selección para marcar los puntos a eliminar. Luego, se emplean funciones de eliminación manual para seleccionar y eliminar los puntos no deseados uno a uno o en grupos, asegurando que la calidad general de la nube de puntos no se vea afectada. Este proceso implica una revisión cuidadosa y minuciosa de la escena para garantizar que se eliminen los puntos no válidos mientras se conservan los datos esenciales para el análisis posterior. Además, se pueden aplicar técnicas de interpolación o suavizado para rellenar áreas donde se han eliminado puntos, manteniendo la coherencia y la integridad de la nube de puntos resultante. Esta metodología proporciona un control manual efectivo para mejorar la calidad y la precisión de los datos de escaneo, preparándolos para su uso en aplicaciones posteriores.

Con los escaneos terminados, se puede realizar una exploración en realidad virtual, una vez que se ha completado el modelo 3D optimizado, se puede integrar en plataformas de realidad virtual como Oculus Rift, HTC Vive, o dispositivos móviles con soporte para RV. Esto implica la configuración de la escena, la implementación de interactividad y la creación de una experiencia inmersiva.

Figura 31

Visualización en realidad Virtual en Faro Scene



Fuente. Propia, Faro Scene.

Características del software Faro Scene:

Tabla 7

Cuadro de análisis de Faro Scene

Cuadro de análisis de Faro Scene

Aspecto	Determinación
Interfaz de usuario	Interfaz intuitiva y fácil de usar.

	Amplia gama de herramientas accesibles a través de una interfaz clara. Personalización de la interfaz para adaptarse a las preferencias del usuario.
Registro de nubes de puntos	Ofrece varias opciones para el registro de nubes de puntos, incluyendo métodos automáticos y manuales. Capacidad para manejar grandes conjuntos de datos de forma eficiente.
Visualización	Potentes herramientas de visualización en 3D para explorar los datos de manera efectiva. Herramientas de visualización flexibles que permiten la personalización de la presentación de datos.
Edición de datos	Herramientas básicas de edición para limpiar, filtrar y modificar datos de escaneo. Funciones para eliminar puntos atípicos, suavizar superficies y realizar mediciones básicas.
Exportación	Soporte para una amplia gama de formatos de archivo, incluyendo nubes de puntos, modelos 3D y planos. Integración con software de diseño y modelado para facilitar el flujo de trabajo.
Precisión	Buenas capacidades de registro y alineación que permiten alcanzar resultados precisos. Requiere una comprensión sólida de los principios de la nube de puntos para obtener resultados precisos.

Fuente. Propia, Faro Scene.

7.3.4. Procesamiento en Leica Cyclone Register 360

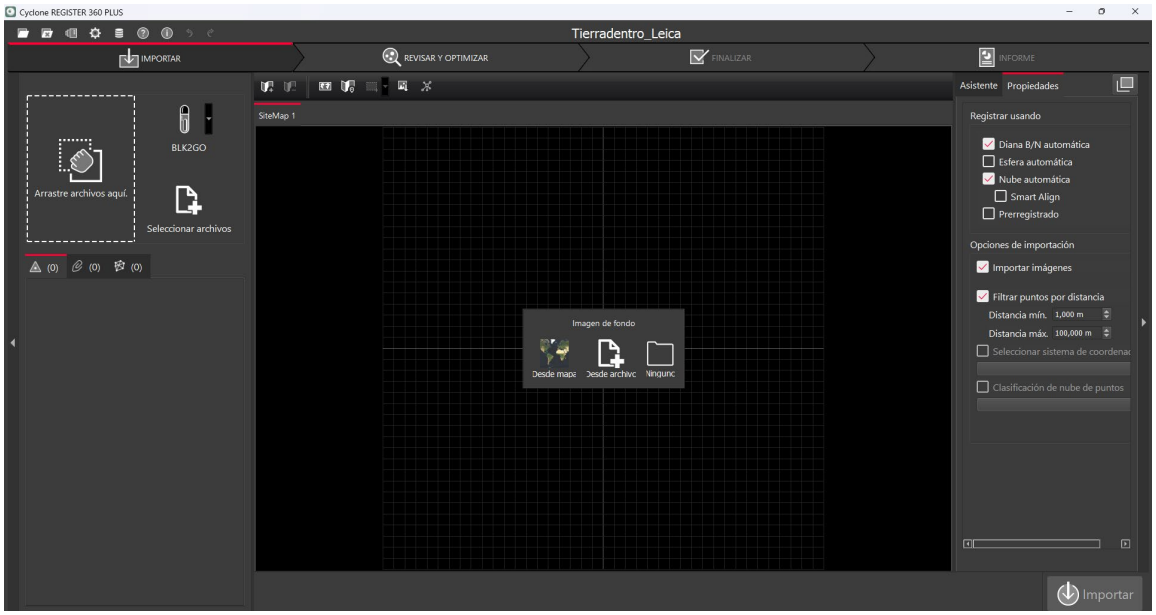
Como parte de un ejercicio académico y con la finalidad de realizar una comparativa entre softwares, se lleva a cabo el procesamiento de la información LIDAR en el software comercial Leica Cyclone Register 360; a pesar de que los procesos tienen el mismo principio

las funciones que fueron evaluadas parten desde la importación de la información, el enlace y unión de las escenas y los procesos de georreferenciación de la información.

El software posee una interfaz muy intuitiva, la cual consta de cuatro (4) etapas generales del proyecto: importación, revisión y optimización, final e informe, dichas etapas resumen en general el procesamiento de la información, se encuentran ubicadas de izquierda a derecha en un sentido secuencial y fácil de identificar.

Figura 32

Interfaz inicial Leica Cyclone Register 360



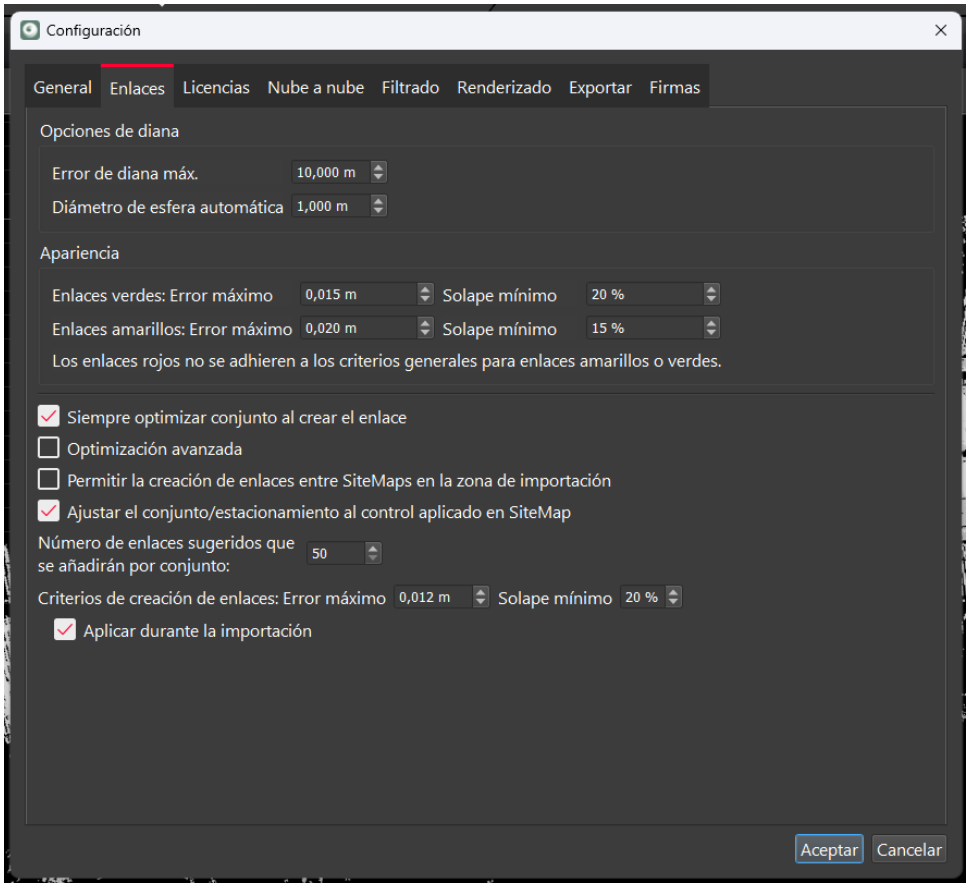
Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

Antes de comenzar a trabajar la información fue necesario verificar la configuración del proyecto, en la opción “Configuración” ubicada en el costado superior izquierdo, allí se configuraron: unidades, visualización, opciones de importación, ubicaciones de salidas y guardado, opciones de dianas, errores máximos, criterios de creación de enlaces, iteraciones, renderizado y opciones de exportación de la información. Todo basado en las condiciones de la información a trabajar, la capacidad del equipo en el que se trabajó y las necesidades del

proyecto.

Figura 33

Panel de configuración de parámetros Cyclone Register 360



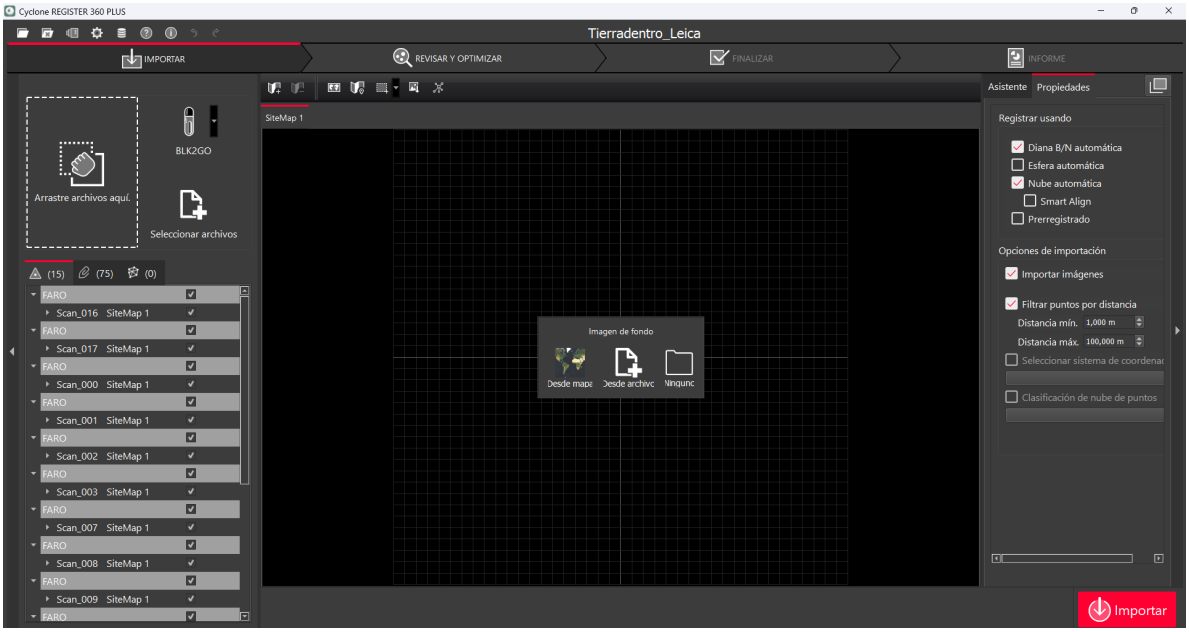
Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

Una vez configurado el proyecto en la ventana de importar, se carga la información a trabajar (para el caso, 18 escenas desde FARO) los archivos se pueden arrastrar hacia el software o en la opción de importar se busca la ruta de los archivos, una vez cargados y reconocidos, la información recibida se puede visualizar en el panel ubicado en el lado izquierdo de la pantalla; en un panel al costado derecho se puede activar o desactivar la información y acciones que se desea que el software realice una vez se importe la información, para este caso se trabajó con: la importación de las imágenes 360, el filtrado de puntos con una

distancia mínima de un (1) metro y máxima de 100 metros y el registro automático empleando dianas y/o por nubes automáticamente.

Figura 34

Ventana de importación – visualización de archivos a importar

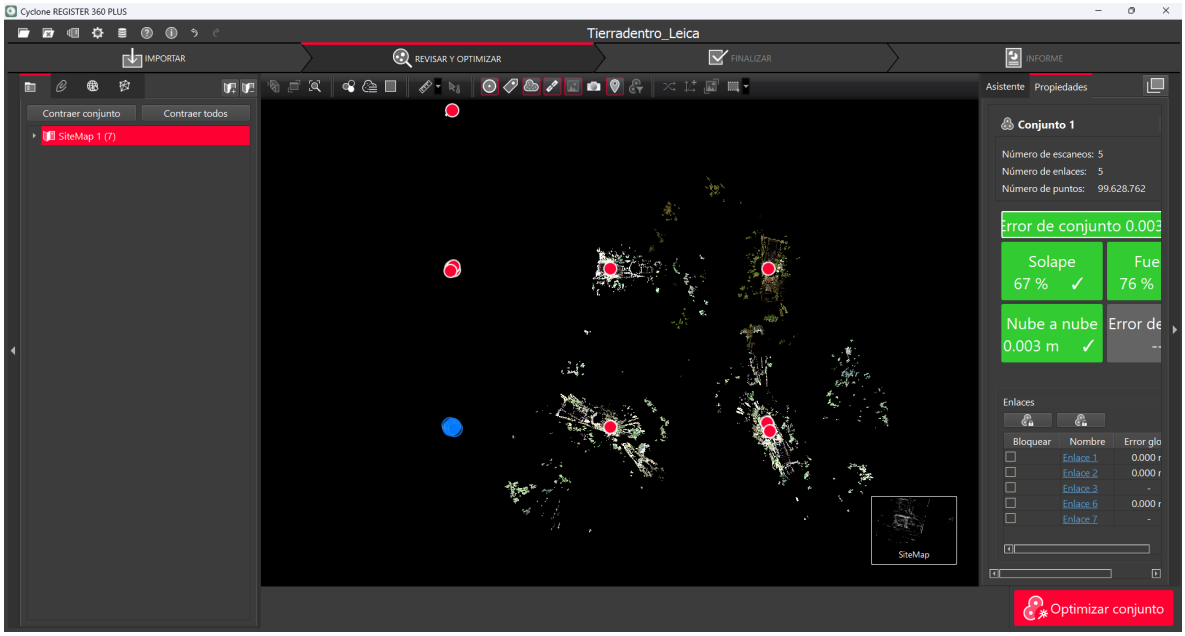


Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

El proceso de importación tardará dependiendo la capacidad el equipo en el que se realice el proceso, esto debido a que él realiza una primera unión automática de las escenas a partir de las opciones configuradas anteriormente, sin embargo, al finalizar, el software automáticamente abrirá la segunda ventana de trabajo “Revisar y optimizar” en donde se podrán visualizar las nubes cargadas y registradas, se visualizarán los enlaces de cada una de estas dividido en colores que evidencian la precisión y empalme con la que se encuentran unidos.

