Trabajo Fin de Grado

Modelización 3D con láser escáner de corto alcance

3D modeling with short range laser scanner

Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de los Recursos mineros

Autor: Pablo Sedano Cibrian
Director: Julio Manuel de Luis Ruiz
Convocatoria: Julio 2024

AGRADECIMIENTOS

Es realmente difícil expresar con palabras mi agradecimiento a todas las personas que me han apoyado y ayudado a lo largo de este camino. No solo quiero agradecer a aquellos que han contribuido directamente en la realización de mi Trabajo de Fin de Grado, sino también a todos aquellos con quienes he compartido la experiencia universitaria desde el primer día hasta este momento.

En primer lugar, quiero agradecer profundamente a mi tutor, Julio Manuel de Luis Ruiz. Su constante apoyo, ayuda y guía han sido fundamentales durante todo este camino, no solo en la elaboración de este trabajo. Su disposición para orientarme ha sido esencial para mi éxito académico.

A mis compañeros de clase, con quienes comencé este camino, les agradezco por haber estado ahí para superar juntos todas las pruebas y dificultades que se presentaron en el camino. Su amistad y apoyo han hecho que los momentos difíciles sean más llevaderos y que los éxitos sean aún más reconfortables.

A mis amigos de siempre, quienes comparten mi día a día y a quienes les confío mis problemas tanto de la vida como de la universidad, les agradezco por su infinita paciencia y por siempre sacarme una sonrisa con sus bromas. Su compañía y comprensión han sido un pilar fundamental en mi vida.

No puedo dejar de mencionar a mis amigos de Ostrava, ese grupo maravilloso que conocí durante mi experiencia de Erasmus. Casi no realicé este intercambio por miedo a dar el paso solo, pero ahora somos inseparables. Juntos hemos estudiado, viajado, apoyado mutuamente y los más importante disfrutado de esta experiencia juntos. Esta amistad da igual el tiempo y la distancia, que hasta el día de hoy seguimos ayudándonos y disfrutando de viajes.

Finalmente, y lo más importante para mí, quiero agradecer a mi familia. Han soportado conmigo tanto los momentos más difíciles como los más hermosos. Han estado ahí, incluso cuando sé que se desesperaban, pero nunca se rindieron. Me animaron a seguir adelante, y por eso, les quiero dar las gracias de todo corazón. Les prometo que siempre estaré ahí para ellos, así como ellos estuvieron para mí, y nunca permitiré que se rindan. Y a todos aquellos que familiares que ya no se encuentran conmigo pero que alguna vez estuvieron conmigo, me marcaron y me gustaría que siguieran conmigo y ya no es posible.

INDICE

AGRADECIMIENTOS 3
INDICE DE ILUSTRACIONES 6
INDICE DE TABLAS 8
INDICE DE ECUACIONES 9
1 INTRODUCCION 10
1.1 MARCO DE REFERENCIA ADMINISTRATIVO Y JUSTIFICACIÓN 10
1.2 MARCO CIENTIFICO -TECNOLOGICO 10
1.3 CONCRECION DE OBJETIVOS 12
1.3.1 Objetivos Generales 12
1.3.2 Objetivos Específicos 13
2 ESTADO DEL ARTE 15
2.1 INTRODUCCION GENERAL 15
2.1.1 Concepto de modelo 15
2.1.2 Modelos digitales del terreno 16
2.1.3 Modelos digitales y Modelos analógicos 17
2.1.4 Justificación y principios metodológicos 19
2.2 MODELOS DIGITALES DE TERRENO MDT 19
2.2.1 Introducción 19
2.2.2 Modelos vectoriales 20
2.2.3 Modelos de contornos 21
2.2.4 Red de triángulos irregulares 22
2.2.5 Modelos Ráster o Teselar 23
2.2.6 Matrices regulares 23
2.2.7 Matrices de resolución variable 24
2.2.8 Otras estructuras 24
2.2.9 Criterios de selección de la estructura del mide 25
2.2.10 Rasterización y vectorización 26
2.3 CAPTURA DE INFORMACION 26
2.3.1 Métodos directos 27
2.3.2 Sistemas de posicionamiento global 28
2.3.3 Levantamiento topográfico clásico 28
2.3.4 Laser escáner 29
2.3.5 Métodos indirectos 31
2.4 GENERACION DE MODELOS DIGITALES 33
2.4.1 Introducción 33

2.4.2 Triangulación de Delaunay 34
2.4.3 Triangulaciones de un conjunto de puntos 35
2.4.4 Diagramas de Voronoi 36
2.4.5 Cálculo de la triangulación de Delaunay 39
2.4.6 Modelos digitales del terreno constreñidos 42
2.5 EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN 47
2.5.1 Función inversa de la distancia 48
2.5.2 Estimación de superficies dependencia 48
2.5.3 Interpolación según el método “Kriging” 49
3 PROPUESTA METODOLOGICA 53
3.1 INTRODUCCION Y CONCRECION DE OBJETIVOS 53
3.2 DESCRIPCION TECNICA PROPUESTA 54
3.2.1 Instrumental el láser-escáner 54
3.2.2 Tipos de laser escáner 54
3.3 METODOLOGIA 69
3.3.1 Instrumental 69
3.3.2 Manejo del instrumental 71
3.3.3 Función de teclado y ratón 83
3.3.4 Posibles errores o dificultades 84
4 RESULTADOS 85
4.1 MODELIZACIÓN 85
4.2 CAPTURA DE NUBES DE PUNTOS 89
4.2.1 Pirita 91
4.2.2 Fluorita 93
4.2.3 Blenda 95
4.3 PROCESAMIENTO DE NUBES DE PUNTOS 98
4.3.1 Pirita 99
4.3.2 Fluorita 101
4.3.3 Blenda 103
4.4 COMPARACION DE RESULTADOS 106
4.5 CONTRASTE METRICO 110
5 DISCUSIÓN 113
6 CONCLUSIÓN 116
7 REFERENCIAS 118

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 – Recreación modelo vectorial. 21
Ilustración 2 – Recreación de un modelo vectorial mediante modelos de contorno. 22
Ilustración 3 – Recreación de un modelo vectorial mediante triangulaciones. 22
Ilustración 4 – Recreación de un modelo ráster o teselar. 23
Ilustración 5 – Recreación de un modelo ráster mediante modelo regular. 24
Ilustración 6 – Captura de información por GPS. 28
Ilustración 7 – Captura de información por estación topográfica. 29
Ilustración 8 – Captura de información mediante ALS. 30
Ilustración 9 – Captura de información mediante Laser escáner. 30
Ilustración 10 – Diferencias entre diferentes triangulaciones 35
Ilustración 11 – Triangulación para maximizar los ángulos mínimos. 36
Ilustración 12 – Definición del lado “ilegal” 36
Ilustración 13 – Diagrama de Voronoi. 37
Ilustración 14 – Generación e diagrama de Voronoi mediante el algoritmo de Fortune. 38
Ilustración 15 – Aparición de un nuevo lado en el diagrama de Voronoi 38
Ilustración 16 – Proceso de aparición de un vértice en el diagrama de Voronoi. 38
Ilustración 17 – Corresponde al diagrama de Voronoi con la triangulación de Delaunay. 39
Ilustración 18 – Triangulo máximo para definición de triangulación de Delaunay. 40
Ilustración 19 – Inserción de un nuevo punto en una triangulación 41
Ilustración 20 – Efecto de introducir un nuevo punto. 41
Ilustración 21 – Modelo digital del terreno de contornos sin roturas y con roturas. 42
Ilustración 22 – Proceso de definición de un MDT con una línea de rotura. 44
Ilustración 23 – Necesidad de una nueva triangulación mejorada. 47
Ilustración 24 – Esquema de funcionamiento de laser escáner de tiempo de vuelo. 55
Ilustración 25 – Esquema de funcionamiento de laser escáner de técnica indirecta. 61
Ilustración 26 – Cámara CCD. 63
Ilustración 27 – Cámara CMOS. 63
Ilustración 28 – Cámara de línea. 63
Ilustración 29 – Cámara matriciales. 64
Ilustración 30 – Representación en funcionamiento de luz Blanca. 67
Ilustración 31 – Representación en funcionamiento de luz azul. 68
Ilustración 32 – Comparativa entre los tipos de luz. 69
Ilustración 33 – Objetos que se encuentran en el maletín del dispositivo. 69
Ilustración 34 – Forma de conectar el dispositivo 70
Ilustración 35 – Indicaciones para conectar el cable al dispositivo correctamente. 71
Ilustración 36 – Indicaciones para conectar la base giratoria a la alimentación 71
Ilustración 37 – Pantalla inicial del programa. 71
Ilustración 38 – Distancias de colocación para el escaneo. 72
Ilustración 39 – Ajustes del escaneo. 72
Ilustración 40 – Indicativo para la distancia del escaneo. 73
Ilustración 41 – Correcta colocación del objeto. 73
Ilustración 42 – Selección del formato de escaneo y un ejemplo de resultado. 73
Ilustración 43 – Ajuste de luz e indicación del correcto. 74
Ilustración 44 – Indicaciones de correcta limpieza de alrededores. 74
Ilustración 45 – Pantalla de trabajo de la opción “Escaneo de mesa giratoria”. 75
Ilustración 46 – Visión previa para realizar el ajuste 75
Ilustración 47 – Correcto escaneado de la base. 76
Ilustración 48 – Proceso de escaneado de un objeto. 76
Ilustración 49 – Resultado final del escaneo de un objeto. 77

Ilustración 50 – Colocación previa al alineado automático..... 78
Ilustración 51 – Proceso de alineación automático. 78
Ilustración 52 – Proceso de alineación manual en 3 puntos. 79
Ilustración 53 – Localización de las funciones de Procesar. 79
Ilustración 54 – Funciones disponibles para el procesado. 80
Ilustración 55 – Selección de escaneaos deseados para procesar. 80
Ilustración 56 –Menú de seleccionado de capas para su procesamiento. 81
Ilustración 57 – Resumen del proceso del escaneo automático. 81
Ilustración 58 – Pantalla de trabajo de escaneo manual. 82
Ilustración 59 – Selección de tres zonas para la eliminación manual de la base. 82
Ilustración 60 – Funciones disponibles en Editar. 83
Ilustración 61 – Usos de teclado y ratón en los diferentes sistemas operativos. 83
Ilustración 62 – Ejemplos de diferentes superficies de posibles problemas. 84
Ilustración 63 – Resultado de la solución una vez aplicada. 84
Ilustración 64 – Muestra de pirita empleada desde varias perspectivas. 86
Ilustración 65 – Muestra de fluorita empleada desde varias perspectivas. 87
Ilustración 66 – Muestra de blenda empleada desde varias perspectivas. 89
Ilustración 67 – Resultado de la nube de puntos de la pirita por el problema de la reflectancia. 89
Ilustración 68 – Resultado de la nube de puntos de la fluorita por el problema de la reflexión. 90
Ilustración 69 – Resultado de la pirita tras usar la solución de champú en seco 90
Ilustración 70 – Resultado de la fluorita tras usar la solución de champú en seco. 91
Ilustración 71 – Nube de puntos de la pirita en automático. 92
Ilustración 72 – Nube de puntos de la pirita manual. 93
Ilustración 73 – Colocación previa de las nubes antes de la alineación. 94
Ilustración 74 – Nubes de puntos de la fluorita automática. 94
Ilustración 75 – Nubes de puntos de la fluorita manual. 95
Ilustración 76 – Nubes de puntos del proceso automático alineadas y en diferentes perspectivas 96
Ilustración 77 – Nubes de puntos del proceso manual en diferentes perspectivas y alineadas. .. 97
Ilustración 78 – Nubes de puntos de la blenda alineadas y con diferentes perspectivas. 97
Ilustración 79 – Nube de puntos generada a partir del procesado de los escaneados. 99
Ilustración 80 – Triangulación generada en la pirita tras su procesado. 100
Ilustración 81 – Comparación de modelos digitales con diferentes procesamientos. 100
Ilustración 82 – Comparación de ambos modelos digitales manuales con diferente procesamiento. 101
Ilustración 83 – Nube de puntos final tras su procesado. 102
Ilustración 84 – Triangulación de las nubes de puntos tras su procesado. 102
Ilustración 85 – Comparación de ambos procesos en la generación de modelos digitales en automático de la fluorita. 102
Ilustración 86 – Comparación de ambos procesos de generación de modelos digitales en manual de la fluorita. 103
Ilustración 87 – Nubes de puntos de ambos procesos tras su procesado. 104
Ilustración 88 – Triangulación de las nubes de puntos tras su procesado por el software. 104
Ilustración 89 – Comparación de los modelos digitales en proceso automático de la blenda... 104
Ilustración 90 – Comparación de los modelos digitales en proceso manual de la blenda. 105
Ilustración 91 – Nube de puntos final procesada por el software. 106
Ilustración 92 – Triangulación en la blenda realizada por el software. 106
Ilustración 93 – Modelo digital de blenda con textura. 106
Ilustración 94 – Calibre y micrómetro. 110

INDICE DE TABLAS

Tabla Numero 1 – Comparación entre modelo MAT y MDT 18
Tabla Numero 2 – Ventajas y desventajas entre los diferentes modelos. 20
Tabla Numero 3 – Comparación de propiedades de los diferentes instrumentos de medición... 27
Tabla Numero 4 – Comparación de las propiedades de las diferentes técnicas de laser escáner.30
Tabla Numero 5- Comparativa de ventajas y desventajas de los tipos de espejos. 61
Tabla Numero 6- Comparación de características de los dos tipos de luz 68
Tabla Numero 7 – Comparación de características de ajuste de parámetros y tiempo de escaneo por muestra. 107
Tabla Numero 8 – Comparativa de pesaje entre las muestras. 107
Tabla 9 – Comparación de pesaje exacte de los archivos de los escaneos. 107
Tabla Numero 10 – Comparación de características de tiempo en procesado y alineación. 108
Tabla Numero 11 – Comparación de características relacionados con los resultados de los modelos. 109
Tabla Numero 12 – Fortalezas y debilidades de ls diferentes escaneados según la muestra y procedimiento. 109
Tabla Numero 13 – Mediciones en muestra de pirita. 111
Tabla Numero 14 – Mediciones en muestra de fluorita. 111
Tabla Numero 15 –Mediciones en muestra de blenda 111
Tabla 16 – Tabla de medias en mediciones y media total del error 112

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 35
Ecuación 2 35
Ecuación 3 40
Ecuación 4 40
Ecuación 5 40
Ecuación 6 48
Ecuación 7 48
Ecuación 8 49
Ecuación 9 49
Ecuación 10 49
Ecuación 11 50
Ecuación 12 50
Ecuación 13 50
Ecuación 14 51
Ecuación 15 51
Ecuación 16 51
Ecuación 17 56
Ecuación 18 58
Ecuación 19 58
Ecuación 20 60
Ecuación 21 60
Ecuación 22 65
Ecuación 23 65
Ecuación 24 66
Ecuación 25 66
Ecuación 26 66
Ecuación 27 67

1 INTRODUCCION

1.1 MARCO DE REFERENCIA ADMINISTRATIVO Y JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se encuentra dentro del contexto de la finalización de los estudios de Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros. Representa la aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo de las diversas asignaturas que se imparten en este grado, las experiencias por las que a pasado el estudiante a lo largo de su formación académica a un caso práctico en el que se pretende dar la solución a un problema real.

Es importante destacar que este trabajo forma parte de una de las líneas de investigación desarrolladas por parte del Grupo de I+D+i Ingeniería Cartográfica y Explotación de Minas, que lleva a cabo su actividad investigadora en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energías de la Universidad de Cantabria. La participación en este proyecto por parte del autor del proyecto refleja, el clima de colaboración e implicación del Grupo de Investigación con la formación de estudiantes en sus estadios finales del proceso formativo. Desde estas líneas el autor del trabajo desea expresar el agradecimiento al Gurpo de Investigación por asumir la Dirección del Trabajo, así como poner a su disposición el instrumental, materiales y conocimientos para desarrollar el Trabajo.

Este Trabajo se centra en algo tan importante en el ámbito de la Ingeniería, y por tanto también en la Ingeniería Minera, como es la modelización del territorio y de los objetos. En Ingeniería es habitual generar modelos digitales que representen de la forma más fidedigna posible, para sobre el modelo digital poder plantear la solución más adecuada y poder desarrollar el clásico proyecto ingenieríl en el que se describe la solución, la forma de llevarla a cabo y la correspondiente valoración económica. Para llevar a cabo este Trabajo se ha utilizado un instrumental adquirido por el Centro en el Plan de Equipamiento en vigor, siendo por lo tanto un instrumental totalmente novedoso y por tanto los resultados también lo son.

1.2 MARCO CIENTIFICO -TECNOLOGICO

La modelización tridimensional (3D) ha revolucionado el campo de la ingeniería hasta el punto de convertirse en una herramienta fundamental en el campo de la ingeniería, esta tecnología ha transformado la forma en la que se diseñan, desarrollan y prueban productos y proyectos de una manera tridimensional ayudando a los ingenieros a comprender de mejor manera al proporcionar una representación virtual precisa y detallada a través de software de diseño de asistido por ordenador (DAO). Este tipo de tecnología ofrece una amplia gama de funciones herramientas para generar representación de geometrías complejas de terrenos, estructuras, objetos, etc. Este Trabajo se centra en la generación de modelos 3D a partir de la observación de objetos con láser escáner, esta tecnología ofrece una serie de ventajas que la hacen indispensable a la hora de la planificación, el diseño y la operación de proyectos, estas ventajas pueden ser:

- Visualización y análisis de datos precisa: los modelos 3D permiten una visualización precisa y realistas de objetos y estructuras a la vez de facilitar el análisis de datos geológicos, topográficos y estructurales.
- Mejora de seguridad: Los modelos 3D pueden mejorar la seguridad de ciertas operaciones al tener un modelo 3D es más fácil identificar y evaluar posibles riesgos potenciales.
- Mejora de la planificación: Los modelos 3D permiten a los ingenieros planificar y diseñar proyectos con mayor precisión y eficiencia.

- Simulación de escenarios: los modelos 3D se pueden utilizar para simular diferentes escenarios lo que permite al ingeniero evaluar el impacto ambiental y la viabilidad económica de los proyectos.
- Reducción de costes y tiempo: Los modelos 3D se pueden ayudar a reducir costes y tiempo en el proceso de desarrollo, al permitir la detección de posibles errores y optimizar el diseño.
- Una comunicación más eficiente: los modelos 3D facilitan la comunicación entre ingenieros, geólogos, topógrafos, clientes, etc., al proporcionar una representación visual clara y comprensible del proyecto.

Actualmente existen diferentes técnicas que permiten la modelización 3D, todas ellas tienen ventajas e inconvenientes que serán debidamente desarrolladas y que de forma breve se pueden sintetizar en:

- Topografía Clásica: Es sin duda la técnica más primitiva para obtener información tridimensional, sigue teniendo plena vigencia, pero en la representación, pero del territorio, más que de los objetos. La labor de abstracción que lleva a cabo el observador genera representaciones con pocos puntos, pero muy representativos.
- Sistemas de Posicionamiento Global: Es otra técnica muy similar a la anterior en la que destaca el carácter global de los posicionamientos, enfocados a la representación del territorio más que de los objetos.
- Fotogrametría: Esta técnica tiene varias derivadas o afecciones, la primera es la fotogrametría aérea, planteada para la representación del territorio, Existe otra afección que es la fotogrametría terrestre, más enfocada a la modelización de objetos, finalmente la tercera afección que es la fotogrametría Structure from Motion (SfM), utilizada con los drones constituye la primera la primera técnica que permite la captura masiva de información para la generación de modelos.
- Láser Escáner Aerotrasportado (ALS), también llamado con el acrónimo (LIDAR) del inglés Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging. Este sistema conlleva la observación con un láser escáner montado en un avión de una nube de puntos masiva. Sin duda es una técnica muy apropiada para modelizar grandes extensiones del territorio, más que de objetos.
- Láser Escáner Terrestre (TLS): Apoyándose en los principios de la topografía clásica, se sustituye la clásica Estación Total por los modernos Láser Escáner, permite la obtención masiva de puntos de forma cuasiautomática. Actualmente existen dos técnicas claramente diferenciadas que se detallan a continuación puesto que precisamente esta técnica en la que se centra el presente Trabajo Fin de Grado.
    - TÉCNICAS INDIRECTAS DE MEDIDA: En estos equipos también llamados de corto alcance, un haz láser fuertemente colimado recorre el blanco, mientras una cámara sigue los movimientos del haz sobre el modelo y calcula la paralaje de cada punto, obteniendo la distancia escáner-objeto. Precisiones en la medida de distancias en el entorno de décimas de milímetro, a base de limitar el alcance entre 2 y 4 m.
    - TÉCNICAS DIRECTAS DE MEDIDA: La mayor parte utiliza distanciómetros basados en el establecimiento del retardo entre la emisión y recepción de un pulso de luz emitido por un láser en la dirección del objeto

o superficie a escanear, esta técnica se denomina habitualmente “tiempo de vuelo (TOF)” y genera precisiones de 3 mm. para distancias de 100 m.

Una vez generado un modelo 3D, su representación y explotación se puede llevar a cabo por diferentes técnicas, en función del objeto tanto de la representación como de la propia explotación:

- Programas de Modelado, el software de modelo por lo general contienen herramientas de visualización y explotación de los modelos. En la actualidad el espectro de este tipo se software es amplio.
- Programas de DAO, este tipo de programas permiten generar modelos y por supuesto la visualización y su correspondiente explotación. A diferencia del software anterior este parte de la nube de puntos, cosa que el anterior permite generar la nube a partir de la cual se construye el modelo.
- Programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), integra, analiza información relativa a datos geoespaciales relativos al territorio
- Software GIS (Geographic information System): Se utiliza para integrar y analizar datos espaciales relacionados con la topografía.
- Impresión 3D: utilizada para crear prototipos físicos, piezas y objetos a partir de modelos 3D. Algunos de los materiales más utilizados en esta técnica son plásticos que son utilizados por su bajo coste y facilidad de uso, la resina por su alto nivel de detalle y metales para prototipos que sean resistentes y duraderos.

Los avances tecnológicos que se están implementado y desarrollando hoy en día en esta disciplina, no solo desempeñan un papel fundamental en el progreso de la ingeniería, si no que siguen en permanente evolución y que tienen continuidad en disciplinas con mucho recorrido, entre las que cabe destacar:

- Realidad virtual aumentada: esta realidad permite a los ingenieros interactuar con los modelos 3D en un entorno virtual de forma directa e instantánea lo que facilita la manipulación, detección de errores y planificación y evaluación de proyectos.
- Inteligencia artificial (IA): esta inteligencia ayuda a la automatización de diversas tareas en el proceso de modelización 3D, como la generación de mallas y clasificación de datos.
- Impresión 3D a color: esta impresión a color nos permite crear prototipos indicando por colores las partes importantes o a tener en cuenta.

En resumen, la modelización 3D es una herramienta fundamental en la ingeniería que aporta muchas ventajas para el diseño, desarrollo y prueba de productos y proyectos. Tal y como se ha descrito anteriormente, la amplia variedad de técnicas que existen para la captura y generación de modelos digitales de realidad, se hace muy difícil no encontrar una técnica que se acomode a las necesidades y disponibilidad de recursos. El estado tecnológico hace que la evolución sea constante y esto justifica trabajos como éste, en el que se pretende analizar un instrumento de nueva implementación.