Figura 35

Ventana de revisión y optimización – Información empalmada automáticamente

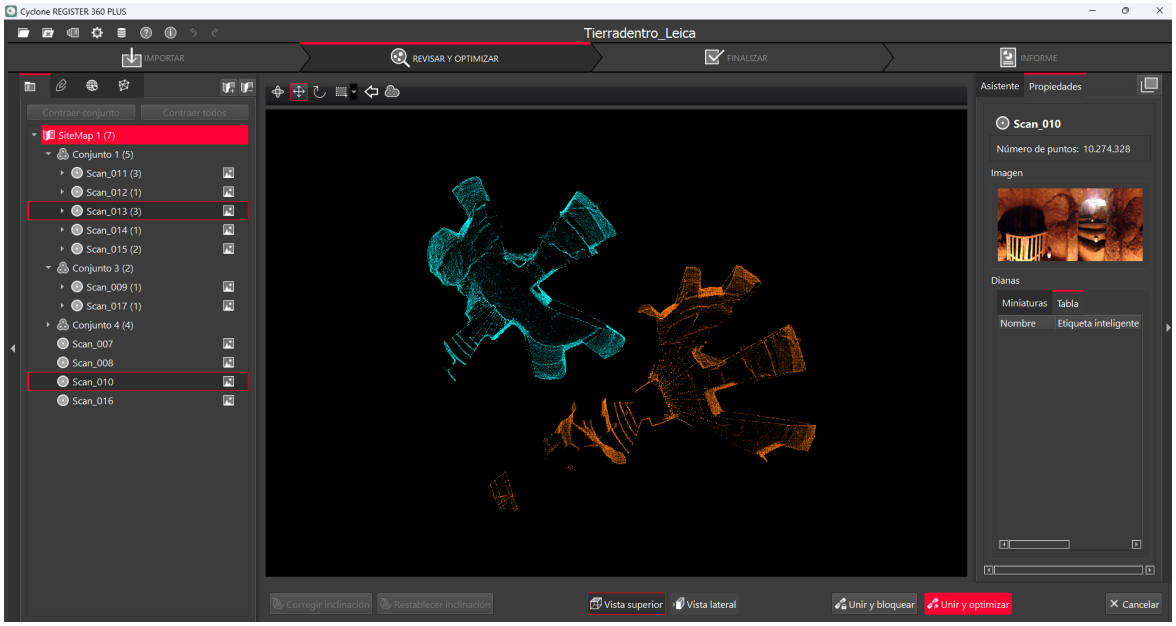


Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

Cada una de las esferas rojas representa una escena, las cuales se agruparon dependiendo la vinculación que se llevó a cabo automáticamente, a partir de aquí se realizó un empalme de cada una de las escenas para elaborar todo el entorno trabajado, teniendo en cuenta los desniveles presentes en los hipogeos. Dentro de las herramientas del software hay cuatro opciones de empalme, la primera opción es de manera automática, la cual no fue empleada ya que las escenas trabajadas ya habían sido sometidas al proceso automático y no fueron identificadas; la segunda, a partir de la ubicación y reconocimiento de las dianas, sin embargo estas no fueron usadas ya que en zonas como los desniveles no se contaba con una conexión directa como la de la diana, la tercera, alineación visual, para este caso fue la más empleada, ya que permite visualizar las nubes individualmente desde una vista tanto horizontal como de perfil, lo que permitió empalmar a pesar de los desniveles presentados y empleando las estructuras principales como puntos de referencia para la unión.

Figura 36

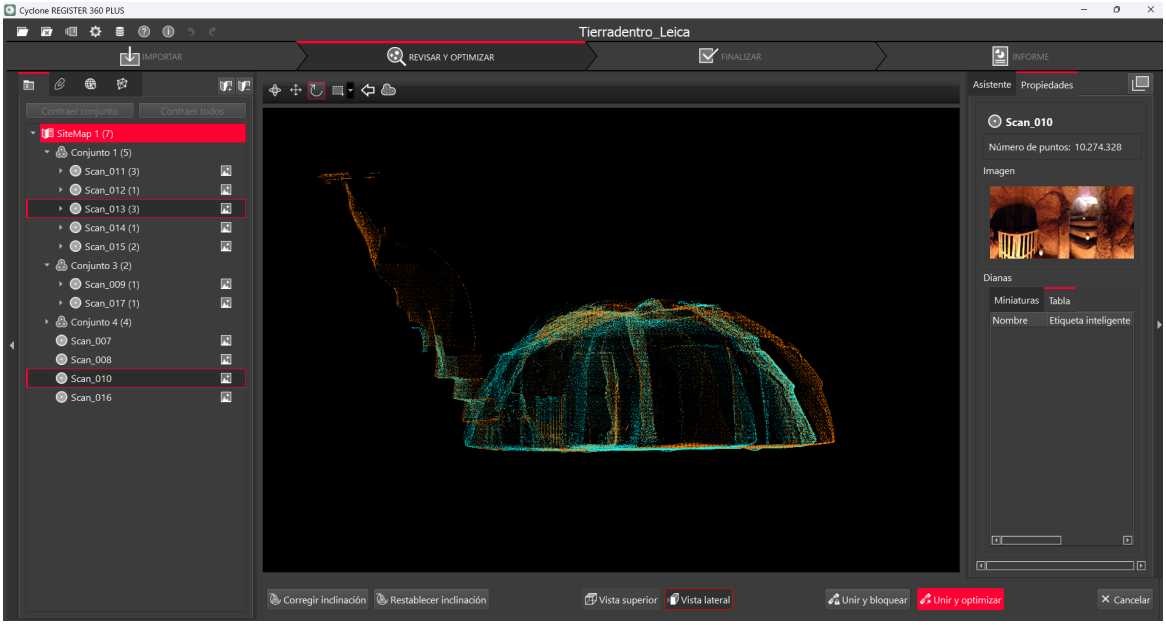
Unión por alineación visual Hipogeo #5 – Vista horizontal



Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

Figura 37

Unión por alineación visual Hipogeo #5 – Perfil

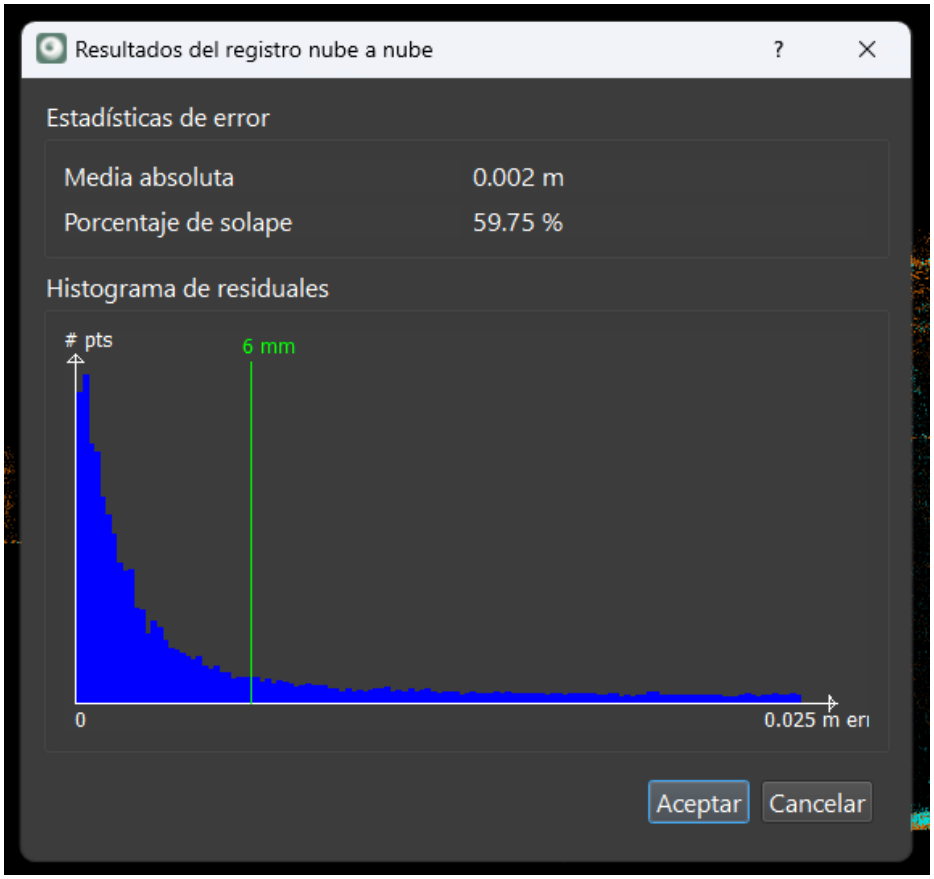


Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

La escena de color naranja es la de referencia, a diferencia que la escena de color azul es la que se desplaza y ubica para el proceso de empalme, esto se realiza a través de las herramientas encontradas en el costado superior izquierdo de la ventana de trabajo, tomando como puntos en común elementos fácilmente identificables como columnas, techos, entre otros. Una vez realizado dicho proceso tanto en la vista horizontal como transversal, se optimiza la unión, la cual arrojara un valor de solape y la media de dicha unión.

Figura 38

Resultados de registro por alineación visual



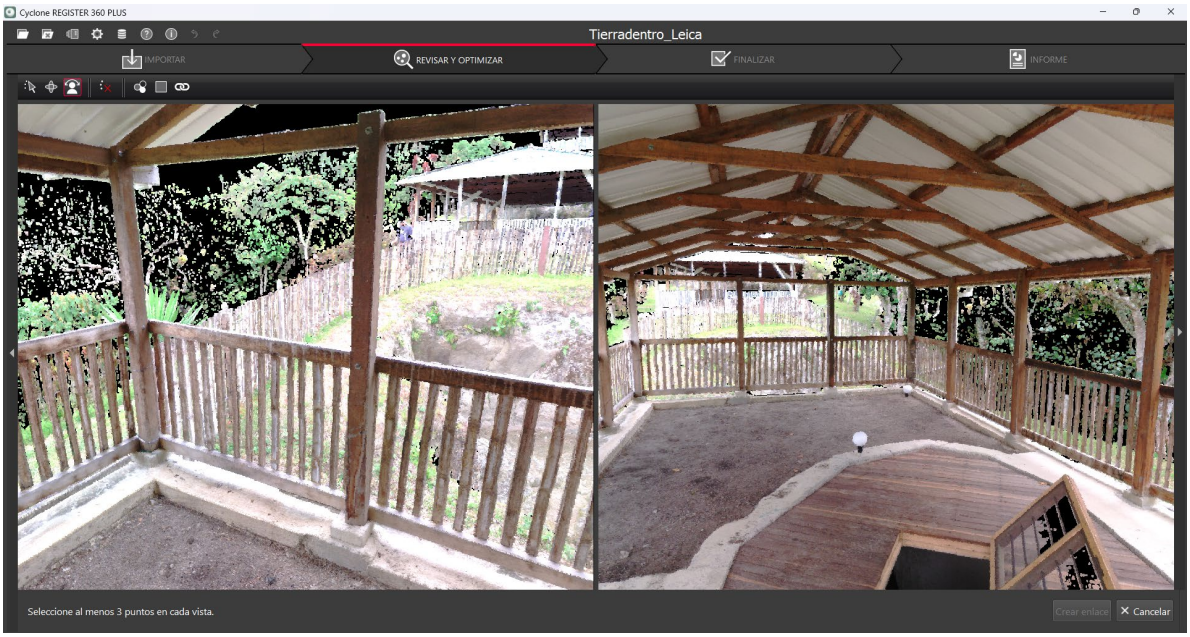
Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

Por último, se encuentra la división de vista, el cual divide la pantalla con una escena en cada lado, vistas desde la posición del equipo, sin embargo, con opciones de orbitar cada nube,

para el caso, esta opción fue empleada únicamente en las zonas exteriores donde los puntos en común eran más identificables, para algunas escenas en específico se emplearon las esferas y dianas, considerando que el software requiere de mínimo tres (3) puntos en común para generar la unión.

Figura 39

Unión por división de vista

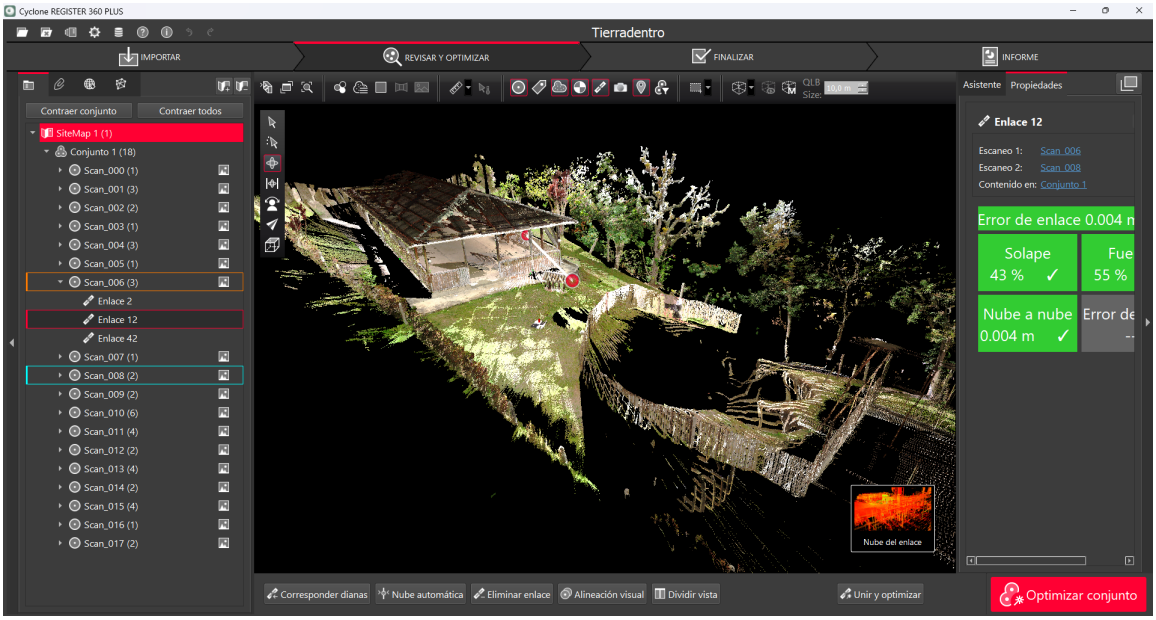


Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

Este proceso se repite para todas las escenas hasta lograr la unión por completo del entorno escaneado. Una vez unida toda la nube el software permite optimizar la unión por completo, considerando los factores que limitaron las condiciones durante la ejecución de las actividades de campo, algunas zonas no contaron con uniones precisas o con altos niveles de empalme, sin embargo, se generó el entorno con buenas precisiones.

Figura 40

Visualización de la nube de puntos en conjunto



Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

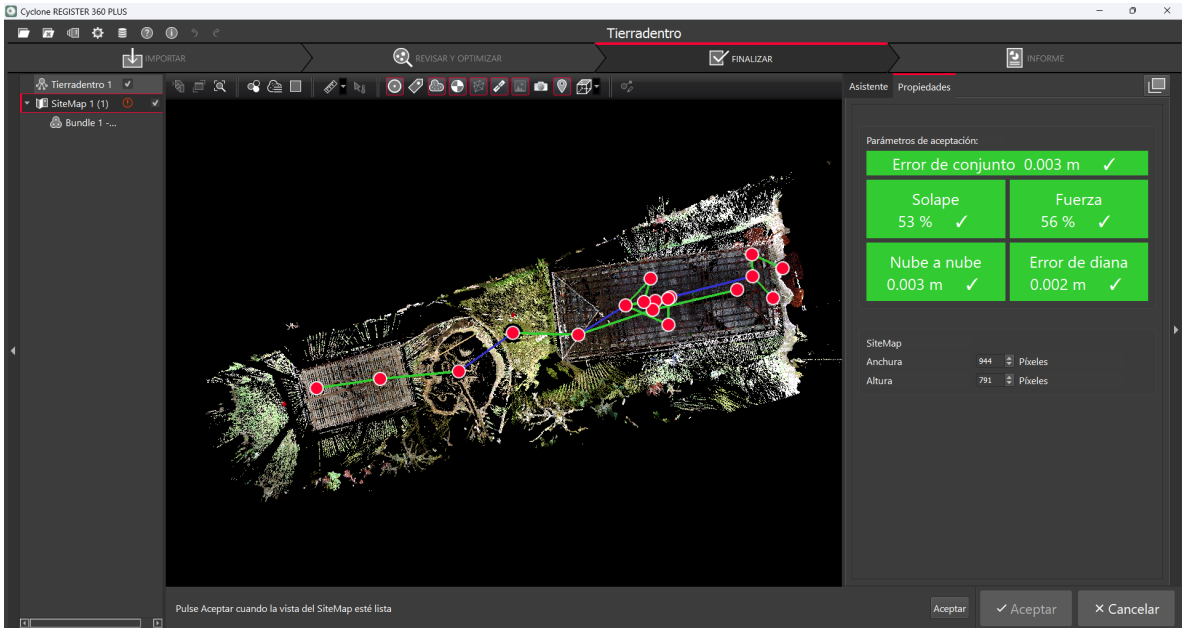
Con el fin de mejorar y depurar la información se empleó la herramienta “Rectangular” la cual permite la selección de la información que se tomó en las periferias (ruido) para realizar una limpieza de la misma y manejar únicamente los datos necesarios. El proceso de georreferenciación se realizó empleando los mismos puntos de control usados en el software de FARO, sin embargo, los requerimientos del software exigen por lo menos tres puntos de control para asignar y calcular precisiones según las coordenadas, a pesar de ello, la nube de puntos se puede georreferenciar empleando softwares adicionales como Recap, Global Mapper, entre otros.