1.3 CONCRECION DE OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Generales

Este Trabajo tiene como objetivo principal profundizar en el funcionamiento, manejo y posibilidades de los láseres escáner de corto alcance, en el ámbito de la industria minera moderna. Este proyecto busca comprender a fondo las capacidades y limitaciones teniendo en cuenta la

precisión y resolución espacial de los escáneres láser, centrándose especialmente en aquellos de corto alcance y bajo presupuesto.

Desarrollando el objetivo general se puede decir que uno de los objetivos generales es analizar si los láseres escáner de corto alcance poseen una calidad adecuada para su integración efectiva en operaciones mineras. Esto implica analizar la precisión de la captura de datos, la resolución espacial, el alcance efectivo, el tamaño de los objetos a modelizar, etc. todo ello teniendo en cuenta los diferentes factores ambientales, los entornos específicos, etc. que puedan afectar al rendiiento de estos equipos.

Una vez conseguido el objetivo general anterior, un segundo objetivo propone identificar las áreas de aplicación más beneficiosas de los escáneres láser de corto alcance en la industria minera y hasta donde puede complementar a los TOF. Se pretende comprender cómo estas tecnologías pueden optimizar procesos de modelización de pequeños objetos fundamentales en la Ingeniería Minera.

Un tercer objetivo general y crucial en este Trabajo persigue explorar la viabilidad económica de la implementación de escáneres láser de corto alcance en el ámbito minero. Se pretende determinar si la adopción de estas tecnologías puede resultar rentable, especialmente al considerar la perspectiva de bajo presupuesto. La reducción de costos es un factor fundamental en la evaluación de la viabilidad y utilidad práctica de estos dispositivos.

En resumen, la investigación se propone no solo comprender a fondo el funcionamiento o potencial de los escáneres láser de corto alcance, sino también evaluar su aplicabilidad en la minería, identificar sus mejores usos y analizar cómo la adopción de tecnologías de bajo presupuesto puede contribuir a la eficiencia, rentabilidad y decisiones estratégicas de las operaciones mineras por parte de las empresas y reducir el presupuesto.

1.3.2 Objetivos Específicos

Derivados de los objetivos generales descritos en el epígrafe anterior, a continuación, se concretan los objetivos específicos del Trabajo:

- Análisis de las capacidades y limitaciones de los escáneres láser de corto alcance.
    - Precisión y resolución espacial.
    - Alcance y campo de visión.
    - Velocidad de captura de datos.
    - Influencia de las condiciones ambientales.
    - Tipos de superficies y objetos detectables.
    - Limitaciones en la captura de datos.
- Análisis de las metodologías del funcionamiento y uso del escáner laser de corto alcance
    - Diseño y componentes del escáner.
    - Parámetros de medición y configuración.
    - Calibración y mantenimiento del equipo.
- Análisis del software de modelización 3d para el procesado de los datos obtenidos en las mediciones
    - Autodesk Recap Pro
    - Geomagic Wrap

  - SCENE
  - CloudCompare
  - Otros softwares relevantes.
- Análisis de la precisión, rango de observaciones y la resolución espacial de estos dispositivos en entornos específicos.
  - Importación y limpieza de nubes de puntos.
  - Generación de mallas y modelos 3D.
  - Visualización y presentación de resultados.
- Identificación de las áreas de aplicación más beneficiosas de los escáneres láser en la industria minera, topografía, ingeniería, etc.
  - Análisis de la precisión y la resolución de diferentes escáneres laser.
  - Determinación de los rangos de observación óptimos.
- Análisis de optimización de los métodos/procesos de observación con los escáneres láser de corto alcance, para intentar mejorar los procesos existentes, generar nuevas oportunidades y eficiencias en las operaciones mineras.
  - Reducción del tiempo de inspección y topografía.
  - Automatización de procesos de medición.
  - Optimización de la voladura y fragmentación del material.
- Análisis de la viabilidad económica de la implementación de esta tecnología en el contexto de presupuestos ajustados.
  - Inversión inicial en equipos y software.
  - Costos de capacitación y mantenimiento.
  - Evaluación del ahorro de costos a largo plazo.
- Análisis de la adopción de escáneres láser de corto alcance para la contribución a la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras.
  - Análisis de los beneficios económicos y operativos.
  - Demostración del valor de la tecnología.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCION GENERAL

La revolución informática que se ha producido desde el decenio de 1960 ha provocado cambios espectaculares en los procedimientos realizados en la vida del día a día, especialmente en el procesamiento y la interpretación de datos geográficos. A la función histórica de los mapas como representación territorial se ha sumado recientemente a la función de ser un documento básico para la ordenación territorial y la ejecución de todo tipo de proyectos, especialmente de ingeniería.

2.1.1 Concepto de modelo

La creación de modelos del mundo real es una práctica habitual para abordar una amplia gama de problemas en diferentes áreas de la actividad humana.[1] Estos modelos permiten obtener un conocimiento preciso de los objetos que se modelan y, a partir de este conocimiento, plantear soluciones óptimas a los problemas planteados. En este contexto, la información geométrica y temática obtenida en el proceso de modelado se convierte en la base fundamental para la toma de decisiones estratégicas y eficientes.

En el ámbito geográfico, un modelo se define como una representación simplificada de la realidad que captura un conjunto específico de sus propiedades. Esta definición implica que el modelo no es una réplica exacta del objeto o sistema original, sino una representación de menor complejidad que se concentra en las características relevantes para el problema en cuestión.

En la actualidad, existe una amplia gama de tecnologías que permiten obtener información de forma rápida, precisa y económica. Entre estas tecnologías se encuentran los métodos topográficos clásicos (estaciones topográficas, GPS), así como técnicas más modernas como la fotogrametría, el lídar y la teledetección. Estas tecnologías posibilitan la captura de grandes conjuntos de puntos (nubes de puntos) con una alta precisión en un tiempo relativamente corto.

La gestión de la información ha experimentado un notable avance gracias a la evolución del hardware y al desarrollo de técnicas y algoritmos especializados para la compresión, el rastreo y la modelización.[2] Esto ha permitido que el manejo de nubes de puntos de alta densidad y tamaño sea una tarea relativamente sencilla en la actualidad.

Los algoritmos para el tratamiento de nubes de puntos tridimensionales (3D) han experimentado un desarrollo significativo, posibilitando la geometrización de formas, la eliminación de ruido, el ajuste de entidades gráficas 3D básicas y complejas, entre otras funciones. El software actual ofrece la capacidad de manejar y modelar nubes de puntos tanto en formato 3D como en formato 2D clásico. Sin embargo, se recomienda considerar la transición hacia espacios virtuales 3D, ya que estos entornos facilitan la representación convencional de la información y abren nuevas posibilidades para el análisis y la toma de decisiones.

Los modelos se clasifican en diferentes categorías según la relación de correspondencia que establecen con la realidad:

- Modelos icónicos: La relación se basa en las propiedades morfológicas del objeto real (ejemplo: una maqueta).

- Modelos análogos: Poseen propiedades similares al objeto real, pero no son una réplica morfológica exacta (ejemplo: un mapa).
- Modelos simbólicos: Representan el objeto real mediante una simbolización matemática (geométrica, estadística, etc.).

Los modelos digitales del terreno (MDT) se clasifican como modelos simbólicos[1]. La relación de correspondencia con el objeto real se establece mediante algoritmos o formalismos matemáticos. Esta característica les confiere una serie de ventajas sobre otros tipos de modelos, como la no ambigüedad en la representación, la capacidad de modelar procesos con deducción lógica y matemática, la verificabilidad de los resultados y la posibilidad de replicar los análisis con un alto grado de precisión[2].

Los MDT se han convertido en herramientas de gran valor para la toma de decisiones en una amplia gama de campos. La evolución de las tecnologías para la adquisición de información, la gestión de datos y el modelado de nubes de puntos ha impulsado significativamente su desarrollo y aplicación, consolidándolos como instrumentos esenciales para el análisis espacial y la planificación estratégica en diferentes áreas de la actividad humana.

2.1.2 Modelos digitales del terreno

Los Modelos Digitales del Terreno (MDT) representan una categoría de modelos simbólicos que han emergido y evolucionado en consonancia con los avances tecnológicos de la era moderna. Esta innovadora concepción, definida como "conjuntos de datos numéricos que describen la distribución espacial de una característica del territorio", marca un hito en la representación del paisaje, marcando un antes y un después en la forma en que entendemos y manipulamos la información geoespacial a como se hace en los modelos analógicos[3].

La distinción fundamental entre los modelos digitales y sus predecesores analógicos reside en su naturaleza codificada en cifras, lo que permite su manipulación a través de medios informáticos[4]. La creación de modelos digitales implica la codificación meticulosa de la información para su representación virtual, transformando las relaciones espaciales y las características morfológicas en estructuras numéricas o expresiones matemáticas como pueden ser vectores, matrices, etc., lo que abre nuevas posibilidades en términos de precisión y flexibilidad en la representación del terreno.

Es crucial destacar que la variable representada en los MDT no está limitada exclusivamente a la altitud, aunque esta sea la asociación más común. Por lo tanto, resulta más importante identificar claramente la variable utilizada en la representación del modelo, existiendo diferentes tipos de MDT cada uno con unas características y aplicaciones propias, utilizando términos específicos como "modelo digital de pendientes" o "modelo digital de elevaciones", reservando el término MDT para una designación más general que abarque una variedad de propiedades del terreno.

Tipos de Modelos Digitales del Terreno:

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE): Es el tipo de MDT más común y se utiliza para representar la altimetría del terreno.

- Modelo Digital de la Superficie (MDS): Representa la superficie topográfica del terreno, incluyendo vegetación, edificios y otras estructuras.
- Modelos de Atributos del Terreno: Representan propiedades específicas del terreno, como la pendiente, la rugosidad o la permeabilidad del suelo.

Además, se suelen establecer dos condiciones suplementarias para los MDT: la existencia de una estructura interna que refleje las relaciones espaciales entre los datos, y que la variable representada sea cuantitativa y de distribución continua. Dando una definición más completa y precisa estableciendo que un MDT es una estructura numérica que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, proporcionando un marco conceptual sólido para la interpretación y manipulación de los datos[5].

En el ámbito de la cartografía tradicional, la descripción hipsométrica constituye el pilar fundamental de la representación del relieve terrestre. Sin embargo, en el contexto de los MDT, esta función es asumida por el modelo digital de elevaciones (MDE), que ofrece una descripción detallada de la altimetría de una región mediante datos discretos y continuos.

A partir del MDE, es posible generar modelos derivados que reflejen diversas características morfológicas del terreno, desde las más simples hasta las más complejas. Estos modelos pueden ser empleados para llevar a cabo una amplia gama de aplicaciones como pueden ser:

- Geología: Análisis de la estructura geológica del terreno, ubicación de fallas y pliegues, identificación de unidades geológicas, etc.
- Ingeniería: Planificación y diseño de proyectos de ingeniería como carreteras, puentes, túneles y sistemas de drenaje.
- Análisis ambiental: Modelización de la erosión del suelo, la escorrentía superficial, la infiltración del agua, la inundabilidad y otros procesos ambientales.
- Planificación urbana: Planificación del desarrollo urbano, evaluación del impacto ambiental de proyectos de construcción, determinación de la ruta óptima para la instalación de infraestructuras y optimización de la gestión del territorio.
- Simulaciones dinámicas: Sabiendo el movimiento de la luz podemos saber dónde va a aparecer las sombras, que partes van a recibir luz y cuando, etc.

La elaboración de modelos derivados y los procesos de simulación dinámica se materializan mediante el diseño de algoritmos numéricos, que consisten en secuencias explícitas de operaciones matemáticas. Estos algoritmos pueden ser revisados y ajustados mediante la comparación con datos reales obtenidos del terreno, lo que aumenta su fiabilidad y precisión, reduciendo el error en la representación del MDT y dándonos una información que sería realmente difícil de obtener.

2.1.3 Modelos digitales y Modelos analógicos

Los modelos digitales del terreno (MDT) y los modelos analógicos en forma de mapas (MAT) representan dos enfoques distintos para la cartografía y la representación del relieve terrestre. Mientras que los MDT utilizan una codificación numérica para describir

las características del terreno, los MAT se basan en convenciones gráficas plasmadas en soportes físicos. A pesar del surgimiento y avance tecnológico de los MDT, la convivencia y compatibilidad con los MAT en muchos aspectos se evidencia en el contexto actual y en su uso diario, aunque el futuro de esta relación permanece sujeto a la evolución tecnológica constante. Esta relación entre lo analógico y lo digital plantea un interesante dilema respecto a la previsión de una eventual sustitución completa, especialmente considerando la velocidad con la que avanzan las tecnologías relacionadas. aunque los mapas impresos siguen siendo esenciales para el manejo práctico de la información geoespacial.

Una comparación detallada entre los MAT y los MDT revela diferencias significativas en los usos prácticos de la información como puede ser en términos de manejo, estabilidad, transportabilidad, actualización, tratamiento numérico y capacidad de simulación. Por ejemplo, mientras que los MAT son más accesibles en términos de manejo para usuarios con conocimientos cartográficos básicos, el acceso a los MDT requiere habilidades especializadas en el manejo de equipos informáticos y lenguajes de programación[6].

PROPIEDAD	MAT	MDT
MANEJO	SENCILLO	COMPLEJA
ESTABILIDAD	BAJA	ALTA
TRANSPORTABLIDAD	BAJA	ALTA
ACTUALIZACION	COMPLEJA	SENCILLA
TRATAMIENTO NUMERICO	DIFICIL	FACIL
SIMULACION	NO	SI

Tabla Numero 1 – Comparación entre modelo MAT y MDT

La estabilidad es una característica física que puede entenderse, tanto dimensional como temporal, la estabilidad es un aspecto crucial en la representación del terreno[4]. En este sentido, los MDT presentan una ventaja significativa sobre los MAT, ya que son menos susceptibles a la degradación dimensional afectando a un aspecto fundamental de los datos cartográficos que es la referenciación precisa y al deterioro temporal que el degaste con el manejo con el paso del tiempo. Por lo tanto, la independencia de las condiciones ambientales y la capacidad de almacenamiento informático contribuyen a esta estabilidad.

En cuanto a la transportabilidad, los MDT están estrechamente ligados a los equipos informáticos que los manejan, lo que facilita su acceso desde cualquier conexión al servidor en el que se encuentran. Además, la actualización de los datos en los MDT es teóricamente inmediata a través de sistemas informáticos, lo que conlleva a un cambio de forma directa y la carga de estos datos modificados es válida y efectuada solo con volver a ejecutar el MDT desde el programa, lo que contrasta con el proceso más laborioso y costoso requerido para la actualización de los mapas convencionales en donde tendríamos que realizar el mapa completamente nuevo y desde cero pasando por todas sus fases[7].

Los MDT ofrecen posibilidades prácticas que los mapas convencionales no pueden igualar debido a su naturaleza digital. Por ejemplo, la capacidad de obtener estadísticas descriptivas o la creación de nueva información mediante el tratamiento numérico de uno o varios modelos precedentes son funcionalidades exclusivas de los MDT. También se

puede observar a la hora de trabajar con el modelo en los MAT necesitas realizar el proceso por cada modelo que tengas que trabajar, mientras que en los MDT con programar un código que puede ser de mayor o menor dificultad según las necesidades que tengas, una vez realizado el código se puede ejecutar con un solo clic en cualquier modelo pasado, actual o futuro. Además del error que puede llegar a ser inexistente según lo depurado que este el MDT.

Además, los MDT permiten la realización de procesos de simulación del funcionamiento de sistemas dinámicos, en donde utilizando MDT y descripciones de características físicas podemos realizar simulaciones numéricas basadas en supuestos y de esta forma crear modelos predictivos llegando a mejorar los modelos con simples cambios numéricos, lo que representa un avance significativo en términos de investigación y desarrollo en el campo de la geo informática.

2.1.4 Justificación y principios metodológicos

La modelización del territorio constituye un pilar fundamental para el desarrollo eficiente de numerosas disciplinas técnicas, dado que las herramientas informáticas que generan MDT habilitan a los profesionales para llevar a cabo sus tareas de manera más efectiva y productiva, garantizando la calidad tanto en los cálculos como en las presentaciones resultantes. Estos programas, además de la generación de MDT, suelen abordar una amplia cantidad y variedad de operaciones de alta complejidad, tales como la definición de ejes, rasantes, perfiles transversales y longitudinales, cálculos de volúmenes, entre otras, lo que contribuye significativamente a optimizar los procesos de trabajo.

No obstante, es necesario realizar una distinción precisa con respecto al objetivo primordial de los MDT, el cual radica en la representación digital del territorio, sin tener la intención de establecer directrices para la gestión territorial, función que corresponde a los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estos últimos, en constante expansión, integran una Base Cartográfica Numérica que incluye imágenes de satélite, ortofotos, y otros datos geoespaciales, lo que ocasionalmente puede llevar a una confusión conceptual entre ambos sistemas. Es esencial destacar que mientras los MDT se centran en la representación digital del relieve y la topografía del territorio, los SIG abarcan un espectro más amplio de funciones, incluyendo el análisis espacial, la gestión de datos geográficos y la toma de decisiones en el ámbito territorial.

2.2 MODELOS DIGITALES DE TERRENO MDT

2.2.1 Introducción

La definición de modelos digitales del terreno establece que es una estructura numérica de datos que represente la distribución espacial de la cota (altura) de la superficie del terreno puede considerarse un modelo digital de elevaciones[3]. Esta estructura se construye a partir de un conjunto limitado de puntos con coordenadas y altitudes conocidas, buscando un equilibrio entre la facilidad de manejo y la representación precisa de la representación del terreno. La estimación del valor de la cota en un punto arbitrario se realiza mediante interpolación a partir de los datos circundantes.

Las estructuras utilizadas para los MDT se han clasificado en dos categorías principales según la representación de los datos: modelos vectoriales y modelos ráster. Los modelos vectoriales son representaciones del terreno mediante entidades geométricas como

puntos, líneas y polígonos, mientras que los modelos ráster son representaciones del terreno como una cuadricula de celdas que conforman una superficie no nula que "pixelan" el terreno en una distribución regular y recubren el área de estudio. Dentro de cada categoría, existen diferentes variantes, como se muestran en las siguientes tablas veremos una comparativa entre ambos modelos y sus diferentes categorías:

TIPO DE MODELO	ESTRUCTURA DE DATOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
VECTORIAL	Puntos, líneas, polígonos.	Precisión en forma en forma complejas de menor almacenamiento	Dificultad en procesamiento y actualización
RASTER	Matriz de celdas, polígonos	Fácil procesamiento y visualización	Menor precisión en formas complejas, mayor almacenamiento

Tabla Numero 2 – Ventajas y desventajas entre los diferentes modelos.

MODELOS DIGITALES DEL TERRENO	**VECTORIALES**	**CONTORNOS**	
		TRIANGUALACIONES (T.I.N.)	
	RASTER	MATRICES	REGULARES
			ESCALABLES
		POLIGONOS	REGUARES

Tabla Número 3 – Clasificación de las estructuras de datos de los MDT

Esta clasificación clásica, aunque útil, adquiere mayor relevancia en el contexto de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), donde se maneja información estructurada que no poseen los MDT. Por ejemplo, en los modelos ráster que las matrices siendo su estructura más habitual, suelen considerarse como un conjunto de puntos acotados, sin pensar que a la celda cuadrada de altitud uniforme se le asignara el atributo.

Los modelos vectoriales, la representación de los atributos se lleva a cabo mediante puntos, líneas y polígonos. Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas que especifican su posición en el espacio geográfico, las líneas son por vectores que conectan coordenadas, trazando así una trayectoria en el mapa. Los polígonos, en cambio, se construyen mediante la unión en cadena y cerrada de líneas, delimitando un área en el terreno. En una línea los puntos pueden llegar tener todos altitudes diferentes o todos la misma. A medida que evolucionan, estos modelos pueden adoptar estructuras más complejas, como segmentos rectilíneos organizados topológicamente.

2.2.2 Modelos vectoriales

En este enfoque de representación del territorio, se emplean vectores definidos por pares de coordenadas que están relacionadas con un sistema de referencia geográfica previamente establecido. Las coordenadas espaciales se utilizan para gestionar los puntos, donde cada punto se define mediante un par de coordenadas (X, Y). Las líneas, son

gestionadas mediante dos puntos que definen su inicio y final, y los polígonos que delimitan un área del terreno se construyen mediante una agrupación de líneas[6].

Este modelo vectorial permite una representación detallada y precisa del espacio geográfico, ya que puede capturar la ubicación exacta de puntos de interés, trazar rutas o límites territoriales y delinear áreas geográficas específicas[5]. Además, al utilizar coordenadas relativas a un sistema de referencia, facilita la integración y análisis de datos geoespaciales provenientes de diversas fuentes y permite realizar operaciones espaciales como la superposición, la intersección y la bufferización con alta precisión y exactitud.

Ilustración 1 – Recreación modelo vectorial.

2.2.3 Modelos de contornos

En este tipo de modelo vectorial de contorno o curvas de nivel la estructura fundamental utilizada es el vector, que está compuesto por un conjunto de coordenadas (X, Y). Estas coordenadas describen una trayectoria que son las líneas isométricas, también conocidas como curvas de nivel o isohipsas.

Cada curva de nivel se definida mediante un vector de puntos que se sitúan sobre ella con intervalos predefinidos. En la cartografía las curvas de nivel son una representación común y habitual del relieve del terreno y siendo en la mayoría de los casos ser la representación final que se proporciona en la cartografía.

Este método de representación permite visualizar de manera efectiva las características del relieve del terreno, proporcionando información sobre la altitud y la variación de la elevación en un área determinada[5]. Las curvas de nivel son especialmente útiles para entender la topografía de un área.

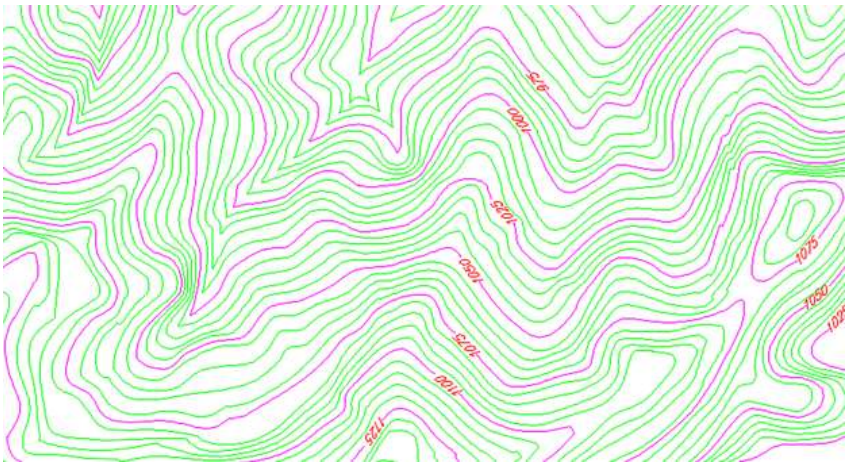

Ilustración 2 – Recreación de un modelo vectorial mediante modelos de contorno.

2.2.4 Red de triángulos irregulares

La estructura conocida por sus siglas en ingles Triangulated Irregular Network (TIN), es una de las más utilizadas a la hora de representar el terreno en la cartografía y el análisis del terreno, cuyo nombre en español es re de triángulos irregulares[3]. Este modelo se compone de una red de triángulos irregulares que se generan a partir de tres puntos cercanos no colineales que definen un plano. El TIN mediante una distribución previa de puntos o líneas genera una serie de superficies planas los triángulos, en donde cada uno de ellos constituye una faceta de los MDT que representa el terreno.