En la sección de “Finalizar”, posterior a haber realizado la unión y optimización de la nube por completo, el software muestra en el panel del costado derecho los parámetros de aceptación, en los cuales se tiene en cuenta el error en conjunto, el solape, la fuerza, el error nube a nube y el error en dianas, resumiendo si según los criterios establecidos para el

proyecto, este cumple o no. Una vez verificados los datos, se acepta el resultado para proceder a la exportación de la información.

Figura 41

Parámetros de aceptación de la nube final



Fuente. Propia, Cyclone Register 360.

Por último, en la ventana "Informe" se encuentran todas las opciones de archivos exportables, en este caso se exportaron archivos. LAS. LGS. RCP. E57 y TruView. A continuación, se presenta un cuadro en donde se relacionan las características en comparación con los mismos aspectos evaluados para FARO.

Tabla 8

Características Leica Cyclone

Cuadro de análisis de Leica Cyclone	
Aspecto	**Leica Cyclone**
Interfaz de usuario	Interfaz también intuitiva, con una curva de aprendizaje similar a Faro Scene.

Registro de nubes de puntos	Organización lógica de herramientas y paneles para una navegación fluida. Menús contextuales que facilitan el acceso a las herramientas relevantes según el contexto. Algoritmos de registro avanzados que permiten una alineación precisa de múltiples escaneos. Excelente rendimiento incluso con grandes volúmenes de datos gracias a la optimización del software.
Visualización	Visualización en tiempo real de nubes de puntos con capacidades de renderizado avanzadas. Opciones para visualizar datos en diferentes formatos y representaciones (puntos, superficies, etc.).
Edición de datos	Amplio conjunto de herramientas de edición para refinar y mejorar la calidad de los datos. Capacidades avanzadas de edición, como la creación de modelos de superficie, alineación de objetos y segmentación de datos.
Exportación	Posibilidad de exportar datos a formatos estándar de la industria para su uso en otros programas.
Precisión	Se recomienda una formación especializada para aprovechar al máximo las capacidades de precisión del software.

Fuente. Propia, Leica Cyclone Register 360.

7.3.5. Aproximación de alineaciones astronómicas del alto de San Andrés

Se llevaron a cabo diversas simulaciones astronómicas utilizando los softwares especializados Stellarium y 3D Sunpath. Dichas simulaciones permitieron determinar con precisión la posición y dirección del Sol durante eventos clave del ciclo solar, tales como los solsticios de verano (21 de junio) e invierno (21 de diciembre), los equinoccios de primavera (21 de marzo) y otoño (21 de septiembre), así como el paso del Sol por el cenit. Estas herramientas digitales ofrecen una representación fidedigna de los movimientos celestes, facilitando el análisis detallado de los fenómenos astronómicos y su impacto en la

iluminación solar a lo largo del año.

En el software Stellarium se requiere dar un punto de coordenadas para georreferenciar el estudio, para el cual se da un punto central del área del Alto de San Andrés en el parque Arqueológico Nacional Tierradentro, tomando la coordenada del punto de control del vuelo fotogramétrico número cinco (5) con las siguientes coordenadas; Latitud **2°34´39.18489" N** y longitud **76°2´40.19873" W,** y una cota optométrica de **1744.256 msnm.** En este programa fue posible registrar algunos datos tales como: azimut, altura, magnitud, fecha y hora del sol en dos momentos del día; en el amanecer y su punto máximo alcanzado.

Figura 42

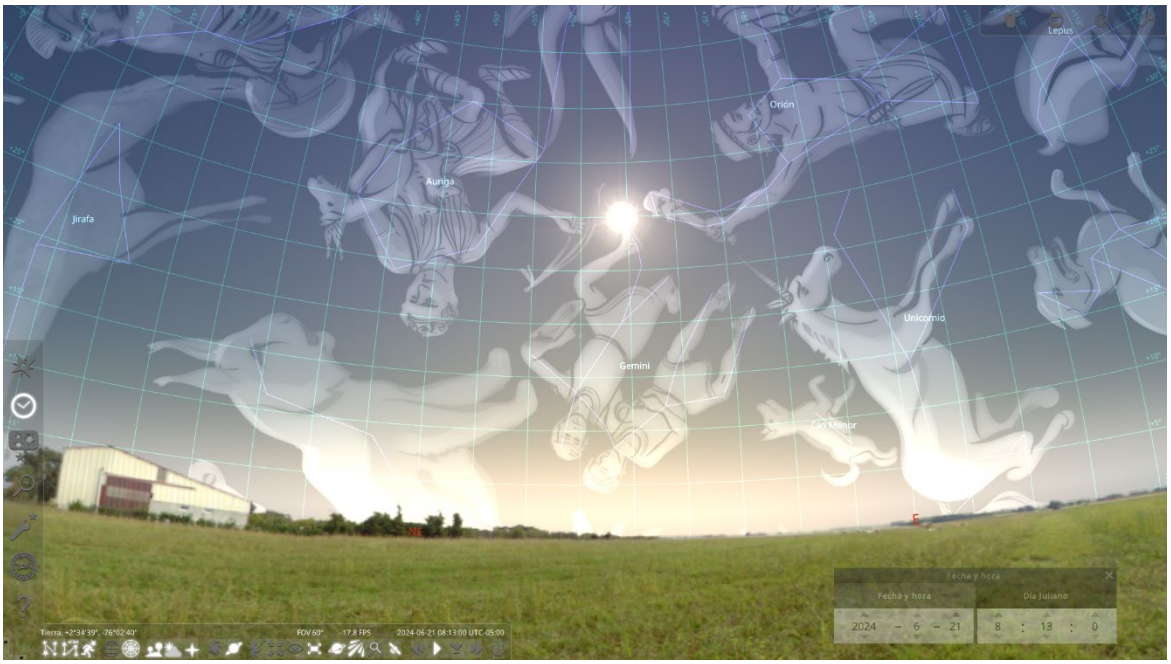
Trayectoria solar salida del sol equinoccio de marzo desde Tierradentro Cauca



Fuente. Propia, Stellarium.

Figura 43

Trayectoria solar solsticio de junio

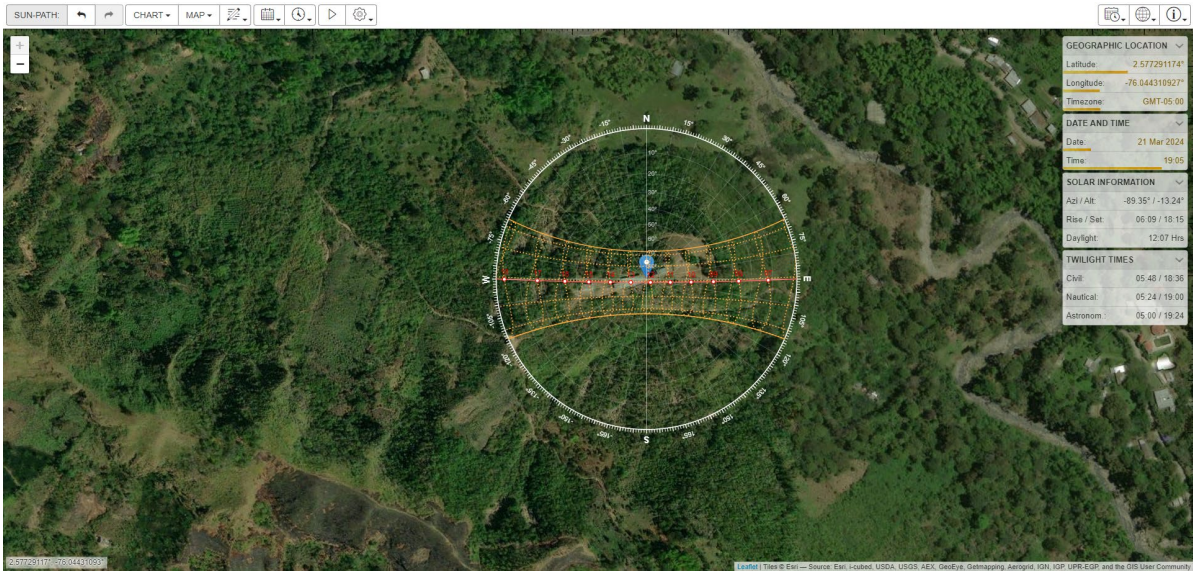


Fuente. Propia, Stellarium.

En cuanto a los simuladores solares, se tomó en consideración la ubicación precisa de la roca, utilizando la coordenada del punto de control 5. En el caso de Sun Path y SunEarthTools, se configuró este parámetro de localización junto con las fechas correspondientes a los solsticios y equinoccios, tomando únicamente el día 21 de cada mes respectivo. Para las fechas del paso del Sol por el cenit, se seleccionaron los días 30 de marzo y 10 de septiembre del presente año, tras realizar múltiples observaciones y análisis detallados de los reportes generados por el simulador, como se evidencia en la figura 44 y la tabla adjunta. Estas fechas específicas fueron determinadas con el fin de capturar con precisión los momentos en los que el Sol alcanza su punto más alto en el cielo en esa ubicación geográfica particular.

Figura 44

Sun path paso del sol



Fuente. Propia, Sunpath.

Figura 45

Datos de paso del sol Sunpath

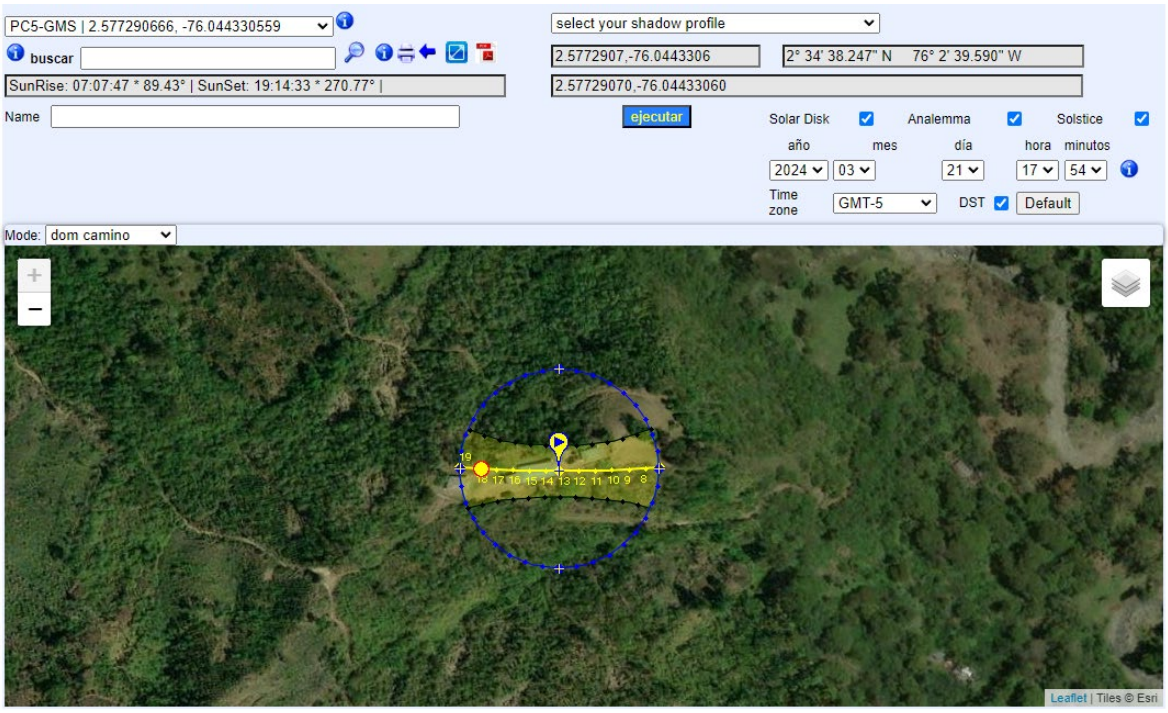
FECHA	**21 marzo de 2024**	
COORDENADAS	**LATITUD**	**2°34´39.18489” N**
	LONGITUD	**76°2´40.19873” W**
HORA	**AZIMUT**	**ELEVACIÓN**
8:00:00	91.26°	12.09°
9:00:00	92.26°	27.03°
10:00:00	93.88°	42.00°
11:00:00	97.75°	56.95°
12:00:00	130.39°	71.86°
13:00:00	-101.71°	86.10°
14:00:00	-94.94°	77.72°

15:00:00	-92.79°	62.87°
16:00:00	-91.62°	47.93°
17:00:00	-90.79°	32.96°
18:00:00	-90.09°	18.01°
19:00:00	-89.35°	3.20°

Fuente. Propia, Sunpath.

Figura 46

SunEarthTools paso del sol



Fuente. Propia, Sunpath.

Tabla 9

Datos de paso del Sol SunEarthTools

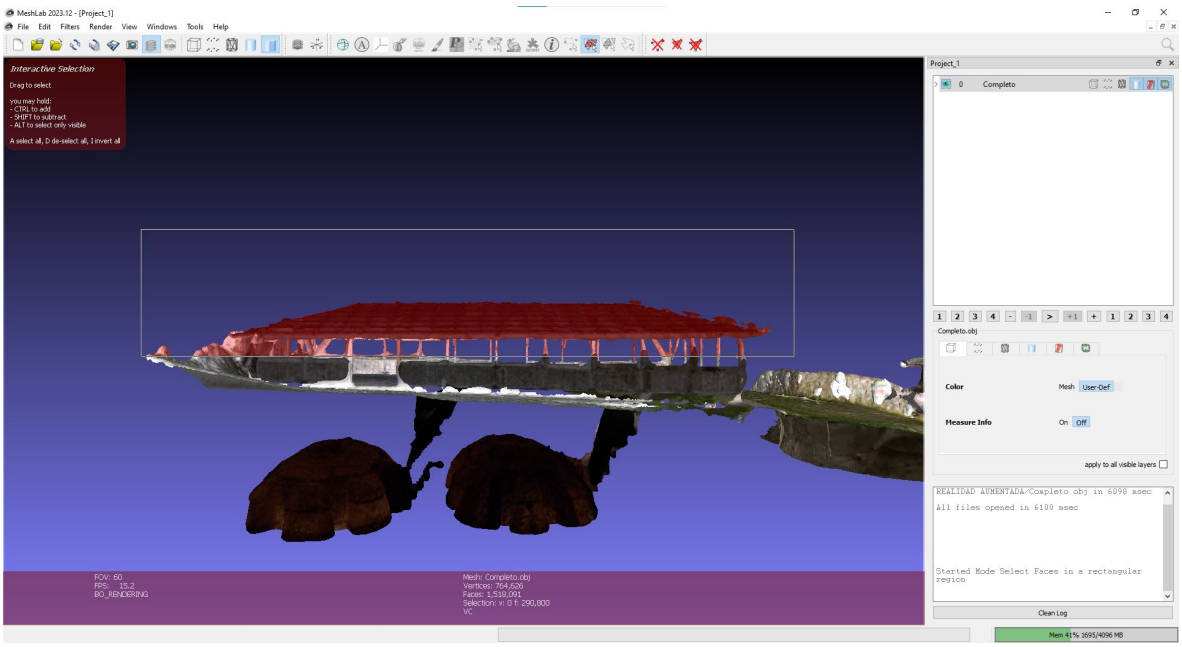
FECHA:	**21/03/2024 | GMT-5**	
COORDINAR:	**2.57729, -76.04433**	
UBICACIÓN:	**2.57729000, -76.04433000**	
HORA	**ELEVACIÓN**	**AZIMUT**
07:07:47	-0.833°	89.43°
8:00:00	12.21°	90°
9:00:00	27.2°	90.69°
10:00:00	42.18°	91.56°
11:00:00	57.16°	92.9°
12:00:00	72.11°	96.01°
13:00:00	86.6°	124.93°
14:00:00	77.64°	261.21°
15:00:00	62.73°	266.44°
16:00:00	47.76°	268.17°
17:00:00	32.77°	269.16°
18:00:00	17.79°	269.92°
19:00:00	2.8°	270.6°
19:14:33	-0.833°	270.77°

Fuente. Propia, Sunpath.

A partir del software Faro Scene, se exporta la nube de puntos lidar recortadas, procesadas y georreferenciadas en formato .obj, el cual es un formato compatible y que permite subirse en la página de Sunpath. Para dar mejor representación del comportamiento del sol en los Hipogeos se modifica el modelo 3D, eliminando las cubiertas de protección de los mismos en el Software MeshLab (ver figura 47).