La red de triángulos se organiza internamente en función de su vecindad, lo que implica la existencia de un conjunto de información complejo que permite un manejo ágil y eficaz en comparación con alternativas menos estructuradas[6].

Esta organización en triángulos irregulares ofrece varias ventajas. En primer lugar, permite una representación detallada y precisa del terreno, ya que los triángulos se ajustan de manera óptima a la distribución de puntos, capturando así las variaciones topográficas de manera fiel. Además, al tratarse de una estructura geométrica bien definida, facilita la realización de operaciones espaciales como la interpolación, la extracción de perfiles topográficos y el cálculo de áreas y volúmenes con alta precisión.

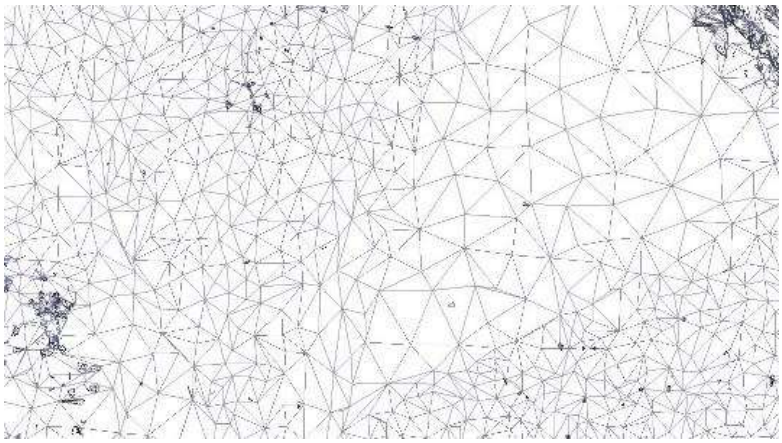

Ilustración 3 – Recreación de un modelo vectorial mediante triangulaciones.

2.2.5 Modelos Ráster o Teselar

El modelo ráster, también conocido como modelo teselar, se centra en la caracterización del espacio geográfico que en sus propiedades sobre la representación detallada de los elementos que lo componen. En este modelo, el espacio se fragmenta en una retícula, donde cada celda se considera como una unidad básica e indivisible identificada por su posición mediante un sistema de fila y columna. Cada celda contiene información temática única, asignada en relación a un valor relativo a la variable que se está representando como elevación, temperatura, densidad de población, entre otros. Este enfoque de representación se distingue por su estructura uniforme y regular, lo que facilita la manipulación y análisis de la información geoespacial.

El modelo ráster es ampliamente empleado en diversas disciplinas, como análisis espacial, teledetección y sistemas de información geográfica (SIG), debido a su eficiencia en el almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos. No obstante, es importante tener presente que este enfoque puede comprometer la representación detallada de características específicas del terreno en comparación con modelos más detallados, como el modelo vectorial.

Ilustración 4 – Recreación de un modelo ráster o teselar.

2.2.6 Matrices regulares

Esta estructura del modelo ráster, se fundamenta en la superposición de una retícula regular sobre el terreno, con el fin de obtener la altura media de cada celda, siendo esta celda el elemento de la retícula de menor superficie. Este modelo implica asignar un valor puntual correspondiente a la altura media de cada celda, considerando generalmente el nodo de la retícula o el punto medio de la celda como referencia. De esta manera, se construye un modelo vectorial de puntos, donde cada punto representa una estimación altimétrica de un área específica del terreno.

Es importante destacar que la retícula puede adoptar diversas formas, si bien la más común consiste en una malla regular cuadrada, con filas y columnas equidistantes entre sí, lo que proporciona a este diseño una resolución espacial uniforme en todo el modelo, este enfoque de construcción del modelo ráster permite una representación sistemática y estructurada del terreno, lo que facilita su manipulación y análisis en aplicaciones como sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección.

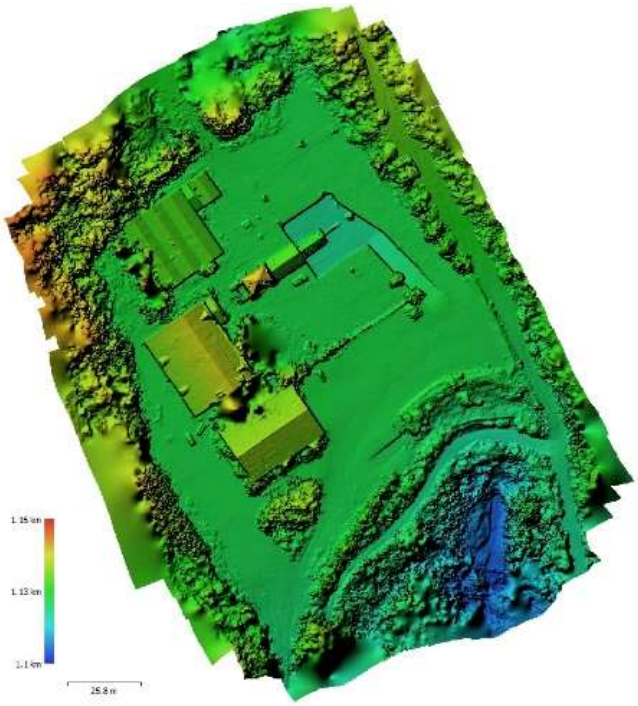

Ilustración 5 – Recreación de un modelo ráster mediante modelo regular.

2.2.7 Matrices de resolución variable

Las matrices de resolución variable representan una propuesta interesante en el ámbito de la representación espacial, ya que ofrecen una solución al principal inconveniente de las matrices regulares: su resolución espacial fija. A pesar de preservar las ventajas conceptuales y operativas de las matrices regulares, estas matrices permiten que sus elementos sean tanto datos elementales como submétricas con diferentes niveles de resolución. El resultado es una estructura jerárquica y dinámica de submétricas, con una profundidad variable y donde la resolución espacial se duplica en cada nivel, permitiendo un mayor detalle en áreas de interés y un menor detalle en áreas menos relevantes. Este enfoque guarda similitudes con los quadtrees, que rara vez se utilizan en el procesamiento de variables estructuradas.

Aunque esta estructura ha recibido escasa atención y desarrollo, según se puede ver de la información disponible, existe una relación directa con el método fotogramétrico de muestreo progresivo, tal como lo describe Makarovic (1973). En el contexto del tratamiento de Modelos Digitales de Elevación (MDE), los primeros avances parecen atribuirse a Ebner y Reinhardt (1984, 1988), quienes emplearon un enfoque mixto de matrices jerárquicas y estructuras TIN.

2.2.8 Otras estructuras

Se han propuesto numerosas variantes y alternativas para el almacenamiento y procesamiento de Modelos Digitales de Elevación (MDE). Entre estas opciones, la representación a través de perfiles ha sido mencionada como una posibilidad, y algunos autores han evaluado sus potenciales ventajas teóricas. Sin embargo, en la información actual no se encuentran ejemplos de su aplicación práctica.

Otra propuesta histórica es la codificación de contornos mediante ecuaciones polinómicas, la cual surgió en los primeros trabajos sobre modelos digitales. Más

recientemente, se han sugerido métodos parecidos fundamentándose en una secuencia de segmentos de Bézier, con el objetivo de reducir el tamaño de los archivos vectoriales[5]. A pesar de estas propuestas, su implementación práctica no ha sido ampliamente adoptada.

Además, se han planteado otras técnicas, como la utilización de polígonos irregulares adosados o redes regulares hexagonales, cada una argumentando ventajas específicas para ciertas aplicaciones. No obstante, hasta el momento, su uso no se ha generalizado, y su aplicación sigue siendo limitada en comparación con enfoques más convencionales en el tratamiento de MDE.

2.2.9 Criterios de selección de la estructura del mide

La selección del tipo de estructura para la representación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) conlleva importantes implicaciones, ya que determina las formas de tratamiento numérico. Si bien algunos autores han señalado que las diferencias teóricas entre las diversas estructuras son mínimas cuando la resolución es similar (Berry, 1988), esta perspectiva limita su análisis a los elementos primarios del modelo[3]. En realidad, la distinción fundamental radica en la organización de los datos, la complejidad de la topología interna de los objetos representados y los procesos de tratamiento que estas estructuras permiten.

Actualmente, las opciones prácticas principalmente son dos: las matrices regulares y las redes irregulares de triángulos (TIN). En el modelo de contornos su tratamiento directo presenta desafíos significativos como se explicó anteriormente. Por eso, en la práctica, se considera aceptable para la captura de información, pero en los datos topográficos no ha sido apto para el tratamiento.

La estructura matricial proporciona una representación adecuada de la forma general de la superficie en áreas de relieve pronunciado, pero la definición de detalles en áreas de relieve suave puede ofrecer resultados deficientes. Por otro lado, la representación vectorial de contornos y las redes irregulares de triángulos tienen la ventaja de permitir un mayor grado de detalle en áreas específicas donde las variaciones menores del relieve pueden no ser detectables con una estructura matricial[8]. En general, para variables discretas, limitadas por fronteras lineales claras, la descripción vectorial es más adecuada mientras que para variables continuas, donde no se pueden definir límites de manera clara, así como para variables con una naturaleza estadística o probabilística las descripciones ráster son más apropiadas.

Desde una perspectiva histórica, antes de la informatización, el manejo de mapas se realizaba de forma analógica y vectorial. Sin embargo, en los años 60, hubo un cambio en donde el modelo ráster comenzó a ser adoptado en los primeros programas de gestión de información territorial debido a su adaptación al cálculo informático. La facilidad de tratamiento numérico fue una ventaja clave de esto, ya que las operaciones en una estructura matricial involucraban operaciones matriciales simples entre datos homólogos[3]. Por otro lado, en los modelos vectoriales, que no tenían regularidad en la distribución espacial de los datos, se requerían operaciones geométricas más complejas.

A pesar de que los modelos matriciales fueron ampliamente adoptados en los primeros Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la década de 1960, en los años 70 y 80, los

SIG basados en estructuras vectoriales comenzaron a ganar terreno. Sin embargo, es importante destacar que estos sistemas manejaban principalmente información de variables discretas o fácilmente transformables en formato vectorial. La limitada capacidad de almacenamiento de datos y el largo tiempo de acceso a las memorias masivas plantearon desafíos significativos hasta hace poco. Como resultado, se desarrollaron modelos matriciales relativamente rudimentarios para abordar estas limitaciones (Berry, 1988). No obstante, con los avances tecnológicos en almacenamiento masivo de datos y acceso a los mismos, esta polémica ha perdido relevancia. Aunque la tendencia general en los SIG es la adopción de estructuras vectoriales, especialmente para el tratamiento de información cualitativa del terreno, en el ámbito de datos topográficos y otras variables continuas, el uso de formatos matriciales sigue siendo predominante. La tendencia actual es la integración de ambos tipos de modelos debido a sus ventajas específicas dependiendo de la variable que sea representada. Es notable que incluso en sistemas de información geográfica ampliamente utilizados, se incluyen módulos de tratamiento que emplean tanto estructuras TIN como matriciales, lo que evidencia la necesidad de mantener ambas estructuras activas simultáneamente. En este contexto, la disponibilidad de imágenes satelitales ha impulsado aún más la integración de ambos formatos, ya que esta fuente de datos, esencialmente matricial, no puede ser ignorada.

2.2.10 Rasterización y vectorización

En el ámbito práctico, las opciones predominantes para la utilización de Modelos Digitales de Elevación (MDE) se reducen, mayormente, a las matrices regulares y las redes irregulares de triángulos (TIN), debido a su amplia adopción y uso generalizado.

Las matrices regulares, como modelos ráster, destacan por su facilidad de cálculo y análisis, lo que los hace especialmente adecuados para una variedad de aplicaciones. Por otro lado, los modelos vectoriales TIN ofrecen ventajas en tareas de inventario, aunque suelen presentar mayores desafíos en el ámbito de los procesos de análisis. En todo caso, es posible transformar un modelo vectorial en uno matricial, lo que implica esencialmente un proceso de interpolación en el entorno de cada punto definido por la intersección de filas y columnas.

Este procedimiento se conoce como rasterización o vectorización, dependiendo de si se transforma de ráster a vector o viceversa, y conlleva una pérdida de información inherente a la transformación. No obstante, esta pérdida de información debe ser mínima o, al menos, asumible y en unos límites de tolerancia exigidos para garantizar la fiabilidad de los resultados.

2.3 CAPTURA DE INFORMACION

La fase inicial del proceso de construcción de un Modelo Digital del Terreno (MDT) involucra la captación de información altimétrica y su transformación en una estructura digital manipulable por medios informáticos. Esta etapa ha sido ampliamente reconocida como la más exigente en términos de tiempo y esfuerzo dentro de todo el proceso de manejo de los MDT. Asimismo, su importancia radica en que la calidad de los datos captados determina en gran medida la efectividad y precisión de los análisis y tratamientos posteriores[5].

Después de la captación de los datos, es necesario estructurarlos de manera apropiada para su manipulación por parte de las aplicaciones informáticas. Esta tarea puede realizarse de diversas maneras, incluso dentro de un mismo esquema general, ya sea matricial, vectorial, u otros. Posteriormente, se llevan a cabo pruebas de control y evaluación para detectar posibles errores y determinar el nivel de calidad del MDT resultante. Este proceso de preparación y evaluación es fundamental para garantizar la fiabilidad y utilidad de los datos obtenidos[6].

2.3.1 Métodos directos

En el ámbito de la captura de información altimétrica para la construcción de Modelos Digitales del Terreno (MDT), se clasifican como métodos directos aquellos que requieren interactuar y un contacto directo con el territorio que se desea mapear. Estos métodos tienen como objetivo principal la obtención de una nube de puntos (X, Y, Z) que refleje las características del terreno en cuestión.

Entre los métodos directos que han prevalecido en esta disciplina, destacan el GPS (Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés) y los métodos topográficos clásicos y los laser escáner, siendo la estación topográfica el instrumento más utilizado en la actualidad. El GPS proporciona coordenadas precisas de puntos geográficos mediante una red de satélites, mientras que los métodos topográficos tradicionales implican el uso de instrumentos especializados para medir distancias, ángulos y elevaciones en el terreno, pero también con los avances tecnológicos los laser escáner constituyen una herramienta cada vez más importante en la captura de datos estos lo realizan mediante la emisión de pulsos de luz laser y miden el tiempo que tarda cada pulso en rebotar en la superficie terrestre, lo que permite calcular la distancia entre el escáner y el punto de medición con gran precisión. Los escáneres láser no están limitados por la accesibilidad física del terreno y pueden capturar datos detallados incluso en áreas con vegetación densa o terreno accidentado.

Estos métodos directos son fundamentales para obtener datos altimétricos de alta calidad que servirán como base para la creación de modelos digitales detallados y precisos del terreno. Su aplicación requiere de habilidades técnicas y conocimientos especializados para garantizar la exactitud y fiabilidad de los datos capturados.

CRITERIO	GPS	TOPOGRAFIA CLASICA	LASER ESCANER
PRECISION	Variable	Alta	Alta
FACILIDADA DE USO	Fácil	Compleja	Compleja
COSTO	Bajo	Elevada	Elevada
VERSATILIDAD	Limitada	Alta	Alta
ACCESIVILIDAD AL TERRENO	Alta	Variable	Alta
IR AL TERRENO	No	Si	No

Tabla Numero 3 – Comparación de propiedades de los diferentes instrumentos de medición.

2.3.2 Sistemas de posicionamiento global

Estos métodos se apoyan en la utilización satélites de referencia y, a través de técnicas de triangulación, se logra determinar con precisión las tres coordenadas espaciales para un punto con una ubicación específica en la superficie terrestre.

Aunque este método es altamente preciso en condiciones ideales, presenta ciertas limitaciones que restringen su aplicabilidad. Entre las principales se encuentran la necesidad de acceder al lugar de medición físicamente y el tiempo relativamente prolongado requerido para obtener datos confiables. Además de estas consideraciones, que dificultan la captura del gran volumen de datos que compone un Modelo Digital del Terreno (MDT), se suman otros problemas secundarios relacionados con la exigencia de condiciones favorables para la toma de medidas, tales como acceso directo y simultáneo a mínimo de cuatro satélites, escasa vegetación sobre la antena receptora y la necesidad de disponer de un funcionamiento simultaneo de una segunda estación de apoyo, entre otros.

Estas limitaciones conllevan a que el método GPS sea más un recurso complementario que el principal sistema de captación de datos en la práctica. Aunque ofrece precisión y fiabilidad en las mediciones, su aplicación se ve condicionada por estas restricciones operativas y técnicas.

Ilustración 6 – Captura de información por GPS.

2.3.3 Levantamiento topográfico clásico

Las estaciones topográficas representan una herramienta fundamental en la generación y registro de datos altimétricos, ya que posibilita el almacenamiento de resultados en formato digital. Esta capacidad de almacenamiento digital facilita el posterior procesamiento y análisis automatizado de los datos obtenidos. Algunos sistemas de información geográfica (SIG) incorporan funcionalidades específicas que permiten la integración y manipulación eficiente de los datos provenientes de este tipo de estaciones.

Sin embargo, a pesar de su utilidad, el método topográfico también enfrenta desafíos similares a los del GPS. La recopilación de información requiere la presencia física en el terreno, lo que limita la eficiencia y la rapidez del proceso. Además, el tiempo necesario para llevar a cabo una toma de datos precisa y completa descalifica este método como la

única opción para la captura de datos en la construcción de un Modelo Digital del Terreno (MDT).

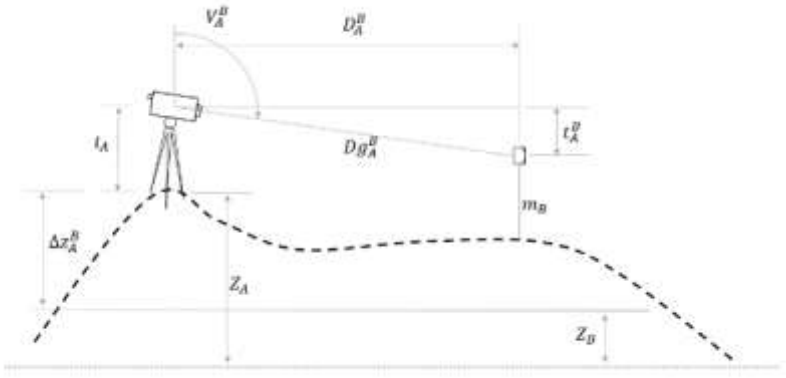

Ilustración 7 – Captura de información por estación topográfica.

2.3.4 Laser escáner

Los escáneres láser son herramientas esenciales en el campo de la topografía y la cartografía, permitiendo la captura eficiente de datos tridimensionales del terreno y objetos. Entre los tipos más utilizados se encuentran los Terrestrial Laser Scanners (TLS), Airborne Laser Scanners (ALS) y Light Detection and Ranging (LIDAR), cada uno con sus propias ventajas y desventajas.

Los TLS son ideales para la captura detallada de datos a nivel del suelo, ofreciendo una alta resolución y precisión en áreas pequeñas y medianas. Sin embargo, su alcance y capacidad de escaneo a gran escala son limitados, requiriendo tiempo y esfuerzo para el posicionamiento adecuado en el terreno, y siendo sensibles a condiciones climáticas adversas y obstrucciones visuales[3].

Por otro lado, los ALS permiten una cobertura rápida y eficiente de grandes áreas desde el aire, siendo útiles para el mapeo de extensiones extensas de terreno y menos afectados por obstrucciones visuales terrestres[4]. Sin embargo, su resolución puede ser menor en comparación con los TLS, y los costos operativos y logísticos son más altos debido al uso de aviones o drones, además de requerir una calibración adicional para obtener datos precisos.

Finalmente, el LIDAR ofrece versatilidad en una variedad de aplicaciones, incluyendo topografía, cartografía y detección remota, con la capacidad de penetrar la vegetación y obtener datos detallados del suelo. Aunque proporciona una alta precisión y resolución en la captura de datos, su costo inicial y de operación es más alto en comparación con otros métodos, además de requerir un procesamiento de datos complejo y especializado, y ser sensible a condiciones atmosféricas adversas.

La elección entre estos tipos de escáneres láser depende de la escala del proyecto, la precisión requerida y el entorno específico. Mientras que los TLS son más adecuados para aplicaciones terrestres detalladas, los ALS y LIDAR son preferidos para el mapeo aéreo y la detección remota de grandes áreas.

CRITERIO	TLS	ALS	LiDAR
PRECISION	Alta	Alta	Alta
FACILIDAD DE USO	Media	Baja	Baja
COSTO	Elevada	Elevada	Elevada
VERSATIBILIDAD	Alta	Alta	Alta

Tabla Numero 4 – Comparación de las propiedades de las diferentes técnicas de laser escáner.

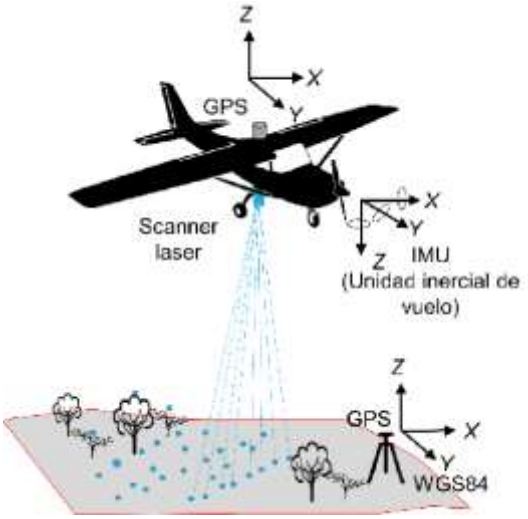

Ilustración 8 – Captura de información mediante ALS.

Ilustración 9 – Captura de información mediante Laser escáner.

A parte de los laser escáner ya mencionados y que se podría decir que se clasifican por su uso y aplicación podemos encontrar o clasificar también por su funcionamiento en donde destacan los laser de tiempo de vuelo o laser de triangulación:

- Técnicas directas o Sistemas de tiempo de vuelo en esta técnica se determinar la distancia entre el escáner y el objeto. La principal característica de estos sistemas reside en la medición del tiempo que tarda un pulso de luz emitido por un láser en recorrer la distancia hasta el objeto y regresar al sensor.
  Este principio, conocido como "tiempo de vuelo", se basa en la velocidad constante de la luz. Al medir el tiempo transcurrido entre el envío del pulso y su recepción, se calcula la distancia recorrida por la luz, que equivale al doble de la

distancia entre el escáner y el objeto. Los sistemas de medición láser 3D por tiempo de vuelo ofrecen un amplio alcance, que puede llegar hasta los 100 metros en algunos casos. Sin embargo, a pesar de su amplio alcance, los sistemas de medición láser 3D por tiempo de vuelo suelen presentar una precisión ligeramente menor que los sistemas por triangulación. La precisión típica de estos sistemas se encuentra entre 3 y 4 milímetros para alcances de 100 metros.

- Técnicas indirectas o Sistema de triangulación: se emplean técnicas indirectas para determinar la distancia entre el escáner y el objeto. Un haz láser fuertemente colimado, es decir, con una dirección precisa, recorre la superficie del objeto mientras una cámara captura su movimiento. Al analizar la deformación del patrón de luz proyectada por el láser sobre el objeto, se calcula la paralaje de cada punto, lo que permite obtener la distancia entre el escáner y cada zona del objeto. Este método ofrece una precisión extraordinaria, alcanzando niveles de hasta décimas de milímetro. Sin embargo, esta precisión se obtiene a costa del alcance del sistema, que generalmente se limita entre 2 y 4 metros. Esto se debe a la complejidad de la medición indirecta, que requiere una alineación precisa entre el láser y la cámara, así como una iluminación adecuada para la captura de imágenes.

2.3.5 Métodos indirectos

a. Métodos directos: altimetría, GPS y estación total

Los altímetros se han empezado a integrar en algunos satélites como parte de sus instrumentos, lo que teóricamente permite la captura directa de datos altimétricos en formato digital. Estos altímetros poseen características que los hacen extremadamente precisos; por ejemplo, el radar de 13.8 GHz embarcado en el satélite ERS-1 (European Remote-Sensing Satellite) tiene un error nominal de apenas unos pocos centímetros. No obstante, se han presentado desafíos relacionados con la dispersión de la señal en áreas rugosas y una resolución espacial limitada, lo que ha limitado su uso principalmente al análisis de la topografía marina y al monitoreo de los hielos polares.

La principal ventaja de estos altímetros radica en su capacidad para realizar capturas de información de forma remota, lo que significa que no están sujetos a las limitaciones de accesibilidad física de la zona de interés[6].

b. Métodos indirectos: restitución fotogramétrica

Como se ha mencionado previamente, es más común recurrir a métodos indirectos para la generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT). Esto se debe principalmente a que estos métodos no requieren acceder físicamente a toda la zona a representar, ya que se basan en documentos preexistentes, y la forma relativamente rápida que permiten de generar datos, lo cual es crucial cuando se manejan volúmenes grandes de información.

En las operaciones de restitución, se emplea como documento fundamental un conjunto de pares estereoscópicos de imágenes del área a analizar. Estos trabajos se sustentan en técnicas fotogramétricas que, mediante la comparación de puntos homólogos en los pares estereoscópicos, deducen las elevaciones de referencia necesarias para reconstruir la topografía[3]. En la actualidad, existen sistemas automatizados de restitución fotogramétrica que registran directamente los resultados en formato digital compatible con los sistemas de información geográfica. En estos casos, los pares estereoscópicos en

analizan mediante sistemas ópticos de exploración, y la información obtenida se procesa con un cálculo de correlaciones iterativo para identificar puntos homólogos, estimar altitudes y medir paralajes. Para establecer una escala absoluta, es necesario acceder al terreno y definir un conjunto de puntos de referencia.

Los pares estereoscópicos solían consistir únicamente en fotografías aéreas, capturadas por cámaras de gran formato desde aeronaves a diversas altitudes. Sin embargo, hoy en día hay que añadir imágenes digitales captadas por sensores pancromáticos a bordo de satélites. Un avance significativo en este campo fue el lanzamiento del satélite SPOT en 1986, que mediante variaciones en el ángulo de visión permitió obtener imágenes estereoscópicas, programables desde tierra. Los sensores pancromáticos del SPOT ofrecen una resolución de 10 metros, cuyo espectro de captación es similar al visible. Aunque la investigación en este ámbito es relativamente reciente, algunos autores sugieren que los MDT obtenidos su calidad es comparable a los realizados a través de métodos fotogramétricos convencionales.

Por último, hay que mencionar el método para construir MDT mediante la captura de datos por radares de apertura sintética (SAR), que, aunque también se basan en el análisis de pares de imágenes, se diferencian claramente de los métodos tradicionales. Estas técnicas, reunidas bajo el término radargrametría, dependen principalmente de la resolución espacial y de la estabilidad y precisión en la trayectoria en la que la plataforma se mueve. Aunque se vislumbra un futuro prometedor para esta técnica, las dificultades operativas actuales y la magnitud del error en los MDT obtenidos aún limitan su competencia con los métodos más tradicionales. En Polidori (1992) se puede encontrar una exposición más detallada de los métodos disponibles y un análisis de sus características.

c. Digitalización de mapas topográficos

Los organismos estatales o las empresas especializadas utilizan principalmente los métodos fotogramétricos, que conllevan un desafío debido al alto costo de los equipos requeridos. Por lo que ha pequeños equipos se les hace muy difícil la construcción de Modelos Digitales del Terreno (MDT) por este método. Una alternativa viable es la digitalización de mapas topográficos existentes, que se puede realizar de dos formas manualmente a través de un tablero digitalizador o automáticamente mediante sensores ópticos de exploración.

La digitalización automática ha sido objeto de investigación debido a la lentitud y el alto costo de los métodos manuales. En la actualidad el método que predomina se basa en el uso de micro densitómetros de exploración un scanner que detectan diferentes niveles de gris o componentes de color en mapas originales[5]. Estos scanner pueden producir salidas en formato vectorial o ráster. En el caso vectorial, se generan líneas automáticamente, pero pueden surgir problemas en áreas complejas en donde las líneas se cruzan o interrumpen lo que requieren intervención manual por un operador.

El tiempo de procesado de la digitalización depende en esencialmente de la información en donde la digitalización automática con mapas simples y sin errores supera en eficacia al manual. Sin embargo, cuando la información es compleja, el proceso se vuelve considerablemente más lento. La digitalización mediante escáneres puede dar resultados

en formato ráster cuando se utiliza un esquema matricial para el escaneo. El resultado es una matriz de diferentes valores de gris, en dispositivos sensibles al color es de componentes primarios (amarillo, cian y magenta) o simplemente en blanco y negro. Aunque el proceso de generación de esta matriz es sencillo, la información resultante no es directamente utilizable para la construcción del modelo digital. Por lo que la matriz necesita transformar sus datos por lo que se realiza una vectorización de los datos del archivo ráster en cuales los pasos para un mapa topográfico consisten en:

1) Filtrado: Se aplica un umbral de gris a la imagen para convertirla a blanco y negro. Esto elimina las sombras, las manchas en el papel y otras imperfecciones, mejorando la delimitación de los elementos relevantes del mapa, como las curvas de nivel.
2) Vectorización: Los píxeles adyacentes se agrupan en líneas, creando una imagen vectorial. La similitud con el mapa original depende de su calidad gráfica y complejidad. Separar las curvas de nivel de otros elementos del mapa (retículas, toponimia, cotas, etc.) puede ser un desafío. El proceso puede ser automático o interactivo, con un operador en situaciones conflictivas.
3) Edición y revisión: Los procesos previos pueden generar errores, especialmente en mapas complejos o de baja calidad. Se requiere una revisión y edición manual por parte de un operador para corregir estos errores. Con ayuda del mapa original como referencia para la corrección de errores, aseguramos la coherencia topológica del modelo de elevaciones.

El resultado es una versión digital del mapa topográfico original, que puede ser utilizada como Modelo Digital del Terreno (MDT) una vez que se asignan altitudes a cada línea. El costo total de esta operación varía, siendo crucial la elección de mapas originales de alta calidad.

Aunque tanto la digitalización automática como la manual son opciones razonables, el alto costo de los equipos y la complejidad de los mapas disponibles han llevado a que la digitalización manual sea el método más utilizado en la actualidad. Este proceso se realiza sobre un tablero digitalizador, donde las curvas de nivel se siguen manualmente. Aunque es un proceso lento y propenso a errores, puede ser más eficaz para mapas complejos debido a la capacidad de análisis del operador y la flexibilidad en la toma de decisiones.

Un método más simple implica superponer físicamente una malla uniforme sobre el mapa topográfico y extraer manualmente las altitudes correspondientes a cada punto de la red. Aunque rudimentario, este método permite la creación de modelos pequeños con recursos limitados, aunque solo es práctico para áreas pequeñas o modelos simples debido a la mayor probabilidad de errores y la fatiga del operador.

2.4 GENERACION DE MODELOS DIGITALES

2.4.1 Introducción

Los modelos vectoriales ofrecen una representación más precisa de una superficie específica en comparación con los modelos ráster, debido a que cualquier interpolación requerida para obtener un modelo ráster conlleva cierta pérdida de información. En este

contexto, los modelos de Triangulación Irregular de la Red (TIN) son los más comunes en la representar la representación de altimetría de un área determinada.

Los modelos TIN se han establecido como la opción preferida en la generación de modelos digitales del terreno en una variedad de aplicaciones cartográficas. Son particularmente prevalentes en programas que emplean cartografía o que la generan, como aquellos destinados a la generación cartográfica a partir de levantamientos topográficos o fotogramétricos, así como en programas diseñados para el trazado de obras lineales o superficiales.

La utilización de modelos TIN se fundamenta en su capacidad para representar con precisión las variaciones en la altimetría del terreno mediante una red de triángulos irregulares conectados entre sí. Esta estructura triangular permite una representación más fiel de los cambios de elevación, minimizando la necesidad de interpolaciones que podrían introducir imprecisiones en la representación del terreno.

2.4.2 Triangulación de Delaunay

El enfoque predominante en la generación de modelos digitales del terreno se basa en el algoritmo de Delaunay, concebido por el matemático ruso Boris N. Delaunay. Este algoritmo, reconocido por su eficiencia y rapidez, ha sido ampliamente adoptado como el fundamento de la modelización en diversas aplicaciones. Su definición se puede abordar en una región específica de la superficie terrestre, considerada bidimensional en un espacio tridimensional, donde cada línea vertical intercepta la superficie en un punto.

El objetivo radica en hallar una función (f) tal que (f (x, y) = z), donde (x, y) denota un punto en la superficie A y (z) representa la cota asignada a dicho punto. No obstante, el valor de la función solo se conoce en una cantidad limitada de puntos, lo que implica la necesidad de una aproximación para el resto del dominio[9].

El proceso habitual de aproximación al terreno implica determinar la triangulación de los puntos cuyas cotas son conocidas en el plano, y luego asignar la altura a cada vértice. Aunque podría suponerse que todas las triangulaciones son igualmente válidas, existen algunas que se ajustan mejor a la forma real del terreno. Estas se identifican por maximizar los ángulos menores, lo que coincide con el criterio de máxima equilateridad propuesto por Delaunay.

En numerosas ocasiones, la triangulación de Delaunay ofrece una mejor aproximación al valor real de la cota de un punto en comparación con otras alternativas. Esto se ilustra en la figura adjunta, donde se estima la cota de un punto "q" con dos interpolaciones distintas. En la mayoría de los casos, se observa que la triangulación de Delaunay (izquierda) se acerca más al valor real que otras alternativas.

Por lo tanto, la triangulación de Delaunay y el modelo resultante suelen considerarse los más optimas en muchos casos, mientras que otras triangulaciones pueden considerarse de manera previa menos apropiadas.

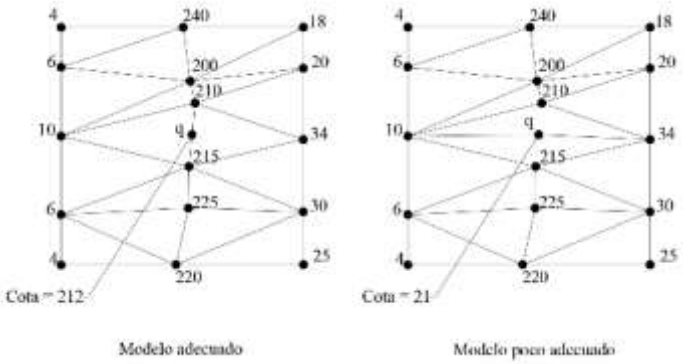

Ilustración 10 – Diferencias entre diferentes triangulaciones

2.4.3 Triangulaciones de un conjunto de puntos

En términos más sencillos, la triangulación de un conjunto de puntos (P) es una técnica que consiste en dividir una superficie (S) plana en triángulos, utilizando los puntos P como vértices. La condición principal es que, si se añade un nuevo lado conectando dos puntos P, este lado debe intersectar al menos uno de los lados ya existentes en la triangulación. En otras palabras, la triangulación crea una red de triángulos que no se superponen y que abarcan completamente la superficie definida por los puntos P. El número de triángulos o facetas (f) en una triangulación se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$f = 2n - 2\text{-k}$$

Ecuación 1

donde:

- n es el número de puntos P en el conjunto
- k es el número de puntos P del conjunto que son parte de la envolvente convexa

El número de lados (l) en la triangulación se puede calcular mediante la siguiente formula:

$$l = 3n - 3\text{-k}$$

Ecuación 2

Entre todas las posibles triangulaciones, existe uno que da la máxima la equilateridad de los lados de los triángulos o facetas. Esta condición se consigue cuando el ángulo mínimo es siempre el máximo.

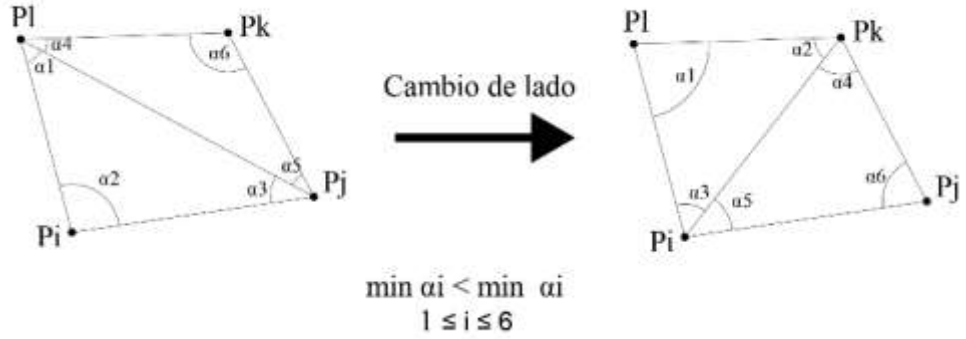

Ilustración 11 – Triangulación para maximizar los ángulos mínimos.

La condición de máxima equilateridad conocida como la triangulación de Delaunay busca la máxima equilateridad posible en los triángulos que la componen. Esta propiedad se traduce en la siguiente condición:

Un lado es "ilegal" si la circunferencia que pasa por los puntos Pp, Pj, Pk de un triángulo T contiene al punto Pl, que no forma parte de T[6].

En otras palabras, cada triángulo en la triangulación precisa una circunferencia que intersecta sus tres vértices y no posee ningún otro punto de la triangulación. Si un lado de un triángulo T viola esta condición, es decir, si la circunferencia que pasa por Pp, Pj, Pk contiene al punto Pl, entonces ese lado es "ilegal" y la triangulación no es óptima[10].

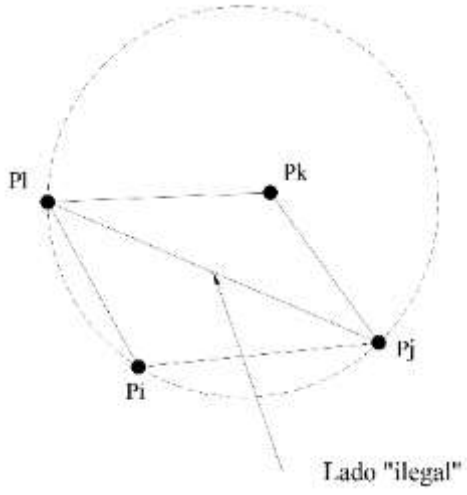

Ilustración 12 – Definición del lado “ilegal”.

Esta triangulación se identifica por la equilateridad de sus triángulos y lados "legales", lo que significa que ninguna circunferencia que posee los vértices de un triángulo contiene puntos adicionales de la triangulación. Estas triangulaciones tienen propiedades significativas, como su relación con los diagramas de Voronoi.

2.4.4 Diagramas de Voronoi

El diagrama de Voronoi, es una herramienta matemática que se utiliza para subdividir un espacio plano en regiones a partir de un conjunto finito de puntos. Este diagrama tiene una amplia variedad de aplicaciones en diferentes campos.

Dado el conjunto de puntos P = {p1, p2, p3, …, n} en el plano, es una subdivisión del plano en n regiones, R1, R2, R3, …, Rn, donde cada región corresponde al área más cercana a un punto específico Pi. Matemáticamente, para cualquier punto q perteneciente a una región específica, se cumple que la distancia entre q y Pi es menor que la distancia entre q y cualquier otro punto Pj del conjunto P, es decir:

$$\forall q \in Ri, \text{dist}(q, Pi) < \text{dist}(q, Pj) \text{ para todo } Pj \neq Pi$$

Estos diagramas tienen aplicaciones en diversos campos, incluidas las triangulaciones de Delaunay. Se caracteriza por su capacidad para definir regiones en el plano en función de la proximidad a un conjunto dado de n puntos. Cada región está delimitada por n-1 semiplanos y puede tener hasta n-1 lados. Estos lados, si los puntos del conjunto P no están alineados y mayormente son segmentos o semirrectas[9].

El número máximo de vértices en un diagrama de Voronoi para un conjunto de n puntos es 2n-5, mientras que el número máximo de lados es 3n-4, la mediatriz entre los puntos Pi y Pj define un lado del diagrama si y solo si existe algún punto q perteneciente a ella tal que la circunferencia de centro q que pasa por i no contiene ningún otro punto del conjunto P. Se puede demostrar que un punto q es un vértice cuando la mayor circunferencia vacía con centro q contiene tres o más puntos del conjunto P.

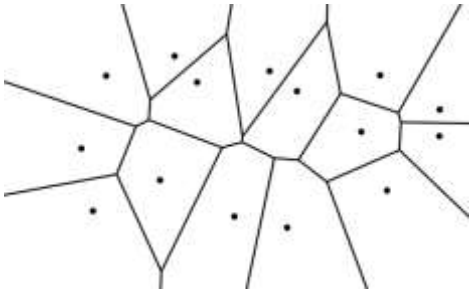

Ilustración 13 – Diagrama de Voronoi.

El algoritmo más comúnmente utilizado para calcular los diagramas de Voronoi es el algoritmo de Fortune. Consiste en barrer el plano horizontalmente de arriba hacia abajo, durante el barrido, se actualiza la información solo en los llamados "puntos de evento" nos referimos a los puntos del plano donde se produce un cambio significativo en la estructura del diagrama por cambios como intersección de la línea de barrido con una parábola, llegada a un punto del conjunto P, salida de un punto del conjunto P. La estrategia consiste en determinar donde se encuentra la intersección de la línea de barrido con el diagrama de Voronoi. Sin embargo, este cálculo presenta dificultades debido a que el diagrama depende tanto de la zona ya barrida como de la zona sin barrer. La solución adoptada es manteniendo la información del diagrama de Voronoi que se deriva de los puntos barridos y de los que se encuentran por encima de la línea de barrido y la información de los puntos aún no barridos, ubicados por debajo de la línea, permanece desconocida. Esto se logra al tener en cuenta que todo punto de la zona barrida se considera parte del diagrama definida por los puntos ya barridos si su distancia a la línea de barrido es mayor que a uno de los puntos ya barridos. Por lo que la línea que lo limita que se genera es una parábola ya que esta figura geométrica corresponde al conjunto de puntos que equidistan de una recta dada (la línea de barrido) y un punto específico. Este principio se muestra claramente en la siguiente figura

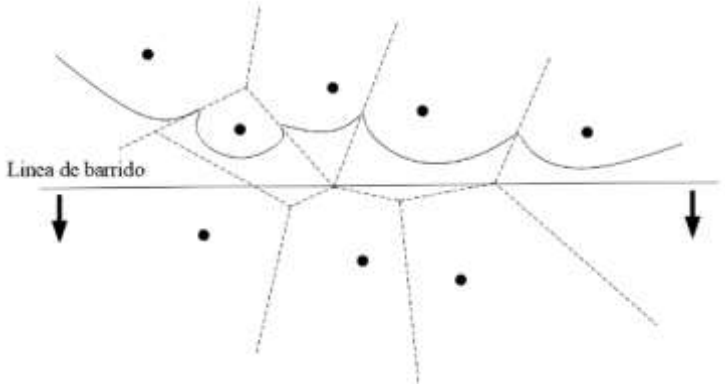

Ilustración 14 – Generación e diagrama de Voronoi mediante el algoritmo de Fortune.

A medida que la línea de barrido avanza, se generan parábolas que representan las fronteras dinámicas del diagrama de Voronoi. Las intersecciones entre estas parábolas generan los vértices y los lados del diagrama final. La distancia de un punto a la línea de barrido se puede expresar mediante una parábola, lo que permite determinar las intersecciones relevantes con precisión[11].

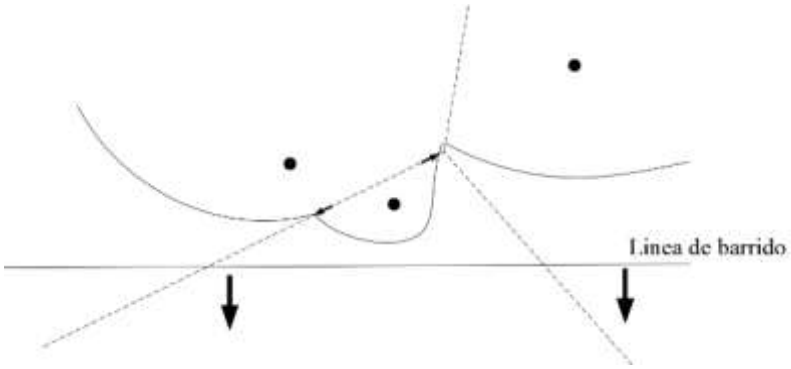

Ilustración 15 – Aparición de un nuevo lado en el diagrama de Voronoi

Otro caso que puede ocurrir es la desaparición del arco parabólico que conlleva un cambio significativo en la configuración del diagrama de Voronoi, aparece un nuevo vértice en el diagrama, situado en el punto donde se encontraba el punto q que generó la desaparición del arco. Este nuevo vértice define una circunferencia que pasa por al menos tres puntos del diagrama. El punto q que causó la eliminación del arco, y los dos puntos adyacentes a q en la parábola que fue eliminada y la circunferencia no debe contener ningún otro punto del diagrama en su interior.

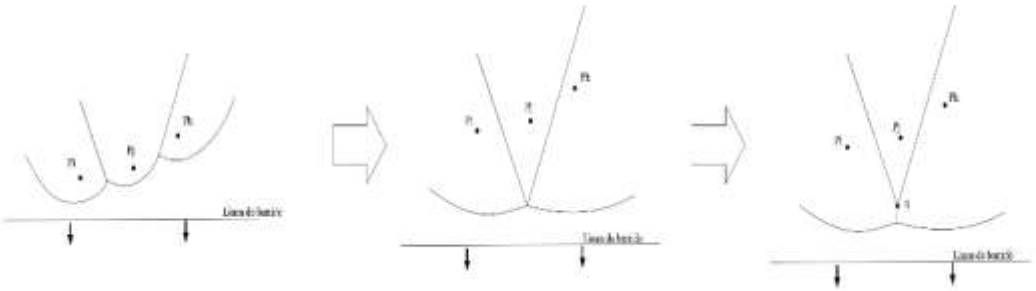

Ilustración 16 – Proceso de aparición de un vértice en el diagrama de Voronoi.

2.4.5 Cálculo de la triangulación de Delaunay

El cálculo de la triangulación de Delaunay es una estructura geométrica con una relación directa con el diagrama de Voronoi, donde cada lado del diagrama es perpendicular a un lado de la triangulación y cada vértice en el diagrama corresponde con un triángulo de la triangulación. Debido a esta relación podemos calcular el diagrama de Voronoi a partir de la triangulación de Delaunay de forma eficiente y viceversa.