Figura 47

Eliminación de cubiertas en MeshLab

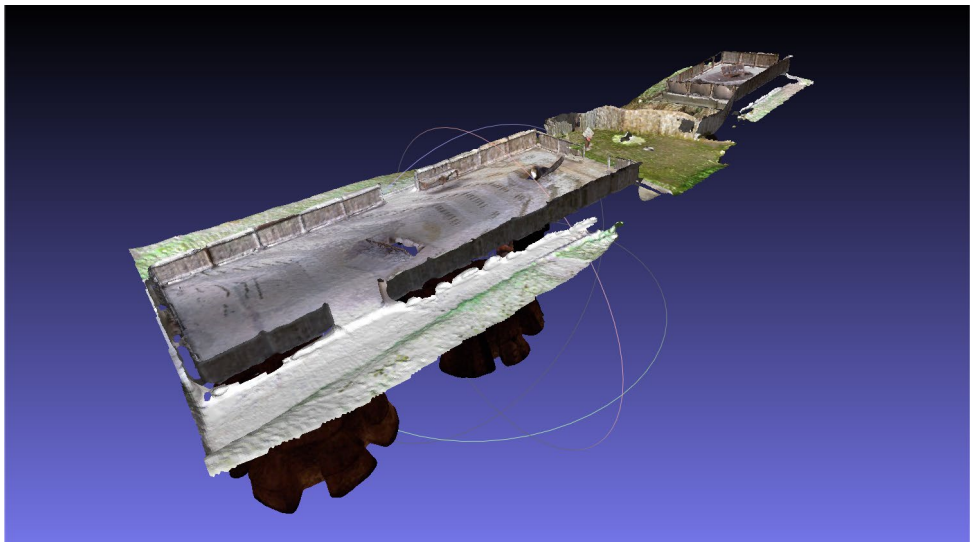


Fuente. Propia, MeshLab.

Se obtiene como resultado un modelo 3D reducido sin las cubiertas (Ver figura 48), para que el trabajo en la plataforma de Sun Path sea fidedigno se debió orientar el mismo y rotarlo para que una vez localizado en Sun Path, la animación del recorrido solar sea representativa de la realidad.

Figura 48

Modelo 3D sin cubiertas en MeshLab

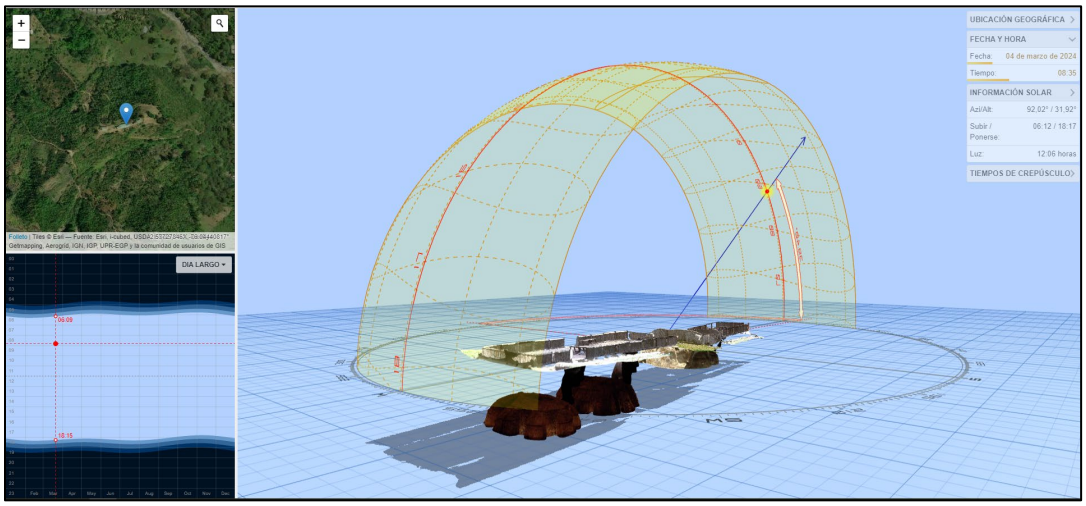


Fuente. Propia, MeshLab.

Sunpath es una valiosa herramienta de software que permite en la arqueoastronomía explorar y analizar las interacciones entre las estructuras arqueológicas y los fenómenos astronómicos como el movimiento del sol (ver figura 49).

Figura 49

Sun path paso del sol en Tierradentro Cauca



Fuente. Propia, Sunpath.

Para el cálculo del azimut de los solsticios, se determinó la separación en grados de la salida del sol que realiza anualmente, para ello se usaron fórmulas específicas que tienen en cuenta la latitud del sitio arqueológico.

7.3.5.1. Solsticio de Junio

$$COS.AZ = \frac{SEN(\mathbf{23°30'})}{\mathrm{COS}(\mathbf{2°34'39.18489"})}$$

7.3.5.2. Solsticio de diciembre

$$COS.AZ = \frac{SEN(\mathbf{-23°30'})}{\mathrm{COS}(\mathbf{2°34'39.18489"})}$$

En la que 23°30’ es la latitud correspondiente al trópico de cáncer y -23°30’ de capricornio, éstos indican los punto más norte y sur en relación a la línea del Ecuador; y 2°34´39.18489” de latitud, hace referencia a la ubicación de la roca con respecto al punto de control cinco.

8. Resultados

Los resultados que se exponen a continuación siguen la misma lógica presentada en la metodología, encontrándose organizados según las fases ejecutadas tanto en campo como en oficina. Sin embargo, es importante aclarar que los resultados principales se derivan de tres fases fundamentales: en primera instancia, la georreferenciación del proyecto y el levantamiento topográfico; en segundo lugar, el vuelo fotogramétrico; y finalmente, los trabajos de escanografía láser. Esta estructura permitirá comprender de manera integral losprocesos realizados y la correlación y dependencia existente entre ellos.

8.1. Cálculo y ajuste de los datos GNSS.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la etapa de procesamiento y ajuste de la red geodésica de referencia para el proyecto. Esta fase inicial resultó fundamental para establecer un marco de referencia posicional preciso, en el cual se cimentaron los subsecuentes trabajos de levantamiento topográfico y captura de información geoespacial.

En primera instancia, se exponen los resultados del procesamiento de los datos GNSS correspondientes a los vértices geodésicos materializados en campo. Mediante técnicas de posicionamiento estático diferencial y el empleo de efemérides precisas, se lograron obtener las coordenadas ajustadas de estos puntos de control, las cuales fueron determinadas en relación con la red nacional de estaciones permanentes MAGNA-ECO. De igual manera, se muestran los resultados del ajuste de la red geodésica local, conformada por los vértices procesados y estaciones permanentes utilizadas como bases para el cálculo de vectores. A través de un riguroso proceso de compensación y ajuste por mínimos cuadrados, se logró conformar una red geodésica robusta, minimizando las

discrepancias existentes entre las coordenadas observadas y las coordenadas ajustadas de cada uno de los vértices.

Tabla 10

Bases permanentes

VÉRTICE	M0	F-TEST
POPA - GPS01	0.738	
SILP - GPS01	0.421	1.31
SUES - GPS01	0.700	

Fuente. Propia.

Como resultado del ajuste, se presentan las coordenadas finales de los vértices geodésicos en la época 2018.0, así como la cota ortométrica corregida. Esta última se obtuvo a partir de la conversión de la cota elipsoidal inicial, dando cumplimiento a lo establecido en la Resolución 643 de 2018 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi:

Tabla 11

Cambio de época

PTO	ORIGEN NACIONAL - CTM-12			GUAUSS KRUGER		
	NORTE	ESTE	COTA ORT	NORTE	ESTE	COTA ORT
GPS-1	1843227.938	4661586.952	1742.8563	776815.998	1114932.028	1742.8563

Fuente. Propia.

Tabla 12

Coordenadas 2018

COORDENADAS 2018.0						
PTO	ORIGEN NACIONAL - CTM-12			GUAUSS KRUGER		
	NORTE	ESTE	COTA ORT.	NORTE	ESTE	COTA ORT
GPS-1	1843227.866	4661586.935	1742.8563	776815.926	1114932.011	1742.8563

Fuente. Propia.

Tabla 13

Cálculo de cota ortométrica

CALCULO DE COTA ORTOMETRICA		
PTO	ONDULACIÓN ELIPSOIDAL	COTA ORTOMETRICA
GPS-1	31.3	1742.8563

Fuente. Propia.

Como se explica en la metodología, a partir de las coordenadas anteriores, se presenta la lista de puntos levantados, calculados y ajustados, conformando en sí el levantamiento topográfico realizado:

Tabla 14

Coordenadas de GPS y levantamiento RTK

COORDENADAS DE GPS Y LEVANTAMIENTO RTK			
PTO	NORTE	ESTE	COTA ORT
GPS1	1843227.94	4661586.95	1742.8563
Pt1	1843235.08	4661585.71	1742.0293

Pt2	1843221.62	4661590.8	1742.2553
Pt3	1843219.2	4661578.63	1742.4183
Pt4	1843211.11	4661567.36	1743.1493
Pt5	1843210.13	4661558.31	1744.2563
Pt6	1843213.93	4661544.79	1745.7763
Pt7	1843199.47	4661536.28	1747.1433
Pt8	1843195.45	4661522.68	1749.2803
Pt9	1843200.85	4661521.74	1751.6893
Pt10	1843204.09	4661514.04	1752.8363
Pt11	1843207.5	4661508.29	1752.9083
Pt12	1843197.33	4661498.25	1753.6083
Cbt1	1843198.12	4661505.88	1753.4333
Cbt2	1843207.62	4661494.79	1753.9603
Cbt3	1843202.03	4661526.98	1751.8613
Cbt4	1843204.19	4661533.62	1751.9413
Cbt5	1843204.22	4661533.59	1751.9643
Cbt6	1843209.94	4661531.52	1751.4543
Cbt7	1843201.86	4661535.42	1746.5023
Cbt8	1843207.3	4661554.99	1745.3193
Cbt9	1843207.28	4661555.02	1745.3223
Cbt10	1843214.71	4661567.78	1744.1403
Cbt11	1843218.19	4661577.45	1743.8923
Cbt12	1843224.25	4661575.45	1743.9763
chcgps1	1843228.17	4661587.36	1742.6433
chcgps2	1843205.18	4661513.84	1752.4233

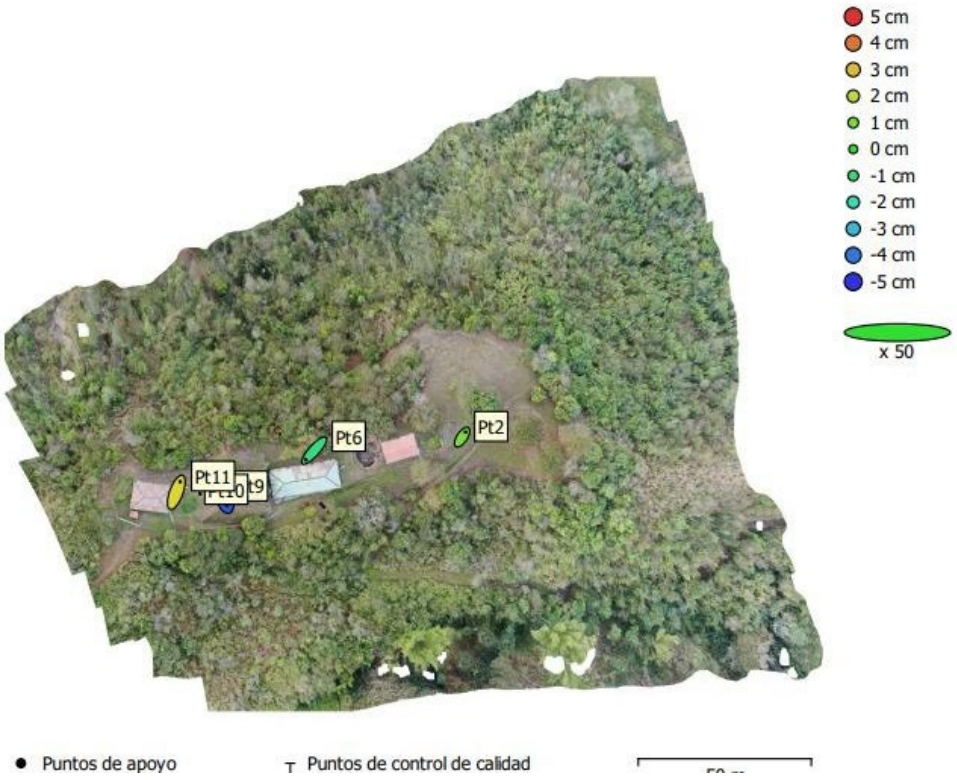
Fuente. Propia.

8.2. Procesamiento Fotogramétrico

Con base en el reporte generado desde el software (Agisoft Metashape) se presentan los errores obtenidos en los puntos de control terrestre para la georreferenciación del modelo digital 3D (error medio cuadrático y error en pixeles).

Figura 50

Extracto de Informe Agisoft Metashape



Fuente. Propia, Agisoft Metashape.

Considerando los desafíos del campo electromagnético que afectaron las operaciones aéreas en el alto de San Andrés, causando retrasos en el inicio del trabajo y afectando la precisión de los datos recopilados mediante RTK, es fundamental comprender cómo estos factores influyeron en la calidad de los resultados. Además, se debe tener en cuenta las limitaciones técnicas del dron utilizado, que presenta restricciones en sus capacidades y

alcance, lo que afecta la eficiencia de la recolección de datos. Sumado a estos desafíos, la topografía accidentada del área de trabajo representa otro obstáculo significativo. A pesar de estos contratiempos, se lograron precisiones óptimas considerando el contexto en el que se obtuvieron los datos, aunque no alcanzaron el nivel de precisión milimétrica deseado. Este escenario resalta la importancia de considerar diversos factores ambientales y técnicos al realizar trabajos de relevamiento, y subraya la necesidad de estrategias adicionales para mejorar la precisión y la fiabilidad de los datos recopilados en condiciones adversas.

Tabla 15

Resumen de errores fotogrametría

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
Pt2	3.86778	5.91437	0.99075	7.13664	0.516 (27)
Pt6	-9.55368	-10.6584	-1.23662	14.3578	1.264 (20)
Pt9	2.61569	-7.7651	-4.47241	9.33494	0.920 (20)
Pt11	4.57971	12.3866	2.60329	13.4603	1.253 (16)
Total	**5.78854**	**9.51717**	**2.69553**	**11.4608**	**0.989**

Fuente. Propia, Agisoft Metashape.

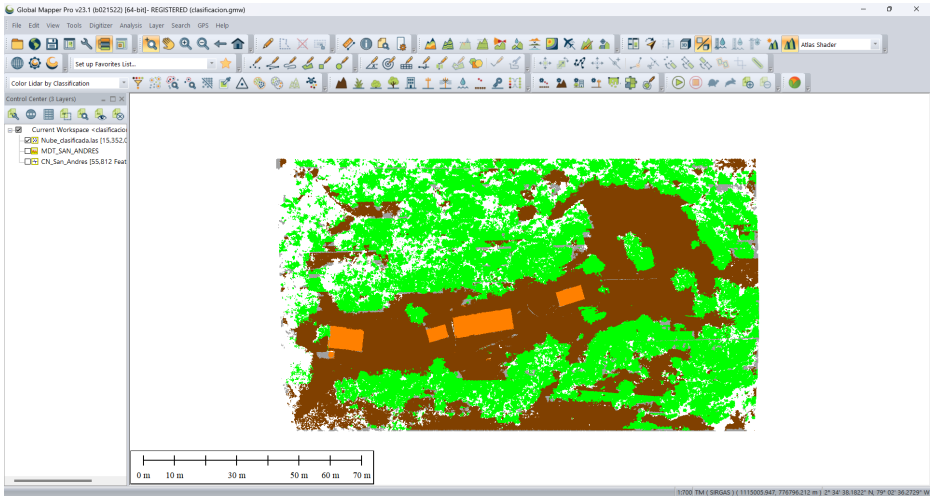
8.2.1. Nube de puntos clasificada

A partir del procesamiento de la fotogrametría se obtuvo una nube de puntos del área de interés, siguiendo las necesidades del proyecto, se realizó una clasificación manual a partir del software Global Mapper, teniendo un conocimiento previo e identificando el comportamiento del terreno desde las experiencias en campo, un apoyo en perfiles seccionados transversalmente, los cuales atravesaron toda la zona en estudio y permitieron visualizar y seleccionar cada grupo para su respectiva clasificación, las categorías que se

emplearon fueron: terreno natural, vegetación baja, vegetación alta y construcciones, ya que estas encerraban la composición de elementos existentes en el área de estudio.