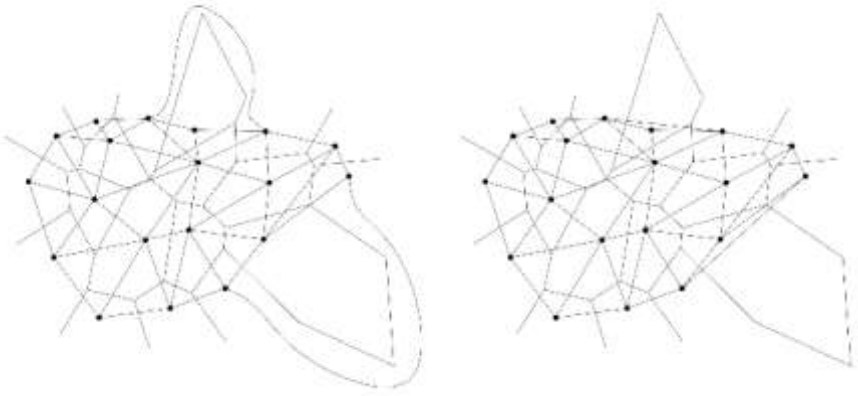

Ilustración 17 – Corresponde al diagrama de Voronoi con la triangulación de Delaunay.

En la triangulación el proceso del cálculo presenta varias propiedades notables:

1) Caracterización mediante el Círculo Vacío: Se establece que tres puntos arbitrarios, Pi, Pj y Pk, forman un triángulo en la triangulación cuando el círculo circunscrito a dichos puntos no tiene ningún otro punto del conjunto. Esta propiedad define un "círculo vacío" asociado a cada triángulo.
2) Condición de Legalidad para los Lados: Dos puntos, Pi, Pj, forman un lado de un triángulo en la triangulación si y solo si no existe ningún otro punto dentro del círculo que los abarca. Esta condición asegura la inexistencia de aristas "ilegales" que intersecten el interior de otros triángulos.
3) Maximización del Ángulo Mínimo: La triangulación de Delaunay posee la propiedad de maximizar el ángulo mínimo de todos sus triángulos. Esto evita la formación de ángulos excesivamente pequeños, mejorando la calidad de la teselación y la precisión de los cálculos realizados sobre ella.

Para calcular la triangulación de Delaunay de un conjunto de puntos P, el proceso comienza con la construcción de un triángulo que contenga todos los puntos y luego se descartan los vértices del triángulo inicial y los triángulos adyacentes a estos vértices.

Los puntos iniciales para la formación de este triángulo se seleccionan de manera que el triángulo que formen no solo que contenga a todos los puntos, también de manera que no interfieran con el algoritmo. Estas coordenadas se calculan como medias de las coordenadas extremas, y luego se procede a incluir cada punto de manera incremental. Las expresiones para el cálculo de los vértices son:

Para punto P1 – $\begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{media} - 2 * d_{max} \\ Y_{media} - d_{max} \end{bmatrix}$

Ecuación 3

Para punto P2 – $\begin{bmatrix} X_{P2} \\ Y_{P2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{media} \\ Y_{media} + 2 * d_{max} \end{bmatrix}$

Ecuación 4

Para punto P3 – $\begin{bmatrix} X_{P3} \\ Y_{P3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{media} + 2 * d_{max} \\ Y_{media} - d_{max} \end{bmatrix}$

Ecuación 5

En donde d_{max} es la distancia máxima entre dos puntos del conjunto P

$$d_{max} = MAYOR\{(X_{max} - X_{min}); (Y_{max} - Y_{min})\}$$

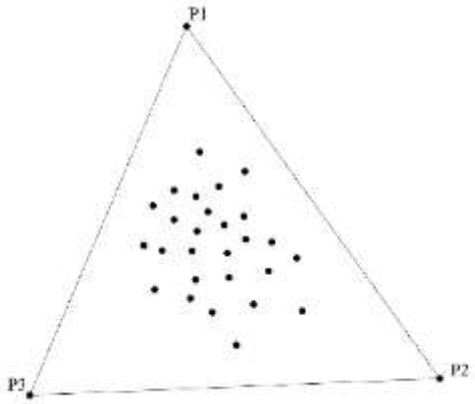

Ilustración 18 – Triangulo máximo para definición de triangulación de Delaunay.

Una vez que se ha definido el primer triángulo que abarca todos los puntos a triangular, el algoritmo procede a incluir cada uno de los puntos restantes de manera aleatoria. Durante este proceso de inclusión incremental, se reconstruye la triangulación existente para tener en cuenta el punto recién introducido[9].

Cuando se incluye un punto Pr, se agregan tantos lados como uniones haya que conecten dicho punto con los vértices del triángulo en el que se encuentra. Si el punto Pr pertenece a un lado existente de la triangulación, se agregan lados como uniones haya con el punto, en este caso la unión será con los vértices opuestos del triángulo al que pertenece el lado. En la siguiente figura observamos los procesos:

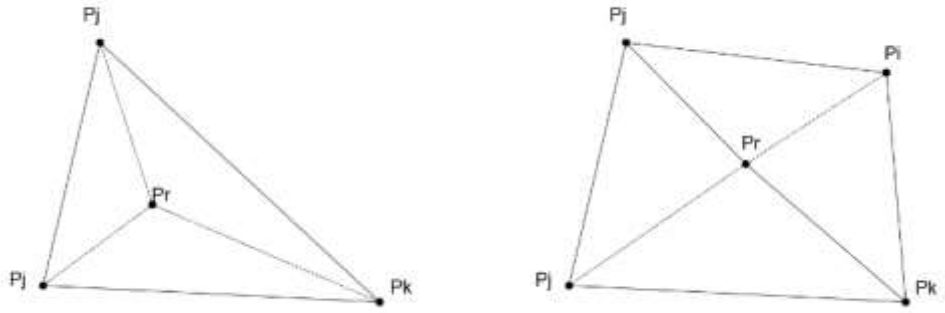

Ilustración 19 – Inserción de un nuevo punto en una triangulación

Sin embargo, esta primera triangulación obtenida al incluir Pr no necesariamente es de Delaunay lo que nos indica que algunos de sus nuevos lados no tienen por qué ser “legales”, es decir, podrían no maximizar sus ángulos menores. Por lo tanto, se procede a "legalizar" los lados modificados para maximizar los ángulos menores[10]. Este proceso implica garantizar que ningún otro punto esté dentro de la circunferencia que pasa por los tres puntos que definen el triángulo. Esta condición es fundamental para llevar a cabo el proceso de legalización. Además, se establece que mientras los triángulos adyacentes a un lado no cambien, ese lado se considerará "legal", ya que proviene de una triangulación anterior.

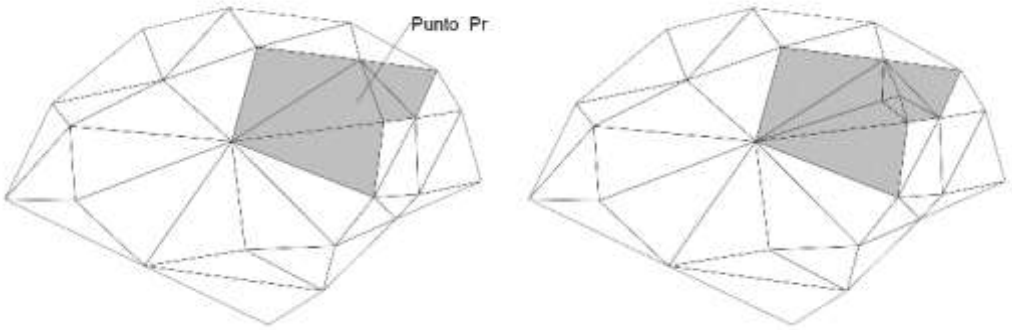

Ilustración 20 – Efecto de introducir un nuevo punto.

Para determinar el triángulo al que pertenece un nuevo punto, se emplea una estructura de localización en forma de árbol. Esta estructura facilita el recorrido y la verificación de todos los triángulos que incluyen el nuevo punto.

donde cada nodo representa un triángulo. La estructura del árbol se inicia con un nodo raíz que corresponde al triángulo más grande del conjunto. A partir de este nodo raíz, se determina a cuál de los tres triángulos iniciales, generados al agregar el primer punto pertenece el triángulo que se está evaluando[6]. Luego, se avanza al nivel inferior dentro del triángulo correspondiente y se desciende al siguiente nivel dentro del triángulo correspondiente y se repite este proceso hasta llegar al nivel al último nivel, donde se incorporan los triángulos generados por el nuevo punto. De esta manera, se recorre el árbol verificando todos los triángulos que contienen el nuevo punto Pr.

2.4.6 Modelos digitales del terreno constreñidos

a. Introducción

En la elaboración de modelos digitales del terreno, es común incorporar restricciones que influyan en la triangulación, especialmente en el caso de modelos TIN, con el fin de obtener una representación óptima del relieve.

Un modelo TIN del terreno con restricciones se define como una triangulación en la que se agregan líneas de ruptura para forzar la creación de triángulos nuevos y así tener una representación precisa de cambios brusco de pendientes de elementos geográficos como ríos, carreteras, taludes, líneas de costa, muros, etc. Estas líneas de ruptura determinan los lados de los triángulos que conforman el modelo digital del terreno, evitando la existencia de lados que las atraviesen. Estas líneas son cruciales para una representación precisa del terreno al integrar la tercera dimensión en la triangulación basada en datos bidimensionales.

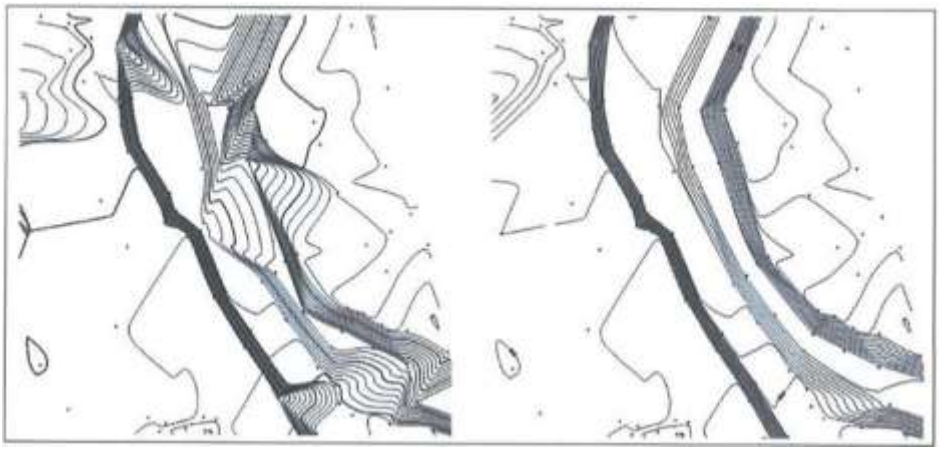

Ilustración 21 – Modelo digital del terreno de contornos sin roturas y con roturas.

b. Triangulación de Delaunay constreñidas

A partir de un conjunto de puntos, se puede generar una variedad determinada de triangulaciones. Entre todas las opciones de las cuales se ha hablado, la que destaca por su máxima equilateridad es la triangulación de Delaunay, donde la circunferencia que pasa por los tres vértices de un triángulo no incluye ningún otro punto. Esta triangulación se considera la más adecuada para representar el terreno de manera precisa. No obstante, en ciertas ocasiones, es necesario introducir líneas de ruptura adicionales, que se convertirán en lados de los triángulos, para mejorar la representación del terreno. Estas son conocidas como triangulaciones constreñidas de Delaunay[12].

Los algoritmos empleados para calcular este tipo de triangulaciones se dividen en tres categorías principales:

1) Algoritmos de "divide y conquista": este algoritmo se basa en un proceso de división y recomposición, primero en la fase de división el conjunto inicial se divide en subconjuntos más pequeños siguiendo diversos criterios como puede ser la distancia entre puntos, la distribución espacial o la existencia de líneas de rotura, la decisión de estos criterios es crucial para la eficiencia y calidad de la triangulación. Después continuamos con la triangulación que es cuando el conjunto es lo suficientemente pequeño, la triangulación puede ser trivial o realizarse

mediante algoritmos específicos. Por último, la fase final en donde la complejidad radica en la recomposición de los subconjuntos los cuales se combinan para tener la triangulación final, esta fase debe ser realizada cuidadosamente para evitar generar triángulos de baja calidad. Un ejemplo de esta técnica se puede encontrar en [CHEW, Pág. 215-222].

2) Algoritmos basados en líneas de referencia: Estos algoritmos emplean una línea de referencia que barre el conjunto de puntos. Primero definiremos la línea de barrido que puede ser horizontal, vertical o seguir una trayectoria arbitraria dependiendo del algoritmo posterior a esto procederemos con el barrido y triangulación que a medida que esta línea avanza, se agregan puntos a la triangulación, avanzando gradualmente en la generación de la misma y en cada paso se actualiza la triangulación para asegura mantener su validez y el proceso continua hasta llegar al final del barrido. El algoritmo de Fortune es el más conocido de este tipo y se basa en la construcción de diagramas de Voronoi, una estructura espacial que permite representar la relación de proximidad entre puntos. [FORTUNE, Pág. 153-174].

3) Algoritmos incrementales: Se basa en la construcción gradual de la triangulación, son los más comunes en la actualidad y son los más fáciles de implementar. Construyen la triangulación mediante nuevos puntos que se insertan uno a uno, La inserción se realiza de forma que la triangulación final sea válida y satisfaga las restricciones de las líneas de rotura. Por último, la clasificación que son algoritmos de búsqueda que encuentran la posición adecuada para insertar el nuevo punto o lado. o de inserción en donde se inserta el nuevo punto o lado en una posición predeterminada y luego ajustan la triangulación. Una descripción inicial de estos algoritmos se puede encontrar en [M DE BERG, Pág. 183-210] y [GUIBAS, Pág. 381-413].

Los algoritmos modernos, incluido el propuesto en este apartado, suelen generar una triangulación de Delaunay inicialmente y luego agregan líneas de ruptura como lados de los triángulos. Para cada línea de ruptura, se llevan a cabo dos fases principales: La eliminación de los triángulos cortados por la línea y la retriangulación del área resultante que consiste en volver a dividir el área afectada en nuevos triángulos, formando lo que se conoce como pseudopolígono. Este término se utiliza para describir el área resultante de la retriangulación, que puede contener bordes no conectados o áreas no trianguladas que deben ser corregidas para asegurar la coherencia y precisión de la triangulación.

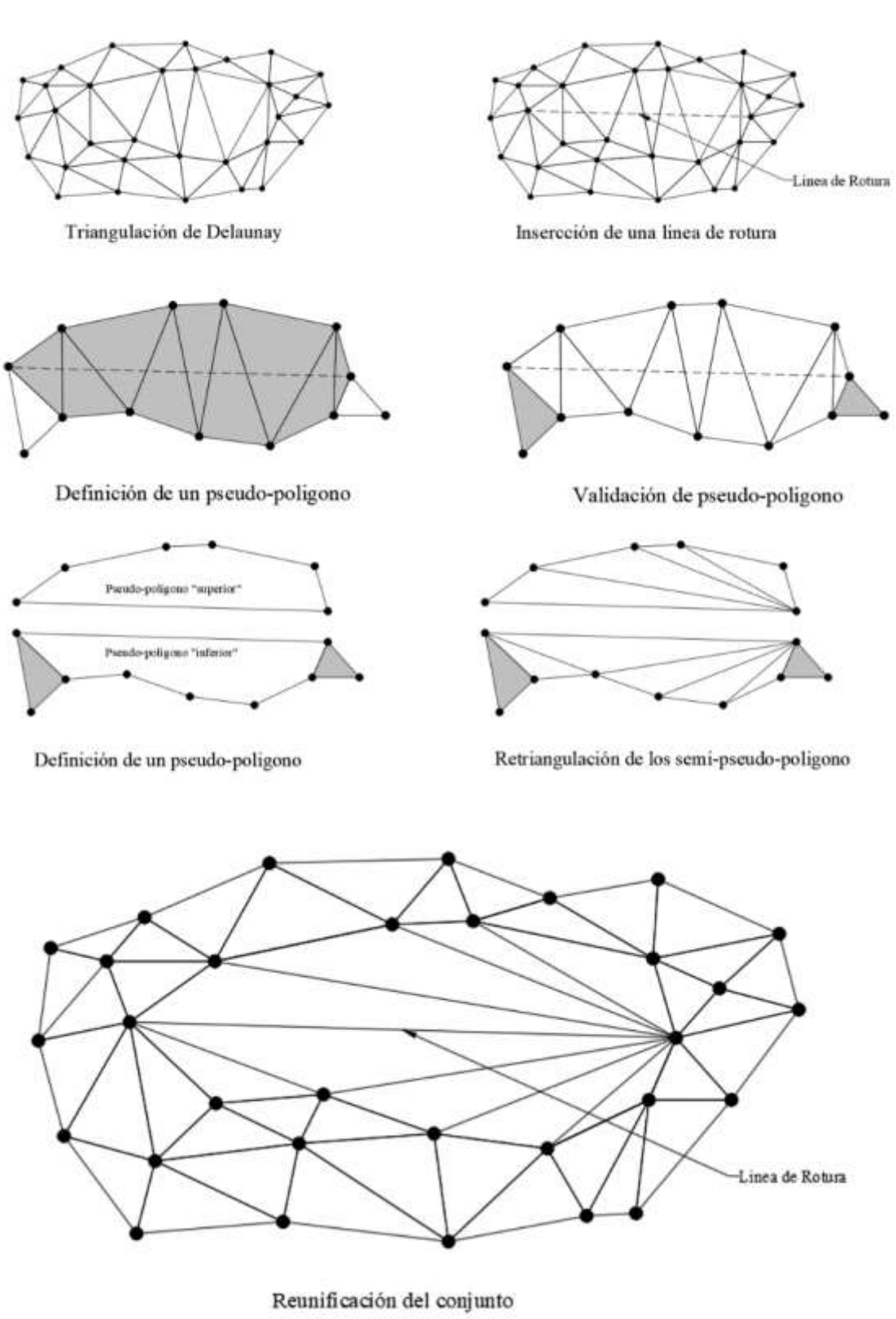

Ilustración 22 – Proceso de definición de un MDT con una línea de rotura.

La triangulación de los pseudopolígonos , áreas delimitadas por líneas de ruptura (ríos, carreteras, etc.), la triangulación presenta desafíos adicionales. Suele llevarse a cabo mediante el método de divide y vencerás. Esto implica dividir el pseudopolígono a lo

largo de las líneas de ruptura y luego triangular los dos polígonos resultantes de manera independiente. Posteriormente, se une el resultado obtenido para formar la triangulación completa del área afectada.

Es importante señalar que las líneas de ruptura pueden generar triángulos que no cumplen con las propiedades de una triangulación de Delaunay clásica, dado que las líneas de ruptura pueden generar lados que no cumplen con la condición de "legalidad". A pesar de esto, a menudo se las define como triangulaciones de Delaunay constreñidas (CDT).

Estas triangulaciones son ampliamente utilizadas en aplicaciones cartográficas y topográficas debido a que ofrecen una representación más precisa del terreno. Sin embargo, su implementación puede ser más compleja en el caso de batimetrías, donde el terreno sumergido no es directamente accesible. En estas situaciones, no es posible determinar previamente los puntos de medición ni las líneas de ruptura, lo que dificulta la aplicación de una triangulación constreñida.

Para abordar esta dificultad, se ha propuesto una alternativa que consiste en definir las líneas de ruptura después de observar los puntos relevantes. Esto permite adaptar la triangulación de manera más precisa a la topografía del terreno, a pesar de las limitaciones impuestas por la inaccesibilidad del terreno sumergido en el caso de batimetrías.

c. Triangulación con construcciones desconocidas a priori

Cuando los puntos de un modelo digital del terreno se han obtenido a partir de datos dispersos o en levantamientos subacuáticos o batimétricos, surgen situaciones críticas, donde para conseguir la mejor representación del terreno se requiere una triangulación constreñida, sin conocer previamente las líneas de rotura. Aunque inicialmente no se disponga de esta información, se presume que las líneas de rotura se hallan implícitas en la nube de puntos utilizada y se pueden deducir para construir el modelo digital del terreno. En resumen, se cree que los datos recopilados contienen pistas sobre las líneas de rotura adecuadas para capturar con precisión la topografía del terreno en cuestión. Sin embargo, esto plantea desafíos significativos, especialmente cuando el terreno es desconocido o inaccesible directamente.

Para abordar esta problemática, es esencial que la nube de puntos utilizada para generar el modelo digital del terreno sea lo suficientemente representativa. Esto significa que debe capturar los detalles topográficos necesarios con una densidad adecuada. Aunque en algunos casos, como las batimetrías, la topografía subacuática puede ser desconocida, es posible clasificarla de manera generalizada para inferir posibles líneas de rotura.

Aunque el terreno sea desconocido o inaccesible, es factible realizar una clasificación general de su topografía basada en categorías predefinidas. En las batimetrías, por ejemplo, esto se logra mediante la identificación de distintos tipos de fondos marinos, como rocosos abruptos, rocosos medios, suaves o muy suaves. A menudo, no es posible realizar una medición directa por el difícil acceso al lugar, pero se cuenta con información previa del terreno además los expertos pueden determinar el tipo de terreno basándose en las lecturas de la sonda, sin necesidad de realizar mediciones adicionales, lo que nos daría un planteamiento correcto.

Asimismo, las líneas de rotura o constricciones en un modelo digital del terreno TIN se refieren a cambios abruptos de pendiente. Estos cambios pueden ser evaluados según el

tipo de terreno, y en modelos TIN, la pendiente se calcula fácilmente como el ángulo entre las diferentes facetas o triángulos del modelo. Además, se señala que hay otros tipos de modelos digitales del terreno, como los basados en interpolaciones "kriging", que también tienen en cuenta este aspecto.

Una estrategia inicial para abordar la toma de datos es utilizar una gran cantidad de puntos suficientemente densa para capturar los detalles y lograr que la interpolación en lo más pequeñas posibles y una alta densidad en el modelo resultante. Otra opción para lidiar con la abundancia de datos y mejorar la precisión del modelo es emplear la triangulación de Delaunay y luego ajustar manualmente las líneas de rotura utilizando técnicas visuales como isolíneas o curvas de nivel[13]. Aunque este proceso es laborioso, costoso y propeno a errores, ofrece una solución al desafío de definir las líneas de rotura basadas en los datos disponibles.

Tras lo mencionado deducimos que, la triangulación de Delaunay proporciona una base sólida para representar la topografía a partir de una nube de puntos y la suma de líneas de rotura, aunque requiere un esfuerzo adicional, contribuye a mejorar la precisión y la representatividad del modelo resultante, lo que es fundamental.

Con la información hasta ahora observamos que la triangulación de Delaunay es muy efectiva para representar la topografía basada en coordenadas planimétricas ya que son los datos que emplea para la triangulación, pero, presenta limitaciones al no considerar la coordenada Z, es decir, la elevación del terreno. Para superar esta limitación, se propone un enfoque que incorpora la coordenada Z para mejorar la triangulación y tener un modelo más preciso. Esto implica la inclusión de las líneas de rotura que representan las variaciones bruscas reales en la pendiente del terreno, en contraposición a las variaciones bruscas potenciales, utilizar esta información nos permite definir las líneas de rotura de manera más precisa y coherente con el terreno real[9].

Este nuevo enfoque requiere un algoritmo que utilice las tres componentes de las coordenadas de los puntos para generar una triangulación mejorada. Es fundamental que el conjunto de puntos utilizado permita una representación precisa del terreno, de modo que ninguna línea de rotura o característica del terreno quede excluida de la modelización.

En resumen, al mejorar la triangulación de Delaunay con la inclusión de la coordenada Z y las líneas de rotura, se obtiene un modelo digital del terreno más preciso y fiel a la realidad. Esto se ilustra en una figura donde se compara una triangulación estándar con una mejorada, demostrando cómo la segunda representa de manera más precisa la topografía, especialmente en términos de elevación.

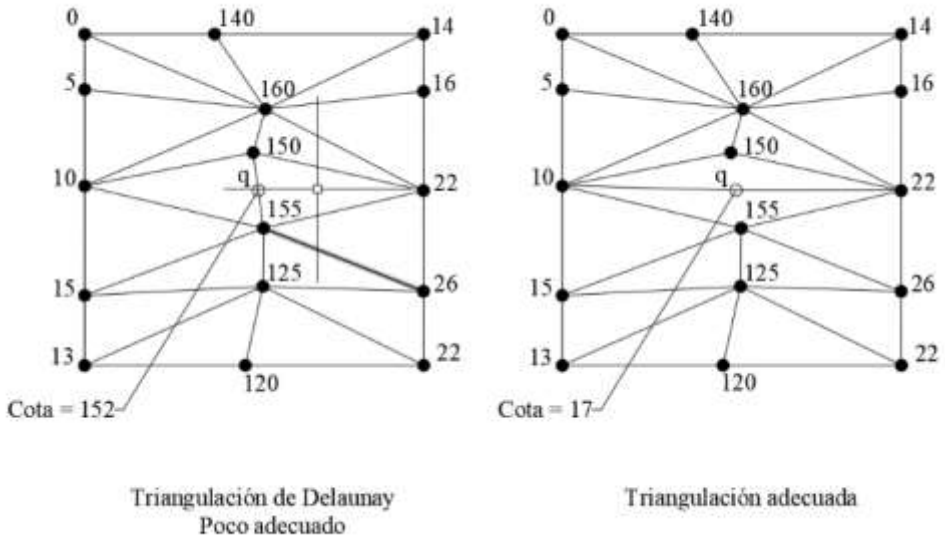

Ilustración 23 – Necesidad de una nueva triangulación mejorada.

2.5 EL PROCESO DE INTERPOLACIÓN

El proceso de estimación de la altura de un punto en una nube de puntos se desarrolla siguiendo las siguientes etapas:

- Localización espacial del punto: Se establecen las coordenadas X, Y y Z del punto.
- Delimitación del entorno del punto: Se define un área alrededor del punto que será utilizada en la interpolación.
- Extracción de datos: Se obtienen los valores de elevación del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) dentro del entorno del punto.
- Ejecución de la interpolación: Se aplica una técnica apropiada para calcular la altura estimada del punto.
- Asignación de la altura: Se asigna la altura estimada al punto.

De entre las fases del proceso, las dos últimas, la extracción de datos y la interpolación, tienen especial relevancia, ya que determinan la precisión de la estimación y, por ende, la calidad del modelo obtenido[14].

A diferencia de los modelos matriciales, en un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) no es fácil acceder al valor de la altura de un punto específico a partir de su posición espacial. La tarea de localizar los datos en el entorno del punto requiere de técnicas de búsqueda específicas, siendo las técnicas de búsqueda global considerablemente más eficientes que las de búsqueda secuencial.

Los métodos utilizados para interpolar un valor a partir de un conjunto de puntos dispuestos de manera irregular se pueden agrupar en tres categorías principales:

- Ponderación por distancia inversa: Se asigna un mayor peso a los puntos más próximos al punto objetivo.

- Superficies de tendencia: Se crea una superficie que pasa por los puntos conocidos y se utiliza para calcular la altura del punto objetivo.
- Kriging: Es un método estadístico avanzado que considera las características de la variabilidad espacial de los datos.

2.5.1 Función inversa de la distancia

Este enfoque implica asignar pesos a los datos circundantes basados en la inversa de la distancia que los separa del punto en cuestión, utilizado la formula:

$$Z_k = Z_{X,Y}^{INT} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Z_i * \frac{1}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^k}}$$

Ecuación 6

Siendo

Z_k es el valor interpolado en el punto (X, Y)

n es el número de interpolaciones a realizar

$\frac{1}{d_i^k}$ determina el factor de ponderación del punto i

d_i es la distancia entre el punto (X, Y) y el punto i.

k es un exponente que controla la influencia de la distancia en la interpolación.

Si bien este método es computacionalmente sencillo, presenta la limitación de que, al ser esencialmente una media ponderada, el valor interpolado estará dentro del rango de los valores del entorno. Por lo tanto, el tratamiento adecuado de las formas cóncavas y convexas depende de la distribución original de los puntos[6].

2.5.2 Estimación de superficies dependencia

Este método busca crear una superficie que se ajuste a los puntos medidos en un área determinada. La superficie se ajusta a los datos utilizando técnicas como los mínimos cuadrados y se define mediante una ecuación matemática que es:

$$Z_{X,Y}^{INT} = \sum_{i=0}^{k} \sum_{j=0}^{k-1} a_{ij} * x^i * y^i$$

Ecuación 7

Naturalmente, el grado de complejidad de la superficie afecta al tiempo de computación, y algunos investigadores sugieren utilizar ecuaciones de quinto grado para minimizar este tiempo. La elección del grado de complejidad óptimo implica encontrar el valor de k que minimiza la suma de las desviaciones entre los datos reales y los estimados, por debajo de un umbral predefinido:

$$\sum_{X,Y}\left(Z_{X,Y}^{INT} - Z_{X,Y}^{REAL}\right)^2 < E_{máx}$$

Ecuación 8

Ajuste por mínimos cuadrados los coeficientes de la ecuación se determinan mediante la técnica de mínimos cuadrados. Esta técnica busca minimizar la suma de las diferencias cuadráticas entre los valores medidos en los puntos y los valores predichos por la superficie[15].

Las superficies de tendencia, herramientas comunes en la interpolación de datos, enfrentan dos desafíos cruciales que deben abordarse para obtener resultados precisos y confiables. En primer lugar, el número de datos disponibles juega un papel fundamental en la fiabilidad del análisis. Es necesario contar con una cantidad suficiente de puntos medidos para garantizar que el análisis estadístico sea significativo y representativo de la realidad. La falta de datos puede conducir a resultados imprecisos o sesgados, lo que afecta la validez de las conclusiones obtenidas a partir de la interpolación. Además, las extrapolaciones más allá del rango de datos medidos representan otro desafío importante. Estas estimaciones fuera del dominio de los datos originales pueden generar valores erróneos, especialmente cuando se utilizan ecuaciones de alto grado. Las ecuaciones polinómicas de grado elevado tienden a producir valores extremos en las extrapolaciones, lo que puede distorsionar la interpretación de los resultados y llevar a conclusiones incorrectas[2].

En resumen, la consideración cuidadosa del número de datos disponibles y la atención a las extrapolaciones son aspectos clave en el uso efectivo de las superficies de tendencia en la interpolación de datos.

2.5.3 Interpolación según el método “Kriging”

La singularidad del método se distingue por su enfoque único en la asignación de pesos a los puntos medidos, lo cual puede complementarse con la delimitación estadística del entorno para el punto de interés. En términos de la variación espacial de la variable, el Kriging descompone esta variación en tres componentes principales:

$$Z_{x,y}^{INT} = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i * Z_i$$

Ecuación 9

El primer componente puede interpretarse como una constante o estar relacionado con una superficie de tendencia, expresado por la ecuación:

1. Tendencia: Representa la variación global de la variable y puede ser un valor medio constante o una superficie de tendencia que se ajusta a los datos. Mediante la formula:

$$Z_{X,Y}^{INT} = \sum_{i=0}^{k}\sum_{j=0}^{k-1} a_{ij} * x^i * y^i$$

Ecuación 10

2. Componente aleatorio: Captura la variación espacial no determinista de la variable y se modela mediante una función de correlación espacial que describe la relación entre los valores de la variable en función de su distancia espacial. La correlación espacial se define:

$$Z_{X,Y}^{2} = Z_{X,y}^{1} - Z_{X,Y}^{REAL}$$

Ecuación 11

3. Error de medida: Refleja la incertidumbre aleatoria en la medición de la variable y se considera un componente aleatorio no correlacionado espacialmente.

El segundo aspecto en el Kriging se suele suponer que es el componente aleatorio, el cual se cree que está relacionado con la distancia entre los datos. En el método Kriging, esta dependencia se estima utilizando la covarianza entre los datos que están separados por diversas distancias. En donde la covarianza mide la relación entre dos variables aleatorias. En el caso del Kriging, se utiliza para medir la relación entre los valores de la variable a estimar en dos puntos diferentes, en función de la distancia que los separa[2]. Utilizando la formula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} var(Z_p - Z_{p+h})$$

Ecuación 12

Siendo:

Var la varianza

Z_p *la cota en un punto* p

Z_{p+h} *la cota de un punto a una distancia* h

La covarianza entre dos puntos, x_i y x_j, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C(x_i, x_j) = E\left[(Z(x_i) - \mu)\left(Z(x_j) - \mu\right)\right]$$

Ecuación 13

Donde:

$C(X_i, X_j)$: Covarianza entre los puntos x_i y x_j

E: Esperanza matemática.

$Z(x_i)$: Valor de la variable en el punto x_i .

$Z(x_j)$: Valor de la variable en el punto x_j.

μ: Valor medio global de la variable.

La función que surge de este proceso se conoce como variograma y describe la correlación entre los datos en relación con la distancia. La fórmula comúnmente utilizada para su representación es la siguiente:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h}\sum_{i=1}^{n_h}(Z_{pi} - Z_{pi+h})^2$$

Ecuación 14

Donde h representa el número de pares de valores separados por una distancia h .

El siguiente paso implica calcular las funciones de ponderación, λ_i, para asegurar que no tengan sesgo y minimizar la varianza esperada. Esto se logra resolviendo la siguiente ecuación matricial:

$$[\gamma(h_{ij})]^*[\lambda_i] = [\gamma(h_{ip})]$$

Ecuación 15

Donde:

$[\gamma(h_{ij})]$ Es la matriz que contiene los datos de la semivarianza para la distancia existente entre los puntos i, j(i = 1…k; j = 1…k)

$[\lambda_i]$ es un vector de pesos que contiene las funciones de ponderación para cada uno de los puntos considerados (i = 1…k). Estas funciones de ponderación determinan cómo se combinan las mediciones de los puntos vecinos para estimar el valor en el punto objetivo.

$[\gamma(h_{ip})]$ vector que contiene los valores de la semivarianza correspondiente a las distancias entre cada uno de los puntos dato y el punto objetivo, que es el punto donde queremos realizar la estimación. Estos valores de semivarianza se utilizan en el proceso de cálculo de los pesos para determinar la influencia de cada punto dato en la estimación del valor en el punto objetivo.

El método de Kriging nos posibilita la obtención del variograma para determinar la distancia a la cual los datos pueden considerarse independientes. Esta distancia establece el alcance del entorno que se tiene en cuenta alrededor del punto objetivo[15].

Otro parámetro calculado es el error esperado para cada punto, el cual depende de los valores de varianza observados en los datos y se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$r_p^2 = \sum_{i=1}^{k}\lambda_i\gamma(h_{ip})$$

Ecuación 16

El método de Kriging se destaca como una técnica de estimación óptima desde el punto de vista estadístico, siempre y cuando el variograma utilizado refleje adecuadamente la validez entre los datos. Esto implica que la dependencia entre los datos debe estar principalmente determinada por la distancia entre ellos. Además, en el marco teórico del Kriging, se suele asumir una distribución isotrópica de los datos, lo que significa que la distancia entre dos puntos puede calcularse sin considerar su orientación relativa. Sin embargo, su aplicación conlleva una complejidad en los cálculos necesarios para su implementación.

En conclusión, la modelización geoespacial constituye un pilar fundamental en la investigación y la aplicación de técnicas y métodos disponibles para representar con precisión y detalle el entorno físico. Con la multitud de metodologías disponibles, es importante reconocer que cada objeto o territorio a modelizar demanda un enfoque y metodología específica. La selección adecuada de la técnica más apropiada no solo garantiza la fidelidad y precisión de la representación, sino que también maximiza la utilidad y relevancia de los resultados obtenidos.

Además, es fundamental comprender que el análisis y procesamiento de los datos capturados por el instrumento más óptimo requiere habilidades técnicas y conocimientos especializados en cada uno de ellos. La aplicación de algoritmos de filtrado, la integración de datos multiplataforma y la generación de modelos tridimensionales precisos son aspectos esenciales del proceso de modelización que demandan una atención meticulosa y una experiencia sólida en el campo.

Es fundamental reconocer que la modelización geoespacial no es un proceso estático, sino que evoluciona constantemente en respuesta a los avances tecnológicos y metodológicos. La aplicación de técnicas emergentes como el escaneo láser y la fotogrametría aérea con drones está revolucionando la forma en que se recopilan y procesan los datos geoespaciales, permitiendo la captura de información detallada y precisa a una escala sin precedentes. En este sentido, el escáner láser es una herramienta indispensable en el arsenal del modelador geoespacial, ofreciendo un potencial sin igual en la captura y representación tridimensional de entornos geográficos.

Por último, la correcta selección y aplicación de las técnicas y métodos de modelización para cada caso a modelizar desempeña un papel crucial. Desde los Modelos Digitales del Terreno (MDT) hasta los modelos derivados y las simulaciones dinámicas, cada enfoque ofrece ventajas y limitaciones únicas. Por lo tanto, es esencial seleccionar cuidadosamente la técnica más apropiada para cada situación, teniendo en cuenta la precisión requerida, la disponibilidad de datos y los objetivos específicos del análisis. Al hacerlo, se garantiza una representación fiel y útil del paisaje, permitiendo una toma de decisiones informada y efectiva en una amplia variedad de aplicaciones.

3 PROPUESTA METODOLOGICA

3.1 INTRODUCCION Y CONCRECION DE OBJETIVOS

En el campo de la modelización geoespacial, la captura de datos es el primer paso crucial para obtener una representación precisa y detallada del entorno físico. Este proceso, fundamental para la generación de modelos digitales, implica la adquisición de información tridimensional sobre objetos, terrenos o estructuras de interés. Sin embargo, la diversidad de objetos y territorios a modelizar demanda una variedad de técnicas y metodologías de captura de datos, cada una con sus propias ventajas y limitaciones. La elección de la técnica adecuada depende en gran medida de la naturaleza y las características del objeto de estudio, así como de los objetivos específicos de la modelización.

La elección de la técnica de captura de datos más apropiada constituye un proceso de crucial importancia en el ámbito de la modelización. Este proceso se encuentra influenciado por una serie de factores diversos y fundamentales que deben ser cuidadosamente considerados. Entre estos factores, destacan la escala del objeto de estudio, la precisión requerida para la representación del terreno, la accesibilidad del área de interés y la disponibilidad de recursos técnicos y financieros.

En el panorama de las técnicas de captura de datos más comúnmente empleadas que ya se han mencionado anteriormente, se distinguen la fotogrametría aérea, el escaneo láser terrestre y la estación topográfica. La fotogrametría aérea, gracias al empleo de fotografías aéreas capturadas desde aeronaves, se posiciona como una opción idónea para la captura de grandes extensiones de terreno con una resolución espacial moderada. Sin embargo, es importante tener presente que esta técnica puede ser sensible a fenómenos atmosféricos como la distorsión y la presencia de nubes, lo cual puede afectar la calidad de los datos obtenidos.

Por otro lado, el escaneo láser terrestre se destaca por su capacidad para obtener modelos detallados y precisos de estructuras urbanas, terrenos accidentados y otros elementos de interés geográfico. La utilización de pulsos láser para medir con precisión la distancia entre el escáner y los objetos en el entorno, permite una captura de datos rápida y altamente precisa, aunque esta técnica puede resultar costosa y requerir un acceso directo al área de estudio. No obstante, su nivel de detalle y precisión la convierten en una opción muy valiosa para proyectos que demandan una representación altamente precisa del terreno. Aunque esa haya sido su función principal, el láser escáner también ofrece la posibilidad de modelizar elementos de tamaño reducido con una precisión excepcional. Esta capacidad de capturar objetos pequeños y detallados hace que el escáner láser sea una herramienta de gran importancia

Además, la estación topográfica, basada en observaciones directas realizadas en el terreno mediante instrumentos de medición especializados, ofrece una alternativa valiosa para la captura de datos detallados y localizados. Si bien esta técnica puede requerir más tiempo y recursos en comparación con las opciones previamente mencionadas, su capacidad para proporcionar mediciones precisas y fiables hace que sea especialmente adecuada para proyectos que requieren un alto nivel de detalle y exactitud en la captura de datos.

Además, en este apartado, se detallará el proceso metodológico e instrumental que será empleado en el experimento a realizar como parte del trabajo de fin de grado. El objetivo

principal de esta investigación es evaluar la viabilidad y precisión del uso de un escáner láser de corto alcance en la creación de modelos digitales de tamaño reducido como pueden ser rocas, minerales, zonas de difícil acceso, etc. En particular, se busca determinar si esta tecnología puede ser una opción factible para aplicaciones futuras en el campo de la modelización.

En este trabajo se ha optado más por un trabajo en laboratorio, donde se realizará la captura de datos utilizando el escáner láser de corto alcance para realizar la modelización de elementos de pequeño tamaño. Además, se llevará a cabo un proceso de adquisición de datos, con las herramientas que tenemos a nuestra disposición con el fin de garantizar la calidad y precisión de los datos obtenidos. Una vez realizada la captura de datos, se llevará a cabo el procesamiento y análisis de los datos, utilizando software especializado para la generación de modelos digitales tridimensionales. Se evaluará la calidad y precisión de los modelos obtenidos mediante la comparación con datos de referencia o mediciones realizadas in situ, y se identificarán posibles errores o discrepancias que puedan surgir durante el proceso.

3.2 DESCRIPCION TECNICA PROPUESTA

3.2.1 Instrumental el láser-escáner

Los orígenes del escáner láser se remontan a la década de 1960, cuando los científicos e ingenieros comenzaron a explorar el potencial de la luz láser para medir distancias y crear representaciones tridimensionales. Entre los pioneros de esta tecnología se encuentran Art Thurlow de la compañía Sikorsky Aircraft y Roland Besl de la Universidad de Ohio, quienes desarrollaron los primeros prototipos de escáneres láser en la década de 1970.

Luego de considerar los aspectos fundamentales relativos al progreso del láser, resulta pertinente llevar a cabo un análisis detallado del dispositivo y sus componentes principales. La integración de estos elementos conduce al logro del objetivo primordial, que consiste en la obtención de información de carácter geométrico, radiométrico y, en el caso de emplear una cámara interna, cromático, del objeto de interés que se pretende modelar.

3.2.2 Tipos de laser escáner

La tecnología láser 3D emerge como una alternativa innovadora para capturar información sobre objetos de manera rápida, cómoda y precisa. Esta herramienta permite generar bases de datos fieles a la realidad, conservando en formato digital la información necesaria para el mantenimiento e incluso la reconstrucción del objeto en cuestión.

Los sistemas de medición láser 3D se clasifican en dos grupos según el método empleado para medir distancias[16]:

- Método de tiempo de vuelo que consiste en medir el tiempo que tarda un pulso de luz emitido por un láser en viajar hasta el objeto y regresar al sensor. La distancia se calcula utilizando la velocidad constante de la luz y el tiempo transcurrido entre el envío y la recepción del pulso. Los sistemas de tiempo de vuelo pueden alcanzar distancias de hasta 100 metros. Sin embargo, la precisión de estos sistemas, aunque suficiente para muchas aplicaciones, es ligeramente inferior a la de otros métodos.

- El método de triangulación para determinar la distancia, analiza la deformación del patrón de luz proyectada por un láser sobre el objeto. Un haz láser colimado recorre la superficie del objeto mientras una cámara captura su movimiento. Al calcular la paralaje de cada punto, se puede determinar la distancia entre el escáner y cada zona del objeto. Esta técnica ofrece una precisión extraordinaria, llegando a décimas de milímetro. Sin embargo, su alcance es mucho más limitado, generalmente entre 2 y 4 metros, debido a la complejidad de la medición indirecta, que requiere una alineación precisa entre el láser y la cámara, así como una iluminación adecuada para la captura de imágenes.

3.2.2.1. Técnicas directas

El núcleo esencial del láser escáner terrestre (TLS) radica en su dispositivo de captura, el cual se compone de un distanciómetro y un mecanismo rotatorio destinado al escaneo, típicamente implementado como un espejo de dimensiones reducidas o un prisma. En los modelos tradicionales, se hacía necesario unificar el dispositivo con una unidad de control externa, usualmente incorporada en un ordenador portátil equipado con el software indispensable para la gestión del proceso de captura. No obstante, en la actualidad, el sistema de control se encuentra completamente integrado en el propio dispositivo de captura, siendo esta una interfaz que se manipula a través de una pantalla táctil o con botones. Asimismo, los modelos más modernos ofrecen la posibilidad de realizar un control mediante la pantalla y un dispositivo portátil.

Entre los elementos relevantes que requieren mencionarse se encuentran las baterías, el trípode y los elementos externos que se utilizan como puntos de referencia para el registro de las nubes de puntos, la alineación o ubicarnos mejor luego en el modelo. Estos elementos, que suelen ser representados por dianas de dos colores, negras y blancas o esferas estandarizadas, son esenciales para llevar a cabo las transformaciones de coordenadas necesarias para fusionar múltiples escaneos. Debido al avance tecnológico actual, estas técnicas se dirigen cada vez más hacia una disminución en la dependencia de estos elementos, utilizando diversas alternativas nuevas, como la identificación automática de puntos comunes en los diversos escaneos, si se pretende asegurar un registro adecuado y la fidelidad geométrica del modelo final, lo que hace que se recomiende su empleo.

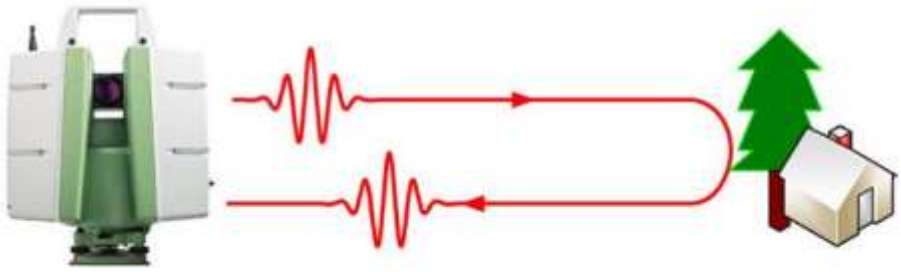

Ilustración 24 – Esquema de funcionamiento de laser escáner de tiempo de vuelo.

a) El distanciómetro

El distanciómetro pulsado láser constituye un componente fundamental en los escáneres láser, desempeñando un papel crucial en la medición precisa de distancias a objetos. Su funcionamiento se basa en la emisión de pulsos de luz láser cortos y en la medición del

tiempo que tarda el pulso en viajar hacia el objeto y regresar al escáner. Este proceso, se realiza a través de una serie de componentes principales que incluyen el sistema óptico, los elementos de medición de tiempo y el sistema de registro. El sistema óptico está compuesto por el transmisor, responsable de emitir los pulsos de luz láser hacia el objeto, y el receptor, encargado de captar la luz láser reflejada por el objeto y convertirla en una señal eléctrica. Los elementos de medición de tiempo, como el cronómetro y el discriminador temporal, permiten medir con precisión el tiempo transcurrido entre el envío y la recepción del pulso láser[17]. Por su parte, el sistema de registro incluye el convertidor analógico-digital y la unidad de control, los cuales procesan la señal eléctrica del receptor y calculan la distancia entre el escáner y el objeto a través de la energía recibida con esta fórmula:

$$E_R = \left(\pi * \rho * \frac{D_R}{(4 * d^2)}\right) * E_T * \eta_A * \eta_S$$

Ecuación 17

Donde:

ρ es el coeficiente de reflexión de la superficie a capturar, valor de 0-1.