Figura 51

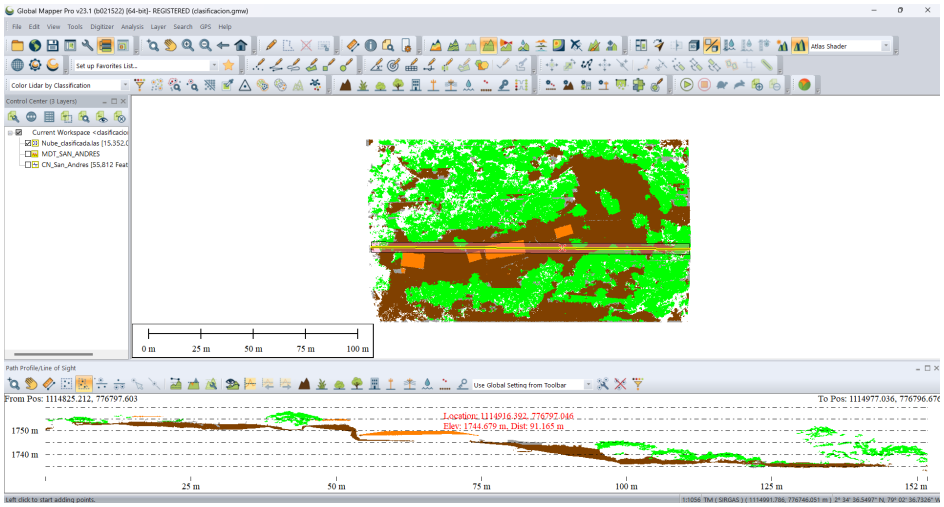
Nube de puntos clasificada Global Mapper



Fuente. Propia, Global Mapper.

Figura 52

Perfil de nube de puntos clasificada Global Mapper



Fuente. Propia, Global Mapper.

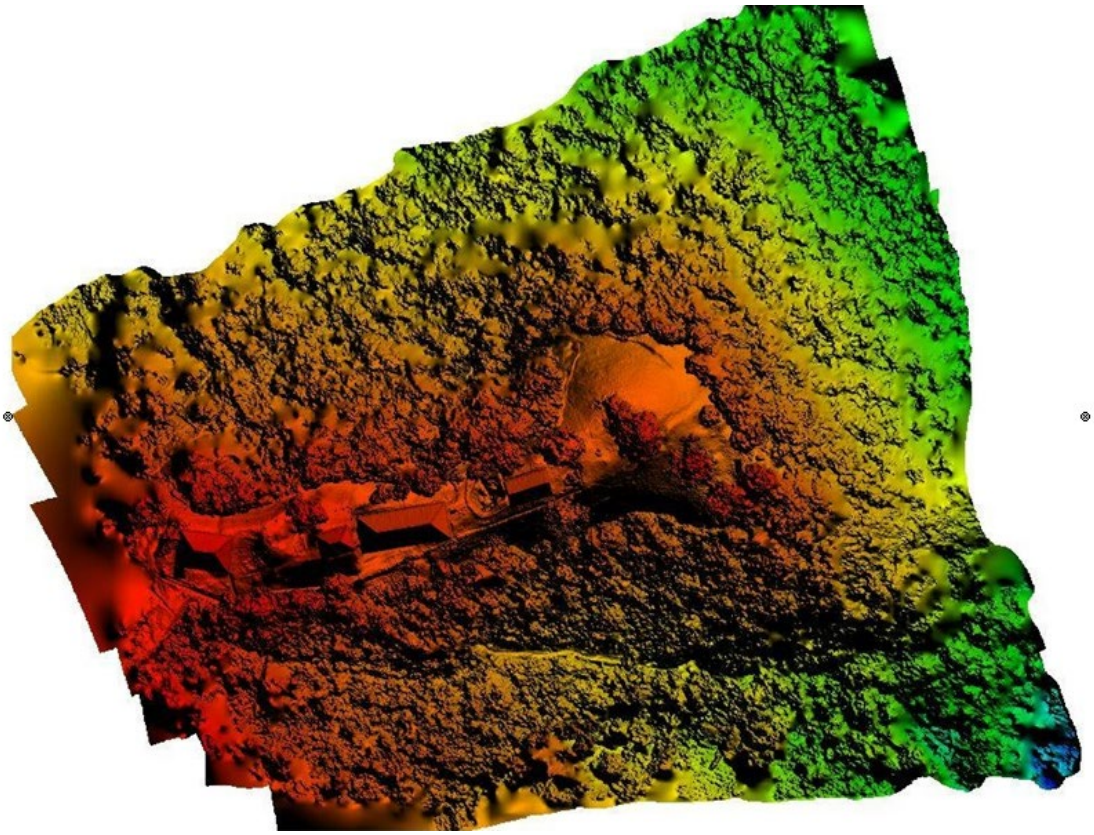
Productos como este, permitieron generar posteriormente, curvas de nivel las cuales fueron implementadas en el plano topográfico, brindando un panorama de la topografía del lugar, evidenciando pendientes pronunciadas (característico de una zona montañosa como esta) y geomorfología asociada a fenómenos como remociones de masa.

8.2.2. Modelo digital de elevación

Cumpliendo con los objetivos propuestos se generó un modelo digital de la zona arqueológica mediante los datos obtenidos con tecnología RPAS. A partir de este se realizaron el modelo de digital de terreno y elevación como producto final.

Figura 53

Modelo digital de elevación



Fuente. Propia, Agisoft Metashape.

8.3. Escaneo Lidar

Fundamentados en la esencia misma del proyecto, se presentan los productos obtenidos a partir de la implementación de la técnica de escaneo Lidar. Esta tecnología brinda posibilidades de visualización y manejo de la información que superan ampliamente las expectativas iniciales contempladas. Esto motivó la exploración y experimentación con nuevos enfoques, ampliando el espectro de posibilidades y alcances de los productos derivados. Este proceso permitió encaminar hacia la integración de la realidad virtual, incorporando una dimensión adicional que permite la interacción virtual con el patrimonio arqueológico, facilitando su investigación y estudio sin la necesidad de intervenciones directas sobre las estructuras.

8.3.2. Informes de registro de escaneos

Los 18 escaneos se dividieron en tres grupos de registro automático por medio de la conexión de solapamiento de las esferas o targets, debido a que en campo se presentaron ciertas dificultades para lograr tomar más escaneos que pudieran conectar los escaneos del interior de los dos hipogeos con el exterior y su hipogeo socavado, y posterior a eso se realizó el registro manual de los tres grupos para convertirlos en una sola nube de puntos interconectada. Para estos registros automáticos el software de Faro Scene presenta los informes de cada grupo, presentado los siguientes resultados:

8.3.2.1 Hipogeo SA-5

8.3.2.1.1. Descripción general

Tabla 16

Descripción general

Error de punto máximo	1.2 mm
La media del error de puntos	1.0 mm
Superposición mínima	46.0 %

Fuente. Propia, Informe Faro Scene.

8.3.2.1.2. Errores de escaneo

Tabla 17

Errores de escaneo

Agrupamiento/escaneo	Conexiones	Iteraciones Error de punto [mm]	La media del error de puntos [mm]	Mín. Superposición
Scan_002	3	1.0	1.0	46.0 %
Scan_001	3	1.1	1.0	58.1 %
Scan_003	3	1.2	1.1	46.0 %
Scan_000	3	1.2	1.0	47.6 %

Fuente. Propia, Informe Faro Scene.

8.3.2.1.3. Errores detallados

Tabla 18

Errores detallados

Agrupamiento/escaneo 1	Agrupamiento/escaneo 2	Error de punto [mm]	Superposición
Scan_001	Scan_002	1.0	71.5 %
Scan_001	Scan_003	1.1	65.6 %
Scan_003	Scan_002	1.0	46.0 %
Scan_000	Scan_002	0.9	47.6 %
Scan_000	Scan_001	0.9	58.1 %
Scan_000	Scan_003	1.2	57.9 %

Fuente. Propia, Informe Faro Scene.

8.3.2.1.4. Errores de coincidencia del inclinómetro

Tabla 19

Errores de coincidencia del inclinómetro.

Agrupamiento/escaneo	Escaneo	Error de coincidencia [deg]
Scan_000	Scan_000	0.0038
Scan_001	Scan_001	0.0011
Scan_003	Scan_003	0.0077
Scan_002	Scan_002	0.0048

Fuente. Propia, Informe Faro Scene.

- Se observa un error de punto máximo de 21.2 mm y una media del error de puntos de 7.4 mm, lo cual es relativamente alto.
- La superposición mínima entre los escaneos es de 24.0%, lo que indica una cantidad adecuada de superposición.
- Se identifican algunos escaneos con errores de punto elevados, como el Scan_017 (21.2 mm), Scan_009 (21.2 mm) y Scan_008 (19.9 mm).
- Los errores de coincidencia del inclinómetro son relativamente bajos, la mayoría por debajo de 0.02 grados.

8.3.2.2 Hipogeo SA-4

8.3.2.1.1. Descripción general

Tabla 20

Descripción general

Error de punto máximo	1.3 mm
La media del error de puntos	1.2 mm
Superposición mínima	46.7 %

Fuente. Propia, Informe Faro Scene

8.3.2.1.2. Errores de escaneo

Tabla 21

Errores de escaneo

Agrupamiento/escaneo	Conexiones	Iteraciones Error de punto [mm]	La media del error de puntos [mm]	Min. Superposición
Scan_013	5	1.2	1.1	50.1 %
Scan_014	4	1.3	1.2	46.7 %
Scan_015	5	1.3	1.1	54.1 %
Scan_011	5	1.2	1.2	57.3 %
Scan_010	5	1.3	1.2	46.7 %
Scan_012	4	1.2	1.2	56.8 %

Fuente. Propia, Informe Faro Scene

8.3.2.1.3. Errores detallados

Tabla 22

Errores detallados

Agrupamiento/escaneo 1	Agrupamiento/escaneo 2	Error de punto [mm]	Superposición
Scan_013	Scan_011	1.1	57.3 %
Scan_013	Scan_014	1.2	50.1 %
Scan_013	Scan_015	1.1	80.3 %
Scan_015	Scan_014	1.1	54.1 %
Scan_011	Scan_014	1.2	69.4 %
Scan_011	Scan_015	1.1	71.5 %
Scan_010	Scan_013	1.2	63.4 %
Scan_010	Scan_014	1.3	46.7 %
Scan_010	Scan_015	1.3	59.5 %
Scan_010	Scan_011	1.2	63.5 %
Scan_010	Scan_012	1.2	58.0 %
Scan_012	Scan_013	1.2	56.8 %
Scan_012	Scan_015	1.2	72.7 %
Scan_012	Scan_011	1.2	65.6 %

Fuente. Propia, Informe Faro Scene

8.3.2.1.4. Errores de coincidencia del inclinómetro

Tabla 23

Errores de coincidencia del inclinómetro.

Agrupamiento/escaneo	Escaneo	Error de coincidencia [deg]
Scan_010	Scan_010	0.0057
Scan_012	Scan_012	0.0108
Scan_013	Scan_013	0.0073
Scan_011	Scan_011	0.0017
Scan_015	Scan_015	0.0038
Scan_014	Scan_014	0.0076

Fuente. Propia, Informe Faro Scene.

- Se observa un error de punto máximo de 1.2 mm y una media del error de puntos de 1.0 mm, lo cual es muy bueno.
- La superposición mínima entre los escaneos es de 46.0%, lo que indica una excelente superposición.
- No se identifican errores de punto significativos entre los escaneos de este hipogeo.
- Los errores de coincidencia del inclinómetro son muy bajos, por debajo de 0.01 grados.

8.3.2.3 Conexión exterior e hipogeo Socavado S3-A

8.3.2.1.5. Descripción general

Tabla 24

Descripción general

Error de punto máximo	21.2 mm
La media del error de puntos	7.4 mm
Superposición mínima	24.0 %

Fuente. Propia, Informe Faro Scene.

8.3.2.1.6. Errores de escaneo

Tabla 25

Errores de escaneo

Agrupamiento/escaneo	Conexiones	Iteraciones Error de punto [mm]	La media del error de puntos [mm]	Min. Superposición
Scan_008	2	19.9	14.4	36.7 %
Scan_005	3	2.6	1.8	43.5 %
Scan_017	3	21.2	18.5	34.4 %
Scan_006	4	7.1	3.3	24.0 %
Scan_009	2	21.2	14.1	24.0 %
Scan_016	1	14.4	14.4	66.6 %
Scan_004	3	2.0	1.6	68.5 %
Scan_007	4	8.9	3.2	36.7 %

Fuente. Propia, Informe Faro Scene.

8.3.2.1.7. Errores detallados

Tabla 26

Errores detallados

Agrupamiento/escaneo 1	Agrupamiento/escaneo 2	Error de punto [mm]	Superposición
Scan_017	Scan_008	19.9	40.1 %
Scan_017	Scan_009	21.2	34.4 %
Scan_017	Scan_016	14.4	66.6 %
Scan_006	Scan_005	2.6	43.5 %
Scan_006	Scan_004	2.0	68.5 %
Scan_006	Scan_007	1.5	72.0 %
Scan_006	Scan_009	7.1	24.0 %
Scan_004	Scan_005	1.6	84.2 %
Scan_007	Scan_008	8.9	36.7 %
Scan_007	Scan_005	1.2	76.0 %
Scan_007	Scan_004	1.1	88.9 %

Fuente. Propia, Informe Faro Scene.

8.3.2.1.8. Errores de coincidencia del inclinómetro

Tabla 27

Errores de coincidencia del inclinómetro.

Agrupamiento/escaneo	Escaneo	Error de coincidencia [deg]
Scan_006	Scan_006	0.0139
Scan_017	Scan_017	0.0011
Scan_007	Scan_007	0.0085
Scan_016	Scan_016	0.0005
Scan_004	Scan_004	0.0112
Scan_009	Scan_009	0.0181
Scan_005	Scan_005	0.0055
Scan_008	Scan_008	0.0027

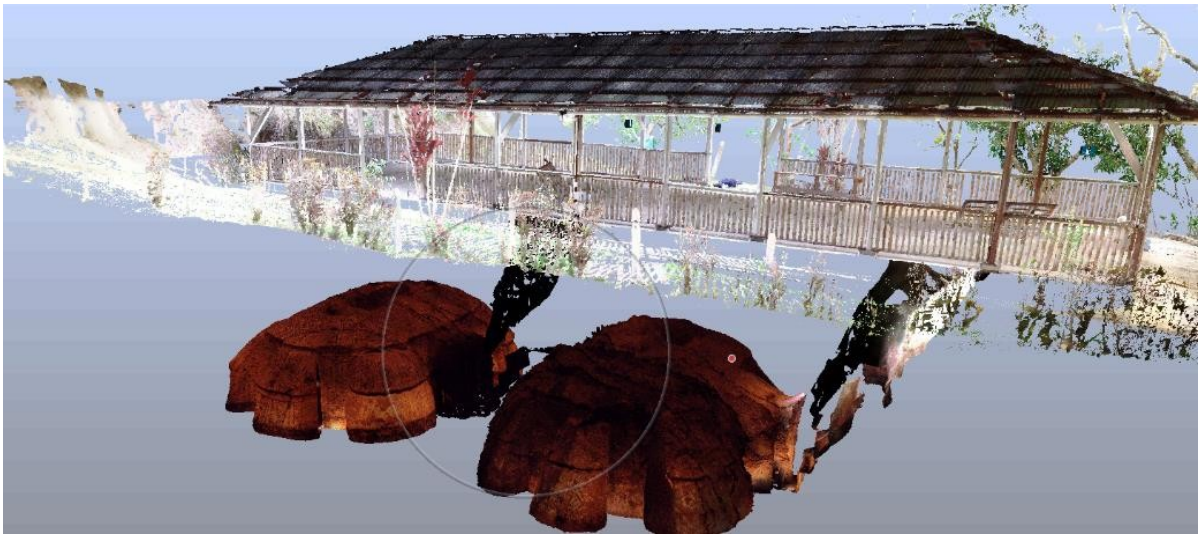
Fuente. Propia, Informe Faro Scene.

- Se observa un error de punto máximo de 1.3 mm y una media del error de puntos de 1.2 mm, lo cual es muy bueno.
- La superposición mínima entre los escaneos es de 46.7%, lo que también indica una excelente superposición.
- No se identifican errores de punto significativos entre los escaneos de este hipogeo.
- Los errores de coincidencia del inclinómetro son bajos, la mayoría por debajo de 0.01 grados.

Impulsados por investigaciones de base, las necesidades planteadas por el parque arqueológico y el Instituto se presentan como productos principales una nube de puntos colorizada (ver figura 54) y fiel a las características reales del sitio, complementada con registros de la interacción e inmersión en entornos de realidad virtual. Estos productos constituyen herramientas valiosas para la preservación, divulgación y apropiación del patrimonio cultural de Tierradentro, abriendo nuevas oportunidades de análisis y aproximaciones al legado arqueológico de la región.

Figura 54

Panorámica Nube de puntos Faro Scene



Fuente. Propia, Faro Scene.

En el ámbito del escaneo láser 3D y la generación de modelos tridimensionales, Faro Scene y Leica Cyclone se seleccionaron como solución para el procesamiento del proyecto. Estas plataformas ofrecen herramientas avanzadas para el procesamiento, registro y análisis de datos obtenidos mediante escaneo láser y para crear modelos 3D detallados y precisos. Se realiza cuadro comparativo, exploraremos las características distintivas, las fortalezas y las diferencias clave entre Faro Scene (ver figura 55) y Leica Cyclone, brindando una visión panorámica de lo visto en el uso de ambos programas.

Figura 55

Perspectiva escaneo de los hipogeos



Fuente. Propia, Faro Scene.

8.4. Cálculo de volúmenes

Las técnicas de escaneo láser 3D y la generación de nubes de puntos Utilizando el software Faro Scene, se realizaron cálculos precisos de los volúmenes internos de los hipogeos a partir de las nubes de puntos obtenidas mediante escaneo láser, brindando información clave para comprender su arquitectura, evaluar su estado de conservación y planificar posibles intervenciones de restauración o mantenimiento. Esta capacidad de medición precisa y detallada, combinada con la visualización tridimensional de alta resolución, ha abierto nuevas perspectivas para la investigación y preservación de estos tesoros arqueológicos subterráneos.

Con la herramienta VolumeMeasurement, (ver figura 56) calculamos el volumen de los Hipogeos, teniendo como resultado lo siguiente:

Hipogeo SA-5

Largo: 6.077m

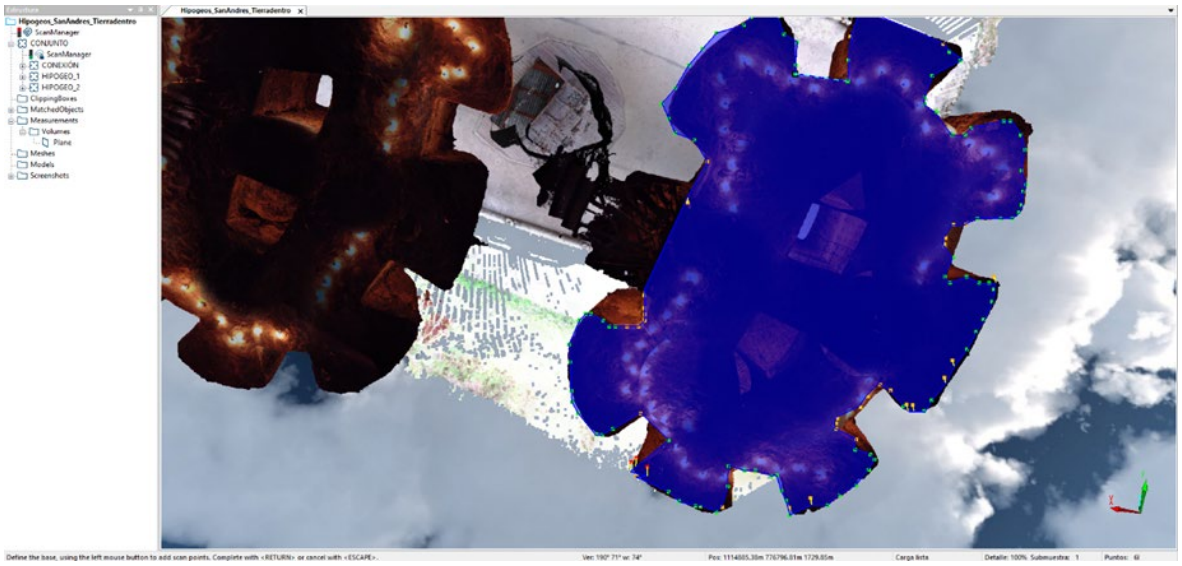
Ancho: 8.267m

Alto: 2.553m

Volumen: 60.719 m³

Figura 56

Polígono base para cálculo de volumen, SA-5.



Fuente. Propia, Faro Scene.

Figura 57

Malla sobre Hipogeo SA-5, para cálculo de volumen



Fuente. Propia, Faro Scene

Hipogeo SA-4

Largo: 6.040m

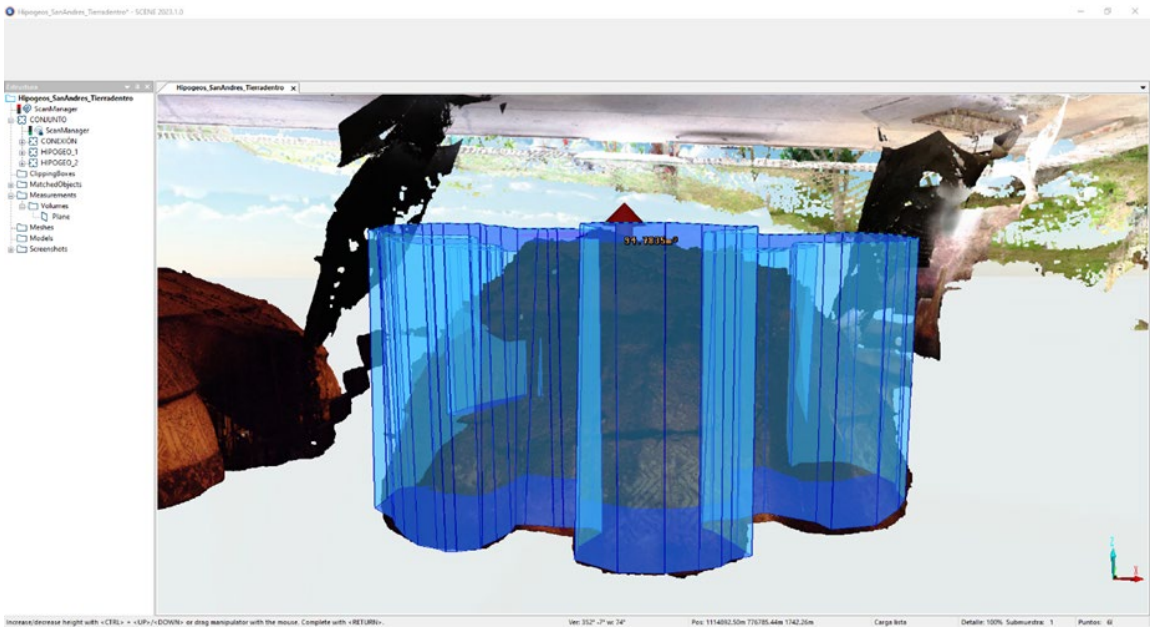
Ancho: 8.180m

Alto: 2.500m

Volumen: 62.474 m³

Figura 58

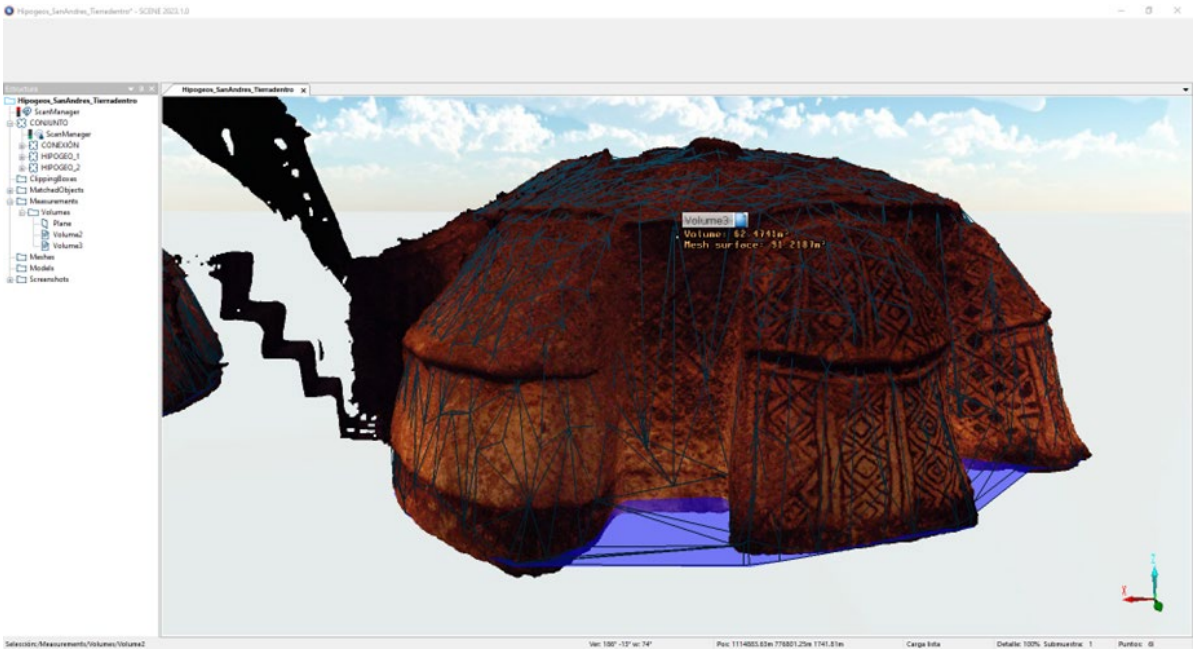
Polígono base para cálculo de volumen, SA-4



Fuente. Propia, Faro Scene

Figura 59

Malla sobre Hipogeo SA-5, para cálculo de volumen



Fuente. Propia, Faro Scene

8.5. Análisis Estructural y diseño

Los hipogeos de Tierradentro destacan por su compleja arquitectura subterránea excavada en la dura roca volcánica. Su estructura interna consta de varias cámaras funerarias. Una de las características más notables son las dos grandes columnas monolíticas centrales presentes en los hipogeos (ver figura 60). Estas columnas, talladas directamente en la roca, sustentan la estructura abovedada que conforma el techo de las cámaras.

Figura 60

Columnas centrales Hipogeo SA-5



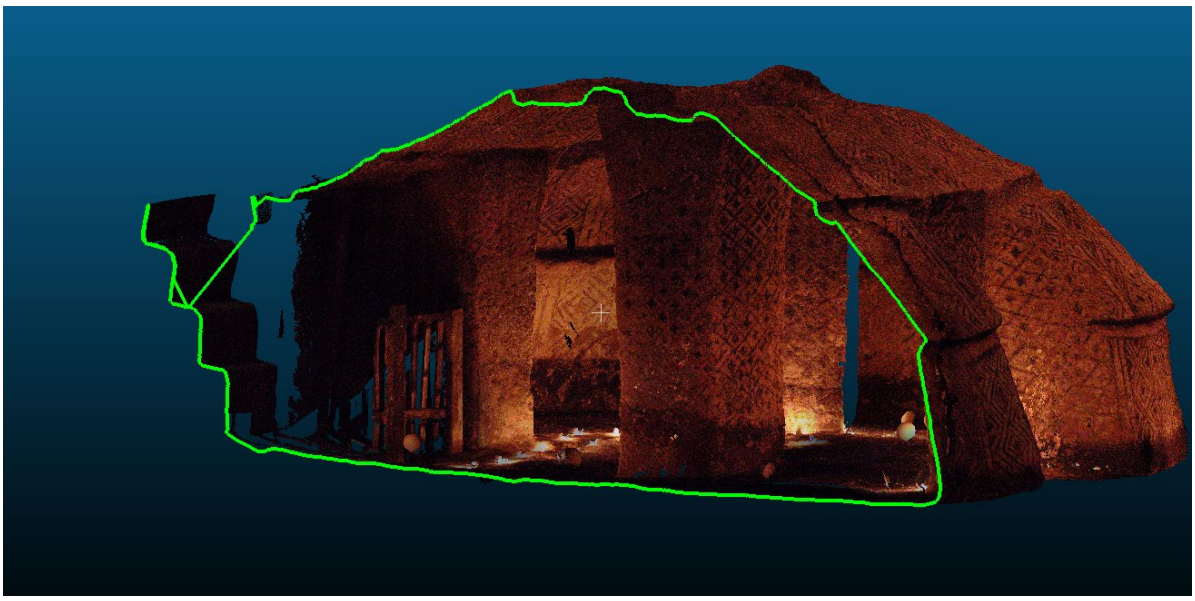
Fuente. Propia, Faro Scene

Además de estas impresionantes columnas, la estructura de los hipogeos se caracteriza por sus techos abovedados en forma de domo (ver figura 61). Estas bóvedas fueron excavadas

con gran precisión en la roca volcánica, siguiendo formas geométricas como arcos de medio punto, bóvedas de cañón corrido e incluso cúpulas semiesféricas. Esta forma abovedada y la ubicación estratégica de las dos columnas centrales permitieron distribuir adecuadamente las cargas y esfuerzos de la estructura subterránea, brindando estabilidad y resistencia a los hipogeos a lo largo de los siglos.

Figura 61

Hipogeo SA-5



Fuente. Propia, Faro Scene

Estas brillantes estructuras tienen un diseño arquitectónico y estructural fantástico, pero no es ajeno a los factores ambientales y del ser humano, a lo cual la integridad de los mismos hipogeos se ven afectados estructuralmente notándolo en sus columnas y paredes.

Figura 62

Hipogeo SA-5



Fuente. Propia, CloudCompare

8.6. Análisis de alineaciones astronómicas del alto de San Andrés

Los hallazgos obtenidos en las alineaciones astronómicas de los hipogeos en el alto de San Andrés, teniendo en cuenta la ubicación del punto de control 5, fueron una recopilación de datos de las posiciones solares en y comparación entre Sunpath y SunEarthTools, en las fechas de solsticios, equinoccios y paso por el cenit en diferentes horas del día, desde las 7: 00 am hasta las y 6:00 pm.

8.6.1. Equinoccio 21 marzo 2024

Tabla 28

Comparativo entre Sunpath vs SunEarthTools Equinoccio 21 marzo 2024

HORA	3D Sunpath		SunEarthTools	
	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut
7:00:00	12.09°	91.26°	12.21°	90°

8:00:00	27.03°	92.26°	27.2°	90.69°
9:00:00	42.00°	93.88°	42.18°	91.56°
10:00:00	56.95°	97.75°	57.16°	92.9°
11:00:00	71.86°	130.39°	72.11°	96.01°
12:00:00	86.10°	-101.71°	86.6°	124.93°
13:00:00	77.72°	-94.94°	77.64°	261.21°
14:00:00	62.87°	-92.79°	62.73°	266.44°
15:00:00	47.93°	-91.62°	47.76°	268.17°
16:00:00	32.96°	-90.79°	32.77°	269.16°
17:00:00	18.01°	-90.09°	17.79°	269.92°
18:00:00	3.20°	-89.35°	2.8°	270.6°

Figura 63

Equinoccio 21 marzo 2024

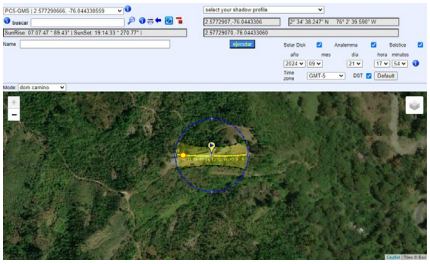
IMAGEN



Fuente. Propia, Sunpath

Figura 64

Equinoccio 21 marzo



Fuente. Propia, SunEarthTools

Fuente. Propia

8.6.2. Equinoccio 21 septiembre 2024

Tabla 29

Comparativo entre Sunpath vs SunEarthTools, Equinoccio 21 septiembre 2024

HORA	3D Sunpath		SunEarthTools	
	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut

6:00:00	1.12°	89.14°	0.74°	89.62°
7:00:00	15.77°	89.80°	15.73°	90.31°
8:00:00	30.73°	90.50°	30.72°	91.09°
9:00:00	45.70°	91.37°	45.7°	92.12°
10:00:00	61.91°	92.94°	60.66°	93.88°
11:00:00	75.60°	96.48°	75.57°	98.72°
12:00:00	88.18°	-157.7°	87.62°	198.25°
13:00:00	74.23°	-95.87°	74.09°	262.02°
14:00:00	59.29°	-92.60°	59.17°	266.23°
15:00:00	44.32°	-91.27°	44.2°	267.86°
16:00:00	29.35°	-90.43°	29.22°	268.84°
17:00:00	14.39°	-89.74°	14.23°	269.59°
18:00:00	-0.14°	-89.08°	-0.76°	270.25°

Figura 65

Equinoccio 21 septiembre 2024

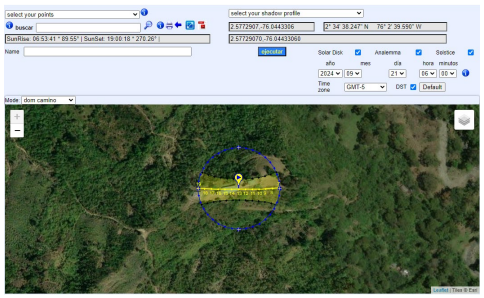
IMAGEN



Fuente. Propia, Sunpath

Figura 66

Equinoccio 21 septiembre 2024



Fuente. Propia, SunEarthTools

Fuente. Propia.