D_R diámetro la lente que se encuentra en el receptor.

d distancia al elemento a capturar.

η_A constantes de la trasmisión de la en la atmosfera.

η_S constantes de la trasmisión de la óptica en el sistema.

Se puede deducir que la energía recibida por el receptor del distanciómetro láser es menor que la energía emitida por el transmisor y también es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (d^2). Esto significa que a medida que la distancia entre el escáner y el objeto aumenta, la energía recibida disminuye rápidamente. Lo que conlleva dos consecuencias para poder medir correctamente, una, la necesidad de control de ganancia o con palabras más coloquiales de poder controlar la intensidad de la energía del láser, en donde, para poder medir el tiempo con precisión, es necesario que el pulso recibido tenga una amplitud suficiente. Por lo tanto, se utiliza un amplificador para aumentar la ganancia del pulso recibido antes de enviarlo al discriminador temporal. La ganancia debe ajustarse en función de la distancia al objeto para compensar la disminución de la energía recibida. La segunda, menos utilizada pero que, en los equipos modernos, suele estar presente en todos, es la denominada CFD (discriminación por división constante) esta técnica de detección del pulso reflejado debe ser sensible a variaciones de amplitud y forma del pulso. Esta técnica funciona de modo que divide el pulso en dos fracciones y retrasa una de ellas. Este sistema ayuda a reducir los errores de medición causados por la amplitud y la forma del pulso reflejado.

La unidad temporal del distanciómetro láser desempeña un papel fundamental en la determinación precisa de la distancia entre el escáner láser y el objeto de interés. Esta unidad se basa en la generación y medición de pulsos de alta frecuencia emitidos por un oscilador específico. Al medir el intervalo entre la emisión del pulso de referencia y la recepción del pulso reflejado por el objeto, es posible calcular la distancia con gran

precisión. Para alcanzar precisiones milimétricas en las mediciones, es imprescindible que la unidad temporal tenga la capacidad de medir intervalos de tiempo extremadamente cortos, del orden de los 7 picosegundos. Esto se logra mediante el uso de circuitos integrados especializados en la interpolación de intervalos de tiempo. Estos circuitos, permiten una medición precisa del tiempo transcurrido, incluso cuando se trata de pulsos láser de corta duración.

La precisión de la medición de distancia no solo depende de la unidad temporal, sino también de otros factores:

- Reflexión del objeto: La cantidad de luz láser reflejada por el objeto depende de las propiedades de su superficie. Superficies rugosas o poco reflectantes pueden reducir la precisión de la medición.
- Energía del láser: La potencia del pulso láser emitido también influye en la precisión. Un pulso más potente permite una mejor detección del pulso reflejado, lo que mejora la precisión.
- Transmisividad atmosférica: La atmósfera puede absorber o dispersar parte del pulso láser, lo que afecta a la cantidad de luz que llega al objeto y regresa al receptor. La presencia de niebla, polvo o lluvia puede reducir la precisión de la medición.
- Campo instantáneo de visión (IFOV): El IFOV define el área del objeto que se está midiendo en un instante dado. Un IFOV más pequeño permite una medición más precisa de puntos específicos del objeto.
- Sensibilidad del receptor: La sensibilidad del receptor determina la capacidad de detectar pulsos de luz débiles. Un receptor más sensible permite una mejor detección del pulso reflejado, lo que mejora la precisión.

En la teoría de la difracción se pone de manifiesto que la difracción del haz láser en un escáner láser es un fenómeno crucial que influye en la precisión y el tamaño del área medida. Cuando un rayo láser incide sobre un objeto, se difracta, lo que hace que el haz se expanda y se desvíe de su trayectoria original. Esto resulta en una divergencia del haz láser, donde el haz se amplía a medida que se aleja del sensor. La difracción puede afectar tanto al tamaño del punto de escaneo como a la precisión de la medición de distancia. Para controlar este efecto, se utilizan técnicas como las lentes colimadoras y las aberturas pinhole, que ayudan a reducir la divergencia del haz y mejorar la resolución y precisión del escáner láser. Aun así, teniendo en cuenta todas estas cuestiones sobre la teoría de difracción se puede calcular el tamaño del punto de escaneo y la curvatura del frente de onda[18].

El tamaño del punto de escaneo, es decir, el área del objeto que se mide en un instante dado, está limitado por la difracción. El radio del punto de escaneo (W) se define como la distancia desde el centro del haz hasta el punto donde la intensidad de la luz ha caído al 63,2% ($\frac{1}{e^2}$) de su valor máximo en el eje longitudinal (I0). La fórmula para calcular el radio del punto de escaneo (W) en función de la distancia (d) entre el emisor y el frente de onda, es la siguiente:

$$W(d) = w_c * \left(1 + \left(\frac{(\lambda * d)}{(\pi * {w_c}^2)}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 18

Siendo

λ la longitud de onda.

w_c el radio mínimo del haz (mitad de la "cintura del haz").

Cuando hablamos de Curvatura del Frente de Onda nos estamos refiriendo a el frente de onda del haz láser se curva a medida que se propaga. La curvatura del frente de onda (R) depende de la distancia (d) entre el emisor y el frente de onda. La fórmula para calcular el radio de curvatura (R) es:

$$R(d) = d * \left(1 + \left(\frac{(\pi * {w_c}^2)}{(\lambda * d)}\right)^2\right)$$

Ecuación 19

Siendo

λ la longitud de onda.

w_c el radio mínimo del haz.

También es importante tener en cuenta en el estudio del haz láser en un escáner láser: la convergencia y divergencia del haz, y el concepto de campo visual instantáneo (IFOV). El haz láser inicialmente se emite de forma divergente, pero converge en un punto mínimo antes de volver a divergir, influenciado por la difracción. El IFOV define el área del objeto que se mide en un momento dado, determinada por el tamaño del punto de escaneo, que a su vez puede ser modificado mediante técnicas como el uso de lentes colimadores o aberturas pinhole para mejorar la resolución del escáner.

b) Unidad de desvió del haz

En el ámbito de los escáneres láser, la desviación del haz de luz es un elemento fundamental para lograr un escaneo preciso y eficiente de la superficie de interés. En este contexto, diversos sistemas de desvío han sido desarrollados, cada uno con sus propias características y ventajas. Entre ellos, los sistemas rotativos y oscilantes que permiten desviar el haz láser de manera controlada, explorando así diferentes áreas de la superficie y garantizando una cobertura completa durante el escaneo.

Los sistemas de desvío que emplean espejos poligonales, generalmente contienen tres o más caras reflectantes, para desviar el haz láser. Estos dispositivos, permiten que el haz ilumine diferentes puntos de la superficie de interés de manera secuencial, generando un escaneo completo. Las principales características son:

- Alta velocidad de barrido: La rotación del espejo permite alcanzar velocidades elevadas, posibilitando un escaneo rápido y eficiente de grandes áreas.

- Gran amplitud de ángulos de barrido: Los espejos poligonales pueden proporcionar una amplia gama de ángulos de barrido, lo que permite cubrir superficies extensas y realizar escaneos complejos.
- Bajo costo de producción: En comparación con otros sistemas de desvío, los rotativos presentan un costo de producción relativamente bajo, lo que los convierte en una opción atractiva desde el punto de vista económico.

La elección del material para los espejos rotativos depende de diversos factores, incluyendo la aplicación específica, el rango de longitudes de onda del láser y los requisitos de costo. Entre los materiales más comunes se encuentran:

- Aluminio: Ofrece una buena relación entre peso y costo, pero puede ser susceptible a la corrosión.
- Cristal: Proporciona una alta calidad de reflexión y resistencia a la corrosión, pero es más pesado y costoso que el aluminio.
- Plástico: Es una opción ligera y económica, pero presenta una menor calidad de reflexión que el aluminio o el cristal.

Estos espejos también pueden incorporar recubrimientos ópticos para mejorar sus propiedades, tales como recubrimientos anti reflectantes que reducen la cantidad de luz reflejada desde la superficie del espejo, aumentando la eficiencia del sistema y los recubrimientos dicroicos que permiten que el espejo refleje ciertas longitudes de onda de la luz y transmita otras, lo que resulta útil para aplicaciones específicas como la separación de haces.

Un sistema de desvío típico para realizar los movimientos que efectúaincluye también un motor que impulsa la rotación del espejo a la velocidad deseada, un sistema de cojinetes para proporciona un soporte suave y preciso para el eje del rotor, minimizando las vibraciones y asegurando la estabilidad del sistema y por último, encima de todo esto, está montado el espejo para garantizar la estabilidad del sistema de desvío rotativo y garantizar un escaneo preciso y confiable. Diversos factores pueden afectar a la estabilidad, como son la velocidad de rotación, la tensión y la temperatura. Teniendo en cuenta la velocidad de rotación, cuanto mayor es esta, la probabilidad de vibraciones y oscilaciones es más probable lo que podría afectar en la precisión del escaneo, aumentando el error. Al centrarse en la tensión esto afecta al sistema de cojinetes donde una tensión excesiva o insuficiente, puede generar una inestabilidad en el espejo, y por último, habría que tener en cuenta la temperatura ya que, la diferencia de esta puede provocar expansiones térmicas desiguales en los componentes del sistema.

Al analizar el rendimiento de los escáneres láser, resulta crucial considerar dos parámetros clave: la ratio de escaneo y el ángulo instantáneo del espejo. Estos elementos proporcionan información esencial sobre la velocidad y la cobertura del escaneo, factores determinantes para una variedad de aplicaciones.

La ratio de escaneo (SR) define como la cantidad de líneas que un escáner láser puede generar por segundo. Se calcula multiplicando el número de caras del espejo poligonal (N) por la velocidad de rotación del mismo (RPM).

$$SR = N * RPM$$

Ecuación 20

Una SR elevada indica una capacidad para generar un mayor número de líneas por segundo, lo que se traduce en un escaneo más rápido y detallado. No obstante, una alta SR puede derivar en una mayor cantidad de datos, lo que plantea desafíos adicionales en términos de procesamiento y visualización.

El ángulo instantáneo del espejo (θ) en un escáner láser con espejos oscilantes está determinado por el ángulo máximo de exploración (α_{max}) y la frecuencia de oscilación del espejo (f).

$$\theta = \alpha_{max} * \sin(2\pi f * t)$$

Ecuación 21

Siendo:

α_{max} el máximo ángulo vertical que puede proporcionar el dispositivo.

f la frecuencia de oscilación del espejo en Hz.

t el tiempo desde el inicio de la oscilación.

Este ángulo, determina la dirección en la que incide el haz láser sobre la superficie en un momento dado, permitiendo un barrido completo de la misma.

Para determinar el comportamiento del haz laser hay que tener en cuenta la posición de la lente emisora en relación con los espejos. En estos casos, hay dos configuraciones comunes que se utilizan, pre objetivo y post objetivo. La configuración pre objetivo en escáneres láser implica dirigir el haz láser hacia un espejo, el cual redirige el haz hacia una lente o un segundo espejo curvo antes de alcanzar el objeto de interés. Este enfoque, proporciona un frente de haz plano, lo que permite una iluminación uniforme y minimiza la aberración óptica, pero requiere un montaje más complejo y puede resultar más costoso. La elección de este enfoque depende de las necesidades específicas de cada aplicación y los recursos disponibles.

En la segunda configuración, el post objetivo en escáneres láser, el haz láser pasa primero a través del sistema óptico de imagen antes de ser desviado por un espejo. Este enfoque, ofrece un montaje más simple y compacto, lo que puede implicar un costo menor y un tamaño reducido. Sin embargo, puede generar un frente de haz curvo y aumentar la aberración óptica en el sistema. La elección entre configuración pre objetivo y post objetivo depende de las necesidades específicas de la aplicación y las consideraciones de diseño.

Las variantes de precisión y control de la posición angular del haz son fundamentales y para ello se emplean sensores angulares de alta resolución que permiten registrar y controlar la posición del haz a lo largo de la trayectoria de escaneo. Existen dos tipos de sensores angulares: los sensores absolutos que indican la posición angular en relación con un punto de referencia y los sensores incrementales que miden la variación angular con una posición de referencia anterior. Sin embargo, en los dispositivos con espejos poligonales, el sensor angular juega un papel crucial en la sincronización del movimiento

del espejo con la emisión del haz láser. El codificador del sensor registra la velocidad del prisma, asegurando que el haz se alinee correctamente a lo largo de la trayectoria de escaneo.

En la desviación del haz de láser es una parte fundamental para la captura de información y esto se puede realizar de dos maneras mediante espejos oscilantes en donde los espejos se mueven de forma vertical u horizontal, estos movimientos desvían el haz láser generando forma de rastrillo. El segundo método, es la desviación por espejos panorámicos. Estos espejos giran sobre un eje, desviando el haz en dirección horizontal, lo que nos permite cubrir un amplio rango de ángulos.

Método	Ventajas	Desventajas
Espejos Oscilantes	Simple, económico	Muy lentos, menor precisión
Espejos Panorámicos	Escaneos panorámicos completos	Muy complejos

Tabla Numero 5- Comparativa de ventajas y desventajas de los tipos de espejos.

3.2.2.1 Técnicas Indirectas

En esta técnica de escaneo 3D, denominada técnica indirecta o escáner laser de triangulación, usa el principio de triangulación para medir la distancia a un objeto. La idea de funcionamiento es muy similar a la de tiempo de vuelo, en donde se emite un haz de láser hacia la superficie del objeto, pero en vez de medir el tiempo de vuelo se encarga de medir el ángulo entre el haz láser y un detector o cámara. Esta información se utiliza para calcular la distancia al objeto mediante trigonometría.

Este tipo de equipos funciona según el principio de triangulación, en el que la luz láser se emite y vuelve a una ubicación específica en un conjunto de sensores de imagen de una cámara interior. Para calcular la distancia entre el objeto y el escáner 3D, el sistema utiliza la triangulación trigonométrica, ya que la fuente láser, el sensor y el objetivo dejado en el objeto forman un triángulo. La distancia entre la fuente láser y el sensor se conoce con gran precisión, al igual que el ángulo entre el láser y el sensor. A medida que la luz láser rebota en el objeto escaneado, el sistema puede medir el ángulo con el que regresa al sensor y, por tanto, la distancia desde la fuente láser hasta la superficie del objeto.

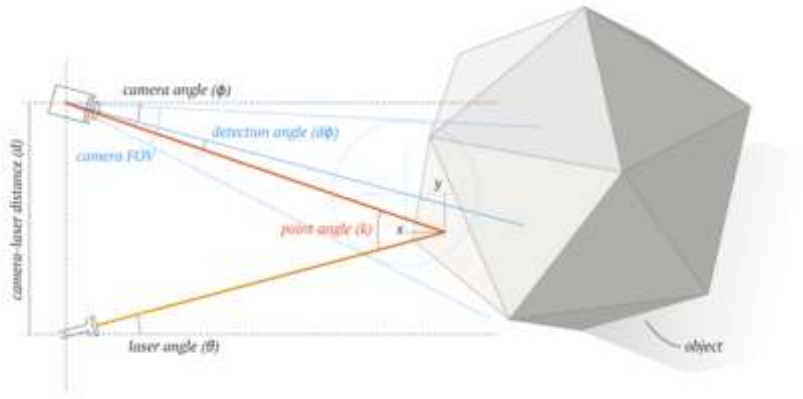

Ilustración 25 – Esquema de funcionamiento de laser escáner de técnica indirecta.

a. Componentes principales

Los escáneres láser de triangulación operan mediante un proceso que en sus etapas iniciales es similar al de los escáneres láser de tiempo de vuelo y otros tipos de escáneres láser, especialmente en lo que respecta a la emisión y desvío del haz láser. Sin embargo, se distinguen significativamente en la fase final del proceso. En esta etapa, se incorporan dos componentes esenciales: un detector o cámara y un procesador de cálculo de triangulación. Estos elementos permiten capturar y analizar el punto de retorno del haz láser con alta precisión, facilitando la reconstrucción detallada de la geometría del objeto escaneado.

El proceso fundamental de emisión del láser y el desvío del haz en los escáneres de triangulación es similar al de otros tipos de escáneres láser. En primer lugar, el emisor de láser emite un haz de luz láser hacia la superficie del objeto, mientras que un desviador del haz se encarga de reflejar el láser, desviándolo en diferentes ángulos según la forma de la superficie del objeto. Este mecanismo de emisión y reflexión constituye la base para la medición de distancias.

El detector o cámara y el procesador son los componentes fundamentales para la captura y procesamiento de datos en estos tipos de escáneres, ya que trabajan conjuntamente para lograr una medición precisa de la distancia al objeto. La cámara proporciona los datos de posición del punto láser, mientras que el procesador utiliza estos datos para calcular la distancia mediante trigonometría. La precisión y la velocidad del escáner láser dependen en gran medida del rendimiento de estos dos componentes.

La cámara o detector es una de las partes más importantes en estos tipos de escáneres láser, actuando como una ventana que revela la distancia a un objeto. La cámara determina la posición del punto láser reflejado en la superficie del objeto que se está escaneando, proporcionando información crucial para el procesamiento posterior.

La cámara desempeña la función de capturar imágenes digitales de la superficie del objeto, la cual es iluminada por el punto láser. Estas imágenes contienen información crucial sobre la distribución espacial y la ubicación del punto en la superficie. Posteriormente, un algoritmo de procesamiento de imágenes analiza las capturas para identificar la posición del punto láser, utilizando técnicas avanzadas, como la detección de bordes, el análisis de color y la segmentación de imágenes, para localizar el punto láser con alta precisión. Finalmente, la posición detectada del punto láser en las imágenes se convierte en coordenadas espaciales (x, y, z) en la superficie del objeto. Esta conversión implica correlacionar los píxeles de la imagen con las dimensiones reales del objeto, teniendo en cuenta la geometría del sistema de escaneo y la calibración de la cámara [19].

La precisión en la localización de puntos láser mediante una cámara está influenciada por varias características clave de la cámara, como la resolución, la velocidad de fotogramas y la sensibilidad a la luz. Una resolución más alta proporciona una mayor definición de la imagen, lo que se traduce en mediciones más precisas de las distancias. Por otro lado, una velocidad de fotogramas más alta es crucial para capturar con precisión los movimientos rápidos del punto láser. Además, una mayor sensibilidad a la luz permite obtener imágenes claras y nítidas incluso en condiciones de iluminación escasa. La elección de la cámara adecuada para un sistema de localización precisa debe tener en cuenta estos factores para garantizar un rendimiento óptimo y una operación robusta.

Estas cámaras pueden variar según aplicación y diseño específicos, pero generalmente son cámaras de alta resolución y alta velocidad de fotogramas que pueden capturar imágenes nítidas del punto láser reflejado en la superficie del objeto que se está escaneando.

- Cámaras CCD: Las cámaras CCD (dispositivo acoplado de carga) se utilizan comúnmente en escáneres láser de alta precisión debido a su alta calidad de imagen y bajo nivel de ruido.
- Cámaras CMOS: Las cámaras CMOS (semiconductor de óxido de metal complementario) son otra opción popular para escáneres láser, ya que son más económicas y ofrecen un mayor consumo de energía.
- Cámaras de línea: Las cámaras de línea capturan una sola línea de píxeles a la vez, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren escaneos rápidos de una línea o borde.
- Cámaras matriciales: Las cámaras matriciales capturan una imagen completa a la vez, lo que las hace más versátiles para aplicaciones que requieren escaneos de áreas amplias.

Ilustración 26 – Cámara CCD.

Ilustración 27 – Cámara CMOS.

Ilustración 28 – Cámara de línea.

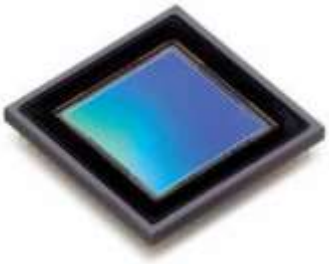

Ilustración 29 – Cámara matriciales.

Continuando con los componentes de estos equipos, se encuentran los procesadores, cuya función principal en un escáner láser de triangulación es calcular la distancia al objeto utilizando trigonometría y los datos de posición del punto láser proporcionados por la cámara. Todo ello considerando la distancia conocida entre el láser y la cámara, y el ángulo entre el haz láser y la línea de visión de la cámara.

En su funcionamiento el procesador recibe los datos de posición del punto láser de la cámara. Estos datos pueden estar en forma de coordenadas (x, y) en la imagen capturada por la cámara o en forma de información sobre el ángulo del haz láser reflejado. Posteriormente se seguirá con el cálculo trigonométrico que, utilizando los datos de posición del punto láser, junto con la distancia conocida entre el láser y la cámara, y el ángulo entre el haz láser y la línea de visión de la cámara, sirve para calcular la distancia al objeto mediante fórmulas trigonométricas. La fórmula específica utilizada depende de la configuración del escáner y la forma del haz láser. El procesador envía la distancia calculada al objeto a un dispositivo externo o la almacena para su uso posterior. La distancia calculada se puede utilizar para generar una nube de puntos 3D, representar visualmente la superficie del objeto o integrarse con otros sistemas de control o medición.

El rendimiento del procesador se ve afectado por tres variables, la precisión, la potencia y la memoria. La precisión determina la confiabiliad de las distancias, de forma que los procesadores más precisos nos darán distancias más confiables, la potencia del procesador es la velocidad con la realiza los cálculos para la obtención de las distancias de los puntos, la velocidad y fluidez en la captura de datos dependerá de esta variable. La memoria, como en cualquier procesador indica la cantidad de datos que puede almacenar y procesar, mayor memoria permite almacenar más datos. A la vez que el rendimiento depende de ciertas variables, este se puede ver afectado por diferentes factores como puede ser el uso eficiente de los algoritmos, una mala optimización del software que controla el láser escáner puede afectar a la eficiencia y rendimiento del dispositivo.

Al igual que con las cámaras existen diversos tipos de procesadores entre los que se pueden encontrar:

- Procesador de propósito general (GPP) de bajo coste, una gran disponibilidad y fáciles de programar.
- Procesadores de Señal Digital (DSP) velocidad de procesamiento en señales digitales muy alta y optimizados para algoritmos complejos.
- Procesadores de Campo Aplicable en Especificaciones (ASIC) óptimos para tareas muy específicas.

- Procesadores de Gráficos (GPU) alta velocidad en procesos de paralelismo, perfectos para cálculos complejos e ideales para algoritmos de triangulación.

b. Triangulación

La trigonometría para el cálculo preciso de la distancia a cada punto reflejado en un escáner láser de triangulación es realmente importante ya que nos determina la distancia. A continuación, se establecen las expresiones matemáticas utilizadas en el proceso de cálculo.

Para un haz láser puntual, la expresión se basa en el principio de triangulación, donde se conocen dos lados y un ángulo de un triángulo para determinar el tercer lado (la distancia al objeto). La tangente del ángulo de reflexión (tan(α)) se utiliza para calcular la pendiente del triángulo, mientras que la resta de 1 del coseno del ángulo de reflexión (1 - cos(α)) toma en cuenta la inclinación del haz láser con respecto a la base. La fórmula más común para calcular la distancia al objeto (D) es:

$$D = \frac{(Base * \tan \alpha)}{(1 - \cos \alpha)}$$

Ecuación 22

Siendo

Base la distancia conocida entre el emisor laser y el sensor óptico.

α el ángulo de reflexión del haz laser en la superficie del objeto.