8.6.3. Solsticio 21 junio 2024

Tabla 30

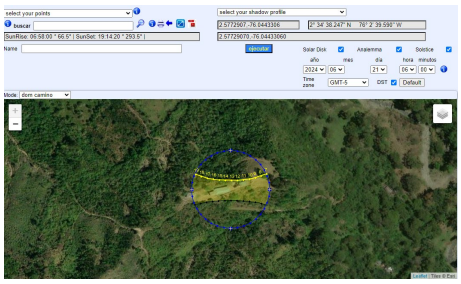
Comparativo entre Sunpath vs SunEarthTools, Solsticio 21 junio 2024

HORA	Solsticio 21 junio 2024			
	3D Sunpath		SunEarthTools	
	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut
6:00:00	0.20°	66.52°	-0.38°	66.52°
7:00:00	13.49°	66.51°	13.38°	66.51°
8:00:00	27.13°	64.90°	27.05°	64.91°
9:00:00	40.49°	60.99°	40.42°	61.01°
10:00:00	53.10°	52.91°	53.04°	52.96°
11:00:00	63.75°	36.03°	63.71°	36.14°
12:00:00	69.10°	3.80°	69.09°	3.97°
13:00:00	65.38°	-30.99°	65.41°	329.13°
14:00:00	55.42°	-50.51°	55.46°	309.55°
15:00:00	43.05°	-59.82°	43.1°	300.21°
16:00:00	29.79°	-64.35°	29.84°	295.66°
17:00:00	16.19°	-66.33°	16.2°	293.67°
18:00:00	2.64°	-66.63°	2.45°	293.36°

	Figura 67	**Figura 68**
IMAGEN	*Solsticio 21 junio 2024*	*Solsticio 21 junio 2024*



Fuente. Propia, Sunpath



Fuente. *Propia, SunEarthTools*

Fuente. Propia.

8.6.4. Solsticio 21 diciembre 2024

Tabla 31

Comparativo entre Sunpath vs SunEarthTools, Solsticio 21 diciembre 2024

HORA	Solsticio 21 diciembre 2024			
	3D Sunpath		SunEarthTools	
	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut
6:00:00	-3.63°	113.33°	-0.833°	113.42°
7:00:00	12.34°	114.66°	12.1°	114.63°
8:00:00	24.77°	117.62°	25.57°	117.57°
9:00:00	38.72°	123.10°	38.53°	123.01°
10:00:00	50.58°	132.96°	50.42°	132.79°
11:00:00	59.96°	150.79°	59.85°	150.48°
12:00:00	63.99°	179.07°	63.98°	178.63°
13:00:00	60.38°	-152.19°	60.47°	207.46°
14:00:00	51.22°	-133.74°	51.37°	226.05°
15:00:00	39.46°	-123.54°	39.63°	236.35°

16:00:00	26.55°	-117.86°	26.73°	242.07°
17:00:00	13.14°	-114.78°	13.29°	245.18°
18:00:00	-0.08°	-113.43°	-0.4°	246.56°

Figura 69

Solsticio 21 diciembre 2024.

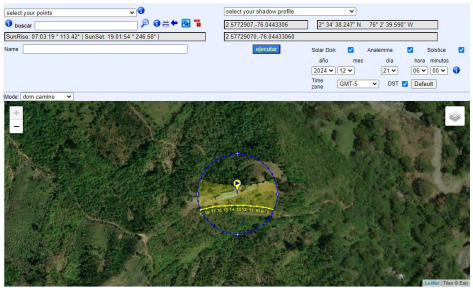
IMAGEN



Fuente. Propia, Sunpath

Figura 70

Solsticio 21 diciembre 2024.



Nota *Propia SunEarthTools*

Fuente. Propia.

8.6.5. Simulaciones Animadas del paso del sol

Con el fin de recrear y representar visualmente los datos expuestos anteriormente, se generaron una serie de animaciones en los programas Stellarium y 3D Sunpath. Estas animaciones muestran el recorrido del sol durante las fechas mencionadas, presentadas en orden cronológico. (Consultar anexos: Animaciones de la trayectoria solar en Stellarium y 3D Sunpath)

8.7. Unión de nubes de punto fotogramétricos con lidar.

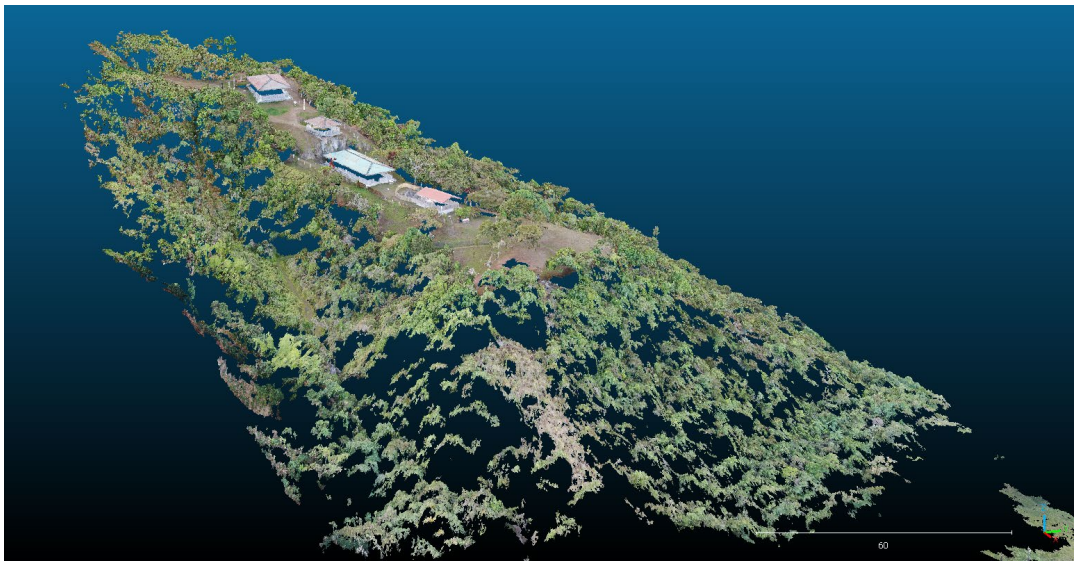
8.7.1. Nube de puntos fotogramétrica

Se elaboró una unión entre nubes de puntos fotogramétricas y datos LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), inicialmente con la nube de puntos de la fotogrametría exportada en formato e57 de Agisoft Metashape con las siguientes características:

- **Puntos de paso:** 71,508
- **Nube de puntos:** 27,350,013
- **Peso de archivo:** e57: 617.069 megas

Figura 71

Nube de puntos a partir de fotogrametría Cloud Compare



Fuente. Propia, Cloud Compare

La Fotogrametría proporciona información de color y textura de alta resolución, lo que permite una interpretación visual más precisa. Sin embargo, puede tener dificultades para capturar detalles en áreas con poca textura o en zonas con sombras u oclusiones. Por lo cual es pertinente realizar una unión complementaria con el LiDAR.

Figura 72

Características de Nube de puntos a partir de fotogrametría Cloud Compare

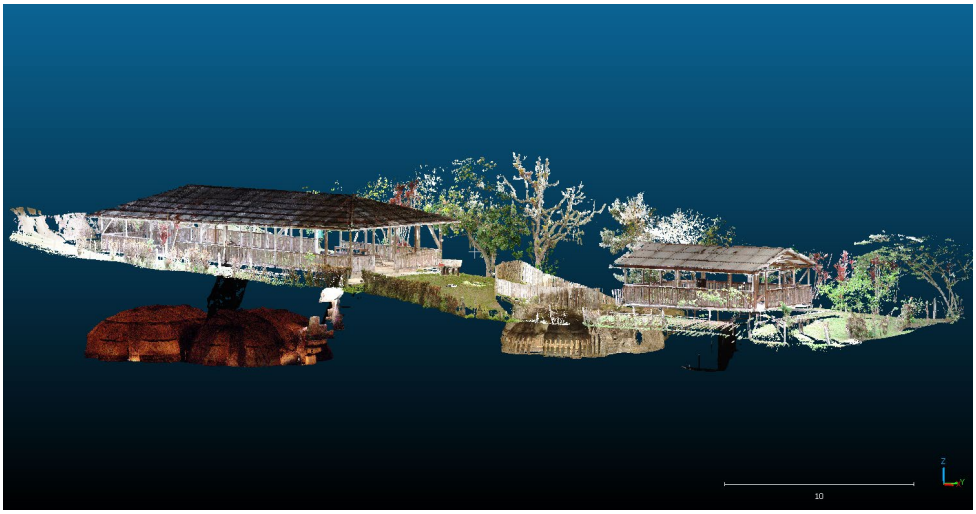
Property	State/Value
CC Object	
Name	FOTOGRAMETRIA
Visible	☑
Normals	☐
Colors	RGB
Show name (in 3D)	☐
Box dimensions	X: 95.25 (835.909 : 931.159) Y: 41.878 (778.327 : 820.205) Z: 16.401 (1740.69 : 1757.09)
Shifted box center	X: 883.534 Y: 799.266 Z: 1748.89
Global box center	X: 1114883.534424 Y: 776799.265503 Z: 1748.892090
Info	Object ID: 334 - Children: 1
Current Display	3D View 1
Cloud	
Points	2,077,821
Global shift	(-1114000.00;-776000.00;0.00)
Global scale	1.000000
Point size	Default

8.7.2. Nube de puntos LiDAR

El LiDAR es muy eficiente en la captura de detalles geométricos precisos, incluso en áreas complejas o con poca textura (ver figura 73).

Figura 73

Nube de puntos a partir de lidar Cloud Compare



Fuente. Propia, Cloud Compare

Figura 74

Características de Nube de puntos a partir de lidar Cloud Compare

Property	State/Value
CC Object	
Name	LIDAR
Visible	☑
Colors	RGB
Show name (in 3D)	☐
Box dimensions	X: 52.9532 (877.309 : 930.262) Y: 32.5515 (784.898 : 817.45) Z: 11.0176 (1739.57 : 1750.59)
Shifted box center	X: 903.785 Y: 801.174 Z: 1745.08
Global box center	X: 1114903.785339 Y: 776801.174194 Z: 1745.076660
Info	Object ID: 331 - Children: 2
Current Display	3D View 1
Cloud	
Points	357,585,539
Global shift	(-1114000.00;-776000.00;0.00)
Global scale	1.000000
Point size	Default

Fuente. Propia, Cloud Compare

8.7.3. Unión de nubes de puntos Fotogramétricos y LiDAR

Este proceso se llevó a cabo a partir de la georreferenciación de cada una de las nubes, considerando que ambos insumos contaban con coordenadas precisas, el empalme se realizó a partir de la herramienta “Alings two clouds by picking (at least 4) equivalent point pairs” la cual permite ubicar puntos en común con sus respectivas coordenadas, para ello se emplearon los puntos de control terrestre y las estructuras identificables (esquinas de cobertizos, columnas, etc), con base en cinco puntos en común, se desarrolló el empalme, basados en la metodología de registro y unión, realizada previamente con la información LIDAR. A pesar del apoyo de la herramienta, el empalme no se logró por completo, por ende, se optó por una unión manual, dentro del mismo software, finalizando el proceso de manera exitosa.

Al combinar ambas fuentes de datos, se pueden complementar sus fortalezas y compensar

sus limitaciones. El proceso de unión implica el alineamiento y la fusión de las nubes de puntos fotogramétricas y LiDAR. Este producto combinado aprovecha las ventajas de ambas técnicas, superando las limitaciones individuales y ofreciendo una representación más optima y precisa del entorno con las nubes de puntos georreferenciadas previamente en los softwares de FaroScene y Agisoft Metashape en el sistema de coordenadas gauss Kruger origen magna oeste.

Esta nube de puntos unificada (ver figuras 75 y 76) puede ser utilizada para diversas aplicaciones, como la generación de modelos 3D detallados de los hipogeos relacionada con la topografía externa del alto de San Andrés, estructuras de las cubiertas. En el análisis de las tumbas monumentales, proporciona información valiosa para la inspección, mantenimiento y gestión de este patrimonio, documentando precisamente este sitio histórico y el estudio detallado de sus restos arqueológicos.

Figura 75

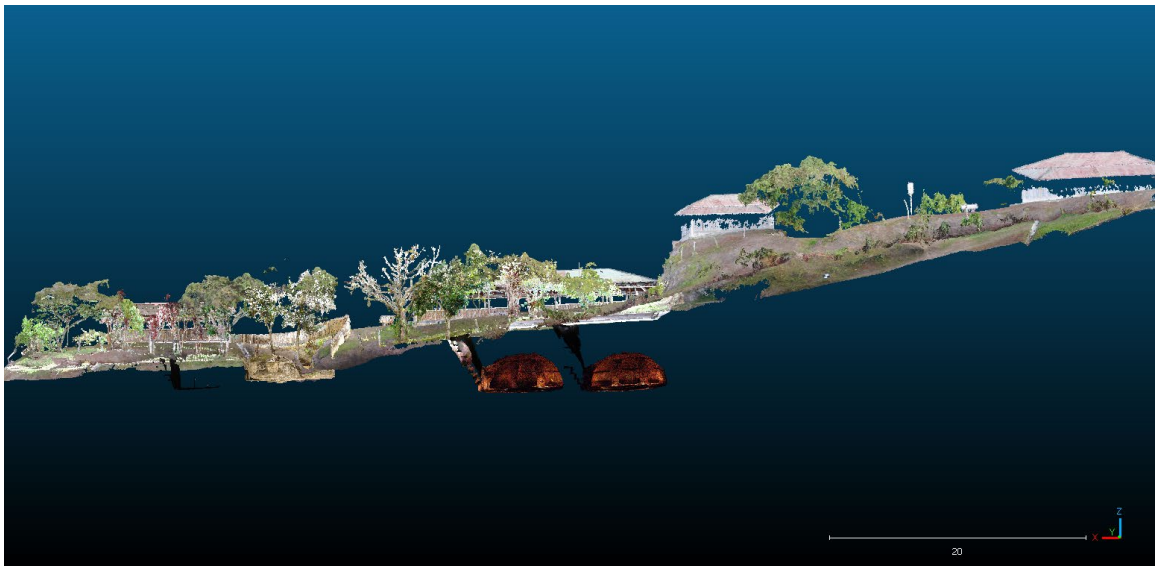
Unión de nubes de puntos Lidar y Fotogramétrica



Fuente. Propia, Cloud Compare

Figura 76

Unión de nubes de puntos Lidar y Fotogramétrica



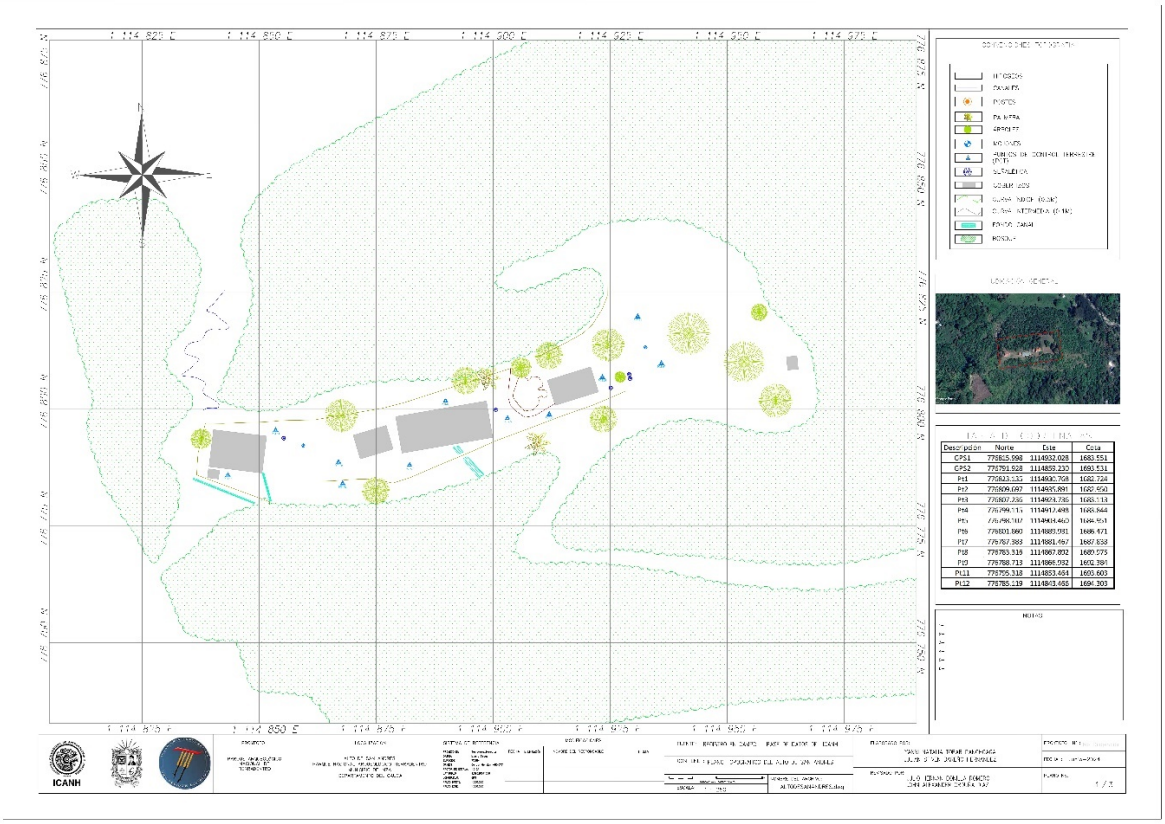
Fuente. Propia, Cloud Compare

8.8. Planos topográficos

La obtención de planos topográficos precisos se realiza mediante un proceso que combina técnicas fotogramétricas y de sensores remotos utilizando orto mosaicos y el levantamiento RTK. Un orto mosaico es una imagen georreferenciada y orto rectificada, compuesta las 70 imágenes aéreas, que representa una vista sin distorsiones de un área. se extrajeron y vectorizaron elementos topográficos, puntos de elevación y líneas de quiebre. Finalmente, se aplica simbología cartográfica y se añaden elementos auxiliares para obtener el plano topográfico final, preciso y detallado, combinando información visual del orto mosaico con datos geométricos del MDE. Este plano puede ser utilizado para tomar medidas del alto y apoyarse para tomar decisiones.

Figura 77

Plano topográfico del alto de San Andrés



Fuente. Propia, AutoCAD Civil 3D

8.9. Realidad Virtual

A partir del software FaroScene VR Viewer y la herramienta Explorar de Faro Scene son productos diseñados para permitir una visualización en realidad virtual de los datos 3D capturados y procesados con el software Faro Scene.

Faro VR Viewer es una aplicación independiente de realidad virtual que permite cargar archivos de escena 3D de Faro Scene (.fls) y explorarlos de manera inmersiva utilizando dispositivos de realidad virtual compatibles como gafas de RV. Esta aplicación ofrece una experiencia completa de realidad virtual, permitiendo al usuario caminar virtualmente dentro

del modelo 3D e inspeccionarlo desde diferentes ángulos y perspectivas. Es ideal para revisiones de diseño, presentaciones y análisis detallados de entornos escaneados.

Figura 78

Inmersión en la realidad virtual del plano de navegación en el software faro Scene.



Fuente. Propia, FaroScene

Por otro lado, la herramienta Explorar está integrada directamente en el software Faro Scene. Esta herramienta permite al usuario navegar y explorar el modelo 3D dentro del propio software, sin necesidad de dispositivos de realidad virtual adicionales. Aunque no es una experiencia de realidad virtual completa, la herramienta Explorar ofrece una vista inmersiva del modelo 3D, permitiendo al usuario moverse libremente dentro del entorno escaneado utilizando los controles de ratón y teclado. Es una opción práctica para una revisión rápida y una inspección inicial de los datos de escaneo.

Figura 79

Inmersión en la realidad virtual dentro del Hipogeo SA-5 en el software faro Scene.



Fuente. Propia, FaroScene

Tanto Faro VR Viewer como la herramienta Explorar brindan a los usuarios la capacidad de visualizar y explorar de manera intuitiva y detallada los datos 3D capturados con los escáneres láser de Faro, aprovechando las ventajas de la realidad virtual y la exploración inmersiva. Estas herramientas son complementos valiosos para el software Faro Scene, ampliando las capacidades de visualización y análisis de los modelos 3D de alta precisión.

Figura 80

Meta Quest 3



Fuente. https://www.heraldo.es/

La capacidad de tomar medidas precisas directamente en los modelos 3D visualizados en realidad virtual es una característica clave de estas herramientas. Permite un análisis y una inspección detallados del entorno escaneado, aprovechando la inmersión y la percepción espacial mejorada que ofrece la realidad virtual. Esto resulta especialmente útil en aplicaciones como construcción, manufactura, ingeniería inversa, entre otras, donde la precisión de las mediciones es crucial.

Figura 81

Toma de medidas en la realidad virtual dentro del Hipogeo SA-5 en el software faro Scene.



Fuente. Propia, FaroScene

9. Conclusiones

El presente proyecto constituye un claro ejemplo de cómo la ingeniería y las nuevas tecnologías pueden contribuir significativamente a la preservación y divulgación del patrimonio cultural. Los trabajos realizados en el Parque Arqueológico de Tierradentro han evidenciado la importancia trascendental de salvaguardar estos legados históricos para las presentes y futuras generaciones.

La consecución de la red geodésica ajustada constituye el pilar fundamental para la georreferenciación de todos los productos derivados del proyecto, garantizando la consistencia geométrica y posicional de la información capturada en las sucesivas fases de trabajo.

La implementación de técnicas innovadoras como el escaneo láser terrestre (Lidar) y la realidad virtual han demostrado su gran potencial para documentar y recrear de manera precisa y detallada los vestigios arqueológicos presentes en la zona. Estas herramientas brindan nuevas posibilidades de estudio, análisis e interpretación sin necesidad de intervenciones directas que pondrían en riesgo la integridad de los sitios. Así mismo, facilitan la divulgación y acceso virtual a estos patrimonios, fomentando su conocimiento y apropiación por parte de la sociedad.

El desarrollo de este proyecto ha reafirmado la naturaleza transversal y multidisciplinaria inherente a las iniciativas de preservación patrimonial. La confluencia de diversos campos como la arqueología, la topografía, la fotogrametría y las geociencias, entre otros, ha sido fundamental para abordar de manera integral los desafíos planteados. Ninguna disciplina actúa de manera aislada, sino que se complementan y retroalimentan mutuamente, enriqueciendo los resultados obtenidos.

En este sentido, la ingeniería topográfica ha desempeñado un rol esencial al proveer el marco de referencia posicional preciso que sustenta la consistencia geométrica y geoespacial de toda la información capturada. Esto demuestra cómo áreas aparentemente disímiles como la topografía y la arqueología se entrelazan y potencian, contribuyendo conjuntamente a la consecución de objetivos mayores en pro de la preservación del legado cultural.

Finalmente, es importante resaltar que este proyecto sienta un precedente valioso al integrar de manera efectiva la tecnología y la innovación en los procesos de documentación, resguardo y difusión del patrimonio arqueológico nacional. Se abre así un camino prometedor para futuras iniciativas que aprovechen estas herramientas en beneficiode la conservación de nuestra riqueza cultural.

10. Recomendaciones

Realizar mediciones electromagnéticas antes de iniciar cualquier operación de posicionamiento o vuelo con dron. Estas mediciones proporcionarán información crucial sobre el nivel de interferencia electromagnética en la zona de trabajo, lo que ayudará a anticipar posibles problemas y a tomar medidas preventivas para garantizar la precisión y fiabilidad de los datos recopilados. Además, estas mediciones pueden servir como una referencia útil para evaluar el impacto potencial del campo electromagnético en los equipos de posicionamiento y vuelo, permitiendo ajustes o selección de equipos adecuados para minimizar la interferencia y maximizar la precisión de los resultados obtenidos.

Se sugiere realizar una revisión exhaustiva de todos los equipos que se utilizarán en áreas remotas o de difícil acceso, como los altos del parque, dado que la falta de acceso a energía podría ser un desafío importante. Es crucial asegurarse de que todos los equipos estén completamente cargados y operativos antes de partir, ya que la falta de energía eléctrica podría ocasionar retrasos significativos en el trabajo. Además, considerar llevar baterías adicionales o fuentes de energía alternativas para garantizar la continuidad de las operaciones en caso de que se agoten las fuentes de energía principales durante el trabajo de campo. Esta precaución ayudará a evitar contratiempos y a mantener la eficiencia en el proceso de recolección de datos en entornos remotos.

Se recomienda realizar escaneos en los ingresos de los hipogeos, asegurándose de que al menos un escaneo se traslape con otro en un mínimo del 40%. Este traslape garantizará una cobertura adecuada de la zona de interés y facilitará una integración fluida de los datos para obtener un modelo tridimensional preciso y completo. Además, al escanear los ingresos de los hipogeos, se capturarán detalles importantes que pueden ser críticos para el análisis y la interpretación del sitio. Este enfoque estratégico maximizará la calidad y la utilidad de los

datos recopilados, proporcionando una representación detallada y precisa de los hipogeos y su entorno para futuros estudios y análisis.

Es fundamental contar con equipos de alta gama para el procesamiento de datos, así como con licencias de software adecuadas. Estos recursos son esenciales para garantizar un procesamiento eficiente y preciso de los datos recopilados, especialmente en proyectos que requieren un alto nivel de detalle y complejidad. Equipos potentes pueden acelerar significativamente los tiempos de procesamiento y permitir la manipulación de grandes volúmenes de datos sin comprometer la calidad. Además, contar con licencias de software proporciona acceso completo a las herramientas y funcionalidades necesarias para realizar análisis avanzados y generar resultados de alta calidad. Esta combinación de hardware y software de alta calidad es fundamental para el éxito de proyectos de escaneo láser 3D y otras aplicaciones de procesamiento de datos espaciales.

11. Anexos

Tabla 32

Tabla de anexos

FASE	PRODUCTO	DESCRIPCIÓN
FASE II	Vértices de referencia	Materializados en campo
	Coordenadas precisas	En época 2018.0, según la norma
	Levantamiento topográfico	Listado de coordenadas de cada punto levantado
	Plano topográfico	Plano en planta de la zona en estudio
	Plano planta-perfil	Plano planta perfil de los hipogeos.
FASE III	Aerofotografías	70 fotografías empleadas
	Nube de puntos RGB	Nube de la zona de interés
	Nube de puntos clasificada	Clasificación de puntos de terreno, vegetación y construcciones
	Orto mosaico Modelo digital de elevación	En conjunto con el archivo trabajado
	Plano Topográfico	Plano en AutoCAD Civil 3d .DWG
FASE IV	Nube de puntos LIDAR	Desde Faro Scene extensión. LAS. E57. RCP. OBJ
	Archivo de proyecto	Soporte de procesamiento de la información
	Imágenes 360	Google maps, código QR, link de acceso
	Realidad virtual	A partir del archivo del software FARO SCENNE
	Archivo TrueVies	Secuencia de las escenas, desde el software Leica Cyclone. LGS
	Unión de nube de puntos	Nube de puntos LIDAR y nube de puntos a partir de fotogrametría
	Paso del sol	Videos Ilustrativos del paso del sol

Fuente. Propia.

(Julio Bonilla Romero C. R., 2019) (Julio Bonilla Romero O. L., 2019)

12. Bibliografía

(IGAC), I. G. (29 de 09 de 2021). *IGAC.* Obtenido de IGAC: https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?dt=S&i=117742

Araújo, A. A. (2013). ANÁLISIS DE LOS DISEÑOS EN LOS HIPOGEOS DEL PARQUE ARQUEOLÓGICO DE TIERRADENTRO, CAUCA, COLOMBIA. *U.D.C.A ACTUALIDAD & DIVULGACIÓN CIENTIFICA*, 525-534.

Bonilla, J. N. (2012). OBSERVATORIO SOLAR MUISCA DE SAQUENZIPA: COMPROBACIÓN TOPOGRAFICA Y ASTRONOMICA. *Universidad Distrital*.

Codazzi, I. G. (15 de 09 de 2021). *IGAC.* Obtenido de IGAC: https://www.igac.gov.co/sites/default/files/transparencia/normograma/mfcl.pdf

Eduardo Forero Lloreda, C. A. (24 de 06 de 2006). Arqueología transdisciplinaria: un modelo de análisis en la gestión, la conservación y la difusión del patrimonio cultural y natural prehispánico en Colombia. *Boletín de Antropología Universidad de Antioquia*, 288-306. Obtenido de academia: https://www.academia.edu/99603862/Arqueolog%C3%ADa_transdisciplinaria_un_modelo_de_an%C3%A1lisis_en_la_gesti%C3%B3n_la_conservaci%C3%B3n_y_la_difusi%C3%B3n_del_patrimonio_cultural_y_natural_prehisp%C3%A1nico_en_Colombia

Hinestrosa, P. G. (1982). EL ARTE DE TIERRADENTRO. *Gamboa Hinestrosa*. Obtenido de gamboahinestrosa: www.gamboahinestrosa.info

ICANH. (17 de Diciembre de 2019). *Instituto Colombiano de Antropología e Historia*. Obtenido de Instituto Colombiano de Antropología e Historia: https://www.icanh.gov.co/

IGAC, I. G. (30 de 05 de 2018). *IGAC.* Obtenido de IGAC:

https://antiguo.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/resolucion_igac_643-18_adopta_especificaciones_tecnicas_levantamientos_planimetricos_y_topograficos_0.pdf

INTERNACIONAL, I. (23 de 05 de 2018). *Icontec Internacional.* Obtenido de Icontec Internacional: https://www.ecompass.com.co/wp-content/uploads/2024/03/NTC-6271.pdf

Julio Bonilla Romero, C. R. (19 de 02 de 2019). *Arqueoastronomía en los Cojines del Zaque Tunja, Colombia.* Obtenido de Revistas Universidad Distrital Francisco José de Caldas: https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revcie/article/view/14489

Julio Bonilla Romero, O. L. (2019). La Arqueoastronomía, una alternativa de enseñanza de la Astronomía. *Dialnet*, 243.

Julio Bonilla Romero, O. L. (19 de 02 de 2019). *La Arqueoastronomía, una alternativa de enseñanza de la Astronomía Precolombina en el contexto universitario.q.* Obtenido de Revistas Universidad Distrital Francisco José de Caldas: https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revcie/article/view/14495

Pública, D. A. (06 de 02 de 2019). *Decreto 138 de 2019*. Obtenido de Funcion Pública: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=90526

Rubén Cejudo, F. M. (2022). SOBRE LA EDAD DE LOS HIPOGEOS DE TIERRADENTRO, COLOMBIA: INTENTO DE DATACIÓN DIRECTA DE LA PINTURA ROJA MEDIANTE LA MAGNETIZACIÓN REMANENTE PICTÓRICA. *ARQUEOLOGÍA IBEROAMERICANA*, 1989-4104. Obtenido de ARQUEOLOGÍA IBEROAMERICANA: https://laiesken.net/arqueologia/

SIRGAS. (2021). *SIRGAS*. Obtenido de SIRGAS: https://sirgas.ipgh.org

UNESCO. (s.f.). *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: https://www.unesco.org/es