Para un haz láser lineal, se proyecta el haz reflejado sobre una superficie plana, creando una línea en la imagen capturada por la cámara. Las coordenadas (x, y) del punto reflejado se obtienen a partir de la posición de la línea en la imagen. La distancia al objeto (D) se calcula como la hipotenusa de un triángulo rectángulo formado por las coordenadas x e y, para esto se utilizan las tangentes de los ángulos formados entre el haz reflejado y los ejes horizontal y vertical de la imagen para determinar las coordenadas (x, y) del punto en la superficie. La distancia (D) al objeto se calcula utilizando el teorema de Pitágoras:

$$D = \sqrt{(X^2 * Y^2)}$$

Ecuación 23

Este cálculo se basa en la geometría del triángulo rectángulo formado por el haz láser, la posición del punto reflejado en la imagen y la distancia al objeto.

Para patrones láser específicos, como cuadrados o líneas cruzadas, se pueden aplicar algoritmos de triangulación más complejos que combinan fórmulas trigonométricas y geometría para determinar la distancia en función del patrón utilizado. Estos algoritmos varían según el diseño del patrón y la configuración del escáner. Donde los patrones más usados son los cuadrados y los de líneas cruzadas. En el patrón de cuadrados, el haz láser proyecta una serie de cuadrados sobre la superficie, generando ocho puntos de intersección por cuadrado. Utilizando trigonometría simple, calculamos la distancia a cada punto de intersección, considerando la mitad de la longitud del lado del cuadrado (b) y el ángulo entre la línea del punto de intersección y el centro del cuadrado (θ). Luego,

estimamos la distancia al objeto calculando la distancia media a estos puntos, sumando todas las distancias y dividiendo entre el número total de puntos de intersección.

Para el cálculo de la distancia al punto de intersección utilizando el teorema de tangentes:

$$d = \frac{b * \tan\theta}{1 - \cos\theta}$$

Ecuación 24

Donde:

d es la distancia al punto de intersección.

b es la mitad de la longitud del lado del cuadrado.

θ es el ángulo entre la línea del punto de intersección y el centro del cuadrado.

En cuanto a la estimación de la distancia al objeto calculando la distancia media a los puntos de intersección:

$$D_{media} = \frac{\sum d}{Total\ de\ puntos\ de\ intersección}$$

Ecuación 25

En el caso del patrón de líneas cruzadas, el láser proyecta líneas horizontales y verticales sobre la superficie. Identificamos los puntos de intersección del haz láser con estas líneas y utilizamos trigonometría para calcular la distancia a cada punto de intersección. Usamos el teorema de senos, conociendo la distancia entre el vértice del cuadrado y el centro del cuadrado (a), el ángulo entre la diagonal del cuadrado y la horizontal (α), y el ángulo entre la línea que une el punto de intersección con el vértice y la horizontal (β). Finalmente, estimamos la distancia al objeto calculando la distancia media a estas intersecciones.

En el cálculo de la distancia al punto de intersección utilizando el teorema de senos:

$$d = \frac{(\alpha * \sin\alpha)}{\sin\beta}$$

Ecuación 26

Donde:

d es la distancia al punto de intersección.

a es la distancia entre el vértice del cuadrado y el centro del cuadrado.

α es el ángulo entre la diagonal del cuadrado y la horizontal.

β es el ángulo entre la línea que une el punto de intersección con el vértice y la horizontal.

Para la estimación de la distancia al objeto calculando la distancia media a las intersecciones:

$$D_{media} = \frac{\sum d}{Total\ de\ puntos\ de\ intersección}$$

Ecuación 27

Estas fórmulas son utilizadas para determinar la distancia al objeto en función de las intersecciones detectadas en los patrones de cuadrados y líneas cruzadas proyectados por el láser.

c. Tipos de Luz

En el ámbito del escaneo tridimensional, la elección de la fuente de luz juega un papel importante en la calidad y precisión de los datos obtenidos. Dos opciones comunes son la luz blanca y la luz azul, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Tanto el escaneo 3D con luz blanca como con luz azul, se basan en la proyección de patrones de luz sobre la superficie de un objeto para generar una nube de puntos 3D que representa su forma y dimensiones. Estos patrones son capturados por cámaras y procesados mediante algoritmos avanzados para reconstruir la geometría del objeto. Este suele ser un área de confusión relacionada con la industria del escaneo 3D es la diferencia entre el escaneo con luz blanca y el escaneo con luz azul. Si bien la respuesta corta es que el escaneo con luz azul es la versión más moderna y avanzada de las dos tecnologías.

El escaneo 3D con luz blanca ha ganado relevancia en el ámbito de la metrología como una técnica de medición sin contacto altamente eficaz. Esta tecnología, con más de dos décadas de desarrollo, ofrece una alternativa rápida y precisa a los métodos tradicionales como el escaneo láser y las máquinas de medición de coordenadas (CMM). Su principio de funcionamiento se basa en la proyección de patrones de luz blanca sobre la superficie del objeto a medir. Las cámaras capturan las deformaciones de estos patrones, y algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes, procesan estas imágenes para generar una nube de puntos precisa, representando la forma 3D del objeto. El uso de este tipo de luz en los últimos años ha sido debido a sus características como la rapidez y eficiencia en donde los escaneos con este tipo de luz blanca nos permiten capturar los datos de manera más rápida y eficaz minimizando tiempos de programación y configuración, la alta precisión que nos ofrece, siendo comparable con los métodos tradicionales, pero con un flujo de trabajo más rápido y fluido, la versatilidad que tiene en los materiales y superficies permitiéndonos superficies brillantes, metálicas o con texturas complejas y por ultimo al no tener un contacto con la pieza nos permite realizar capturad de datos en piezas frágiles o delicadas.

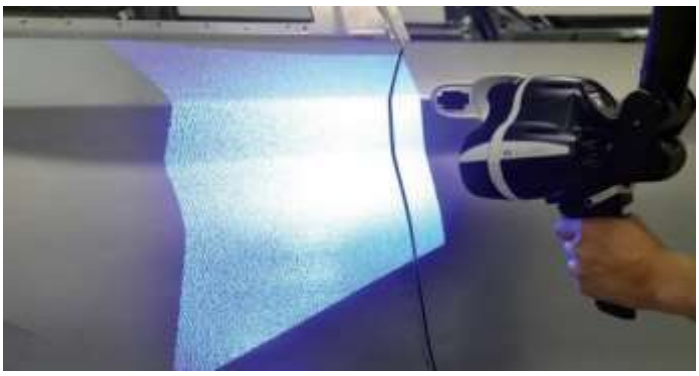

Ilustración 30 – Representación en funcionamiento de luz Blanca.

La similitud entre la luz azul y la luz blanca puede inducir a una confusión originada porque el escaneo con luz azul consiste en una evolución tecnológica del escaneo con luz blanca., La luz azul emplea una longitud de onda específica y estrecha. Esta característica proporciona mayor precisión, exactitud y resultados de mayor calidad, especialmente en objetos brillantes o metálicos. La ventaja más clara de esta luz es la precisión superior ya que el uso de la estrecha longitud de onda de la luz azul reduce la ambigüedad de rango y la interferencia de la luz ambiental, permitiendo mediciones más precisas y confiables. También permite la captura detalles finos con mayor nitidez, generando modelos 3D de mayor calidad y precisión dimensional. Al deberse a un avance tecnológico de la luz blanca nos permite un escaneo más rápido y eficiente, reduciendo el tiempo de adquisición de datos y optimizando los flujos de trabajo[20].

Ilustración 31 – Representación en funcionamiento de luz azul.

Característica	Luz Blanca	Luz Azul
Longitud de onda	Espectro visible completo	Longitud de onda más corta (azul)
Precisión	Menor precisión	Mayor precisión
Exactitud	Menor exactitud	Mayor exactitud
Interferencia ambiental	Más susceptible a la luz ambiental	Menos susceptible a la luz ambiental
Detalles de textura	Captura detalles de textura fina	Captura detalles de textura fina con mayor nitidez
Costo	Menor costo	Mayor costo

Tabla Numero 6- Comparación de características de los dos tipos de luz

Ilustración 32 – Comparativa entre los tipos de luz.

3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Instrumental

El escáner láser seleccionado es el CR-Scan Lizard de la compañía Creality, un dispositivo compacto y asequible, diseñado para facilitar su uso. Este escáner se suministra con un maletín que contiene todos los accesorios necesarios, así como el software asociado. Dentro de este paquete, se encuentran diversos elementos que componen el sistema completo del escáner, proporcionando una solución integral para usuarios en distintos contextos académicos y profesionales.

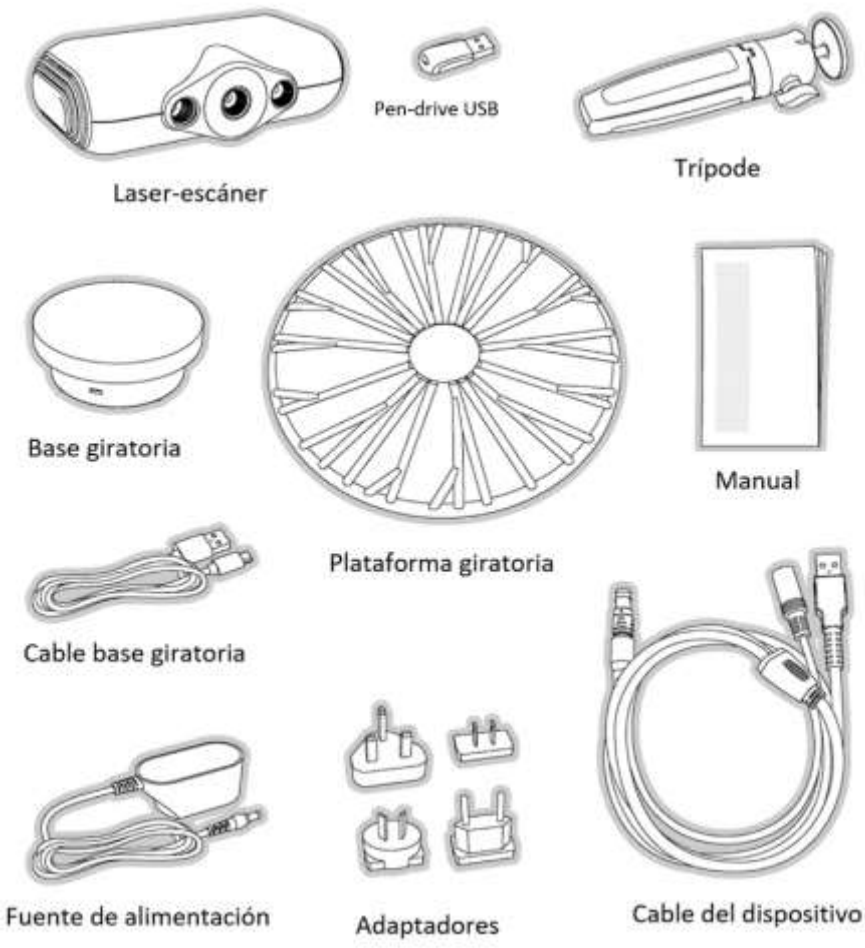

Ilustración 33 – Objetos que se encuentran en el maletín del dispositivo.

En primer lugar, se procederá a la conexión del hardware utilizando el cable del dispositivo para la transferencia de datos, el cual posee extremos diferenciados. El extremo con dos conexiones, una conexión universal serial bus (USB) y una conexión de alimentación, se conectará al ordenador y a la fuente de alimentación respectivamente. El otro extremo, con una sola salida con conector 0B de 5 pines, se conectará al láser-escáner. En cuanto a la base giratoria, esta dispone de su propio cable con una salida USB que se conectará al ordenador o a un adaptador de red para su alimentación, y otra salida micro-USB que se conectará directamente a la base.

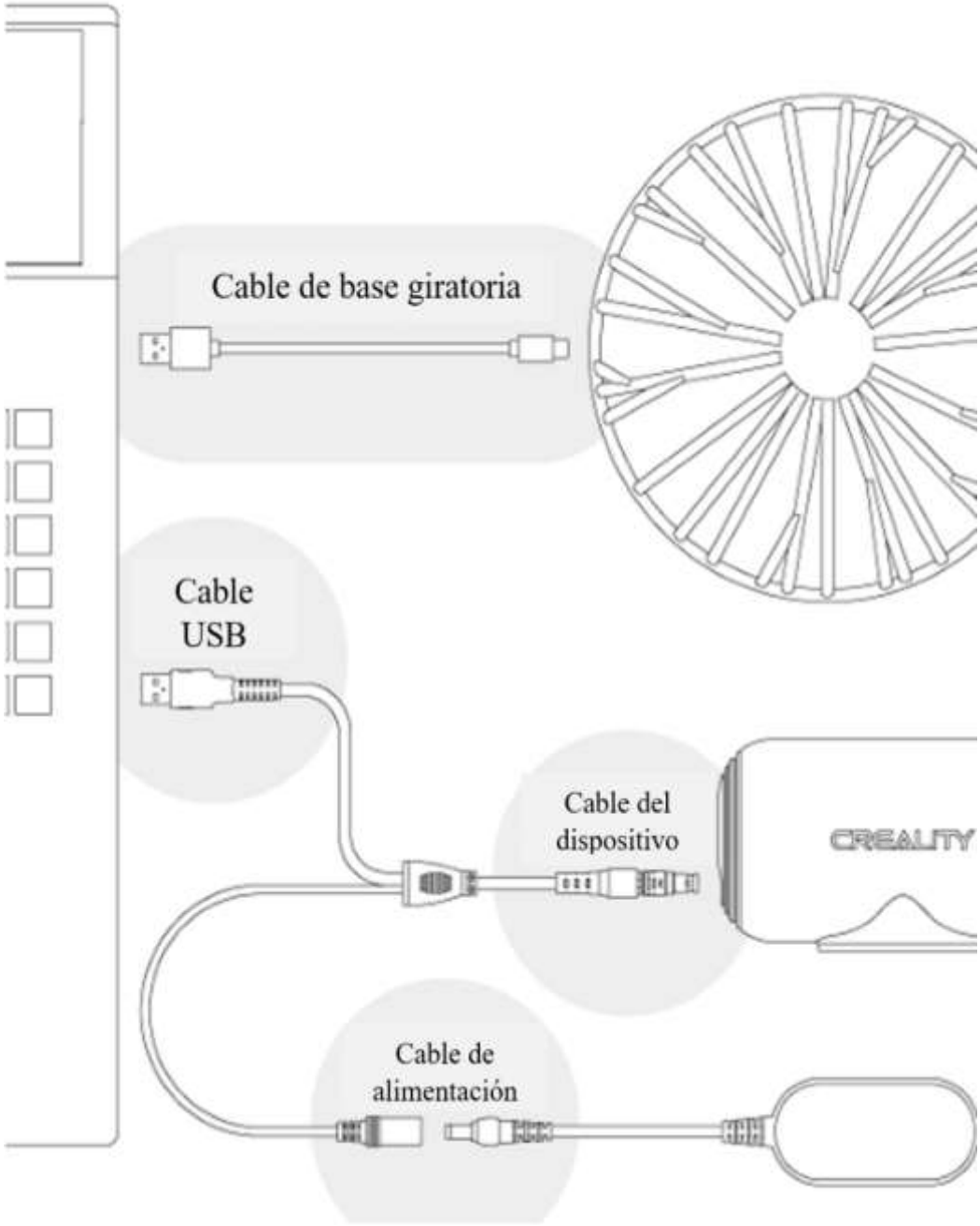

Ilustración 34 – Forma de conectar el dispositivo

El cable con conector 0B de 5 pines que se conecta al dispositivo requiere una alineación específica. Para ello, se debe observar el conector en busca de una marca roja, la cual debe alinearse con la marca correspondiente en el dispositivo. Para desconectar el cable

del dispositivo, es necesario presionar la cabeza del conector y luego deslizar hacia atrás. Manteniendo esta posición, se podrá desconectar el cable adecuadamente y retirar el cable.

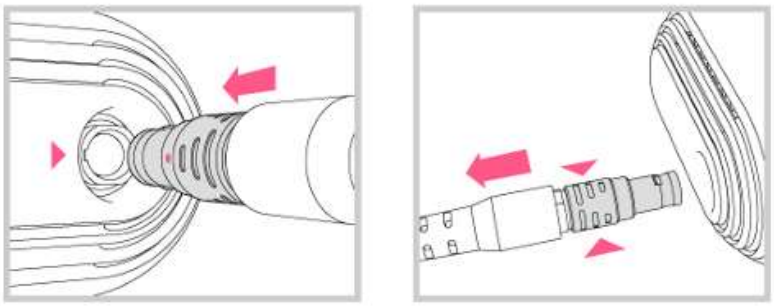

Ilustración 35 – Indicaciones para conectar el cable al dispositivo correctamente.

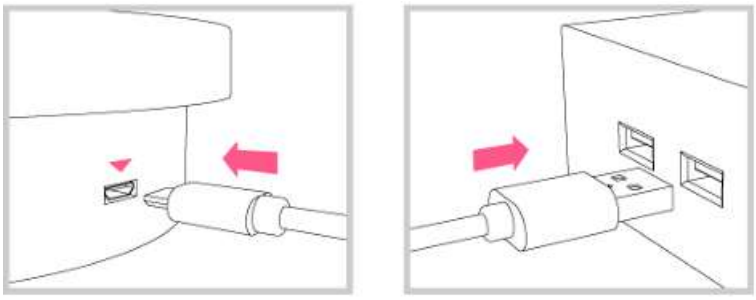

Ilustración 36 – Indicaciones para conectar la base giratoria a la alimentación.

3.3.2 Manejo del instrumental

Con el hardware ya instalado y comprendido su funcionamiento, se procederá a la instalación del software, la cual se puede realizar a través del archivo "CR Studio Setup.exe" incluido en el pen-drive del maletín o descargándolo desde la página web oficial de la compañía. Una vez instalado el programa, se continuará con su uso. El primer paso, una vez iniciado el programa, será seleccionar el modo de escaneo deseado. Se puede elegir entre el modo manual, que permite un escaneo portátil y flexible de objetos de diferentes tamaños, o el modo automático, en el que se utilizará la plataforma giratoria para realizar escaneos totalmente automáticos de objetos entre 15 mm^3 y 300 mm^3.

Ilustración 37 – Pantalla inicial del programa.

a Escaneado automático

En el proceso de escaneo con plataforma giratoria, se ajustará el ángulo de escaneo y la distancia entre la base giratoria y el escáner para asegurar que el objeto sea visible en la vista 3D. Para este dispositivo, la distancia adecuada es entre 300 y 400 mm. Es importante tener en cuenta que el trípode debe extenderse a su máxima altura para optimizar el escaneo.

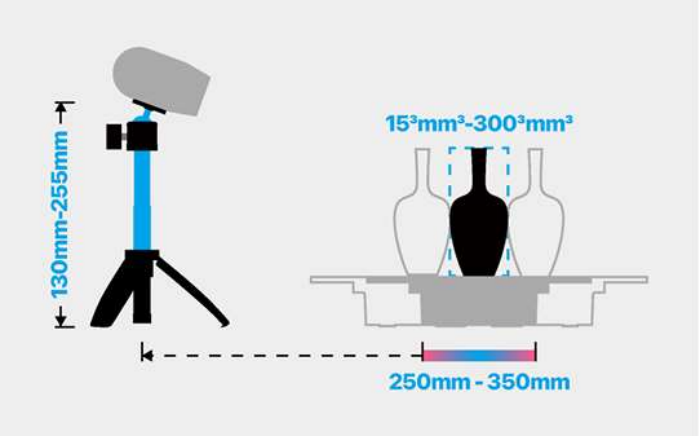

Ilustración 38 – Distancias de colocación para el escaneo.

En la pantalla de trabajo, los usuarios encontrarán una serie de ajustes cruciales que pueden modificar para asegurar un escaneo correcto. Estos ajustes permiten personalizar y optimizar el proceso de captura de datos según las características específicas del objeto y las condiciones del entorno.

Ilustración 39 – Ajustes del escaneo.

En el lado izquierdo de la pantalla se encontrará un elemento que asistirá en el mantenimiento de la distancia correcta durante el escaneo. Este elemento, mediante una onda, indicará si la distancia es apropiada o no, facilitando así la precisión del proceso de escaneo.

Ilustración 40 – Indicativo para la distancia del escaneo.

En la zona de trabajo, en la parte superior derecha, se observará una pequeña pantalla que muestra en tiempo real lo que el láser escáner está capturando. Es fundamental ajustar el objeto lo más centrado posible en esta vista para optimizar la calidad del escaneo. Sin embargo, debido al tamaño del objeto, en algunas ocasiones esto no será factible. En tales casos, será necesario ajustar la posición del objeto para enfocarse en la zona específica que se desee escanear, asegurando así una captura detallada y precisa de las áreas de interés.

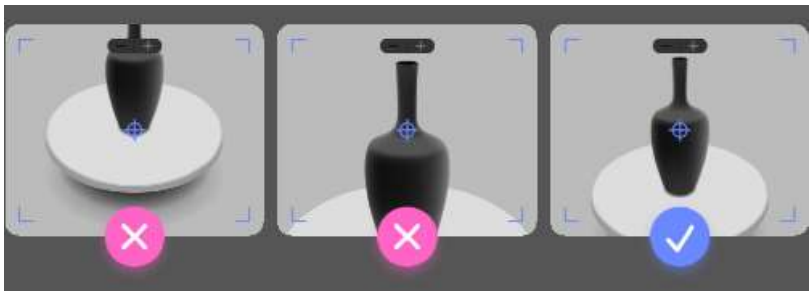

Ilustración 41 – Correcta colocación del objeto.

En el siguiente paso, se debe seleccionar el modo de escaneo adecuado. El modo "Geometría" es ideal para escanear objetos con formas destacadas, mientras que el modo "Textura" es el indicado para capturar las texturas de los objetos con mayor precisión.

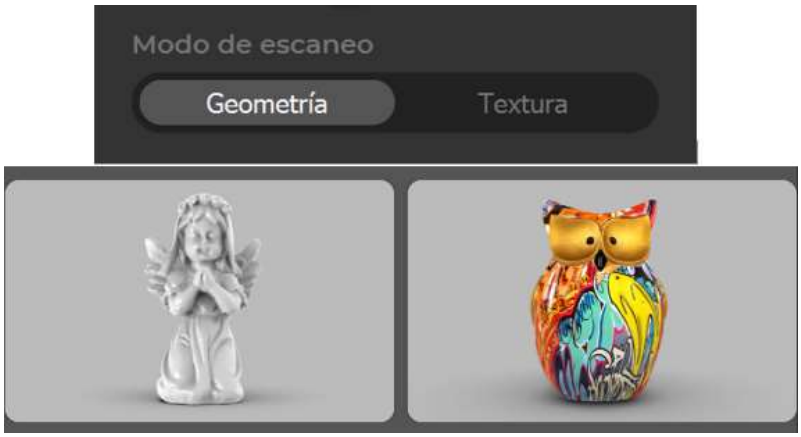

Ilustración 42 – Selección del formato de escaneo y un ejemplo de resultado.

Continuaremos con el control de ajuste de brillo, el cual debe realizarse con más o menos brillo deslizando por la barra hasta encontrar la configuración óptima para la figura que estamos escaneando.

Ilustración 43 – Ajuste de luz e indicación del correcto.

Para garantizar una correcta captura de datos sin contratiempos, es recomendable mantener limpias de objetos las superficies circundantes.

Ilustración 44 – Indicaciones de correcta limpieza de alrededores.

Una vez que el objeto se encuentra a la distancia adecuada y se han realizado todos los ajustes con la configuración óptima para el escaneado, y sin interferencias de objetos circundantes, se procederá con el escaneado.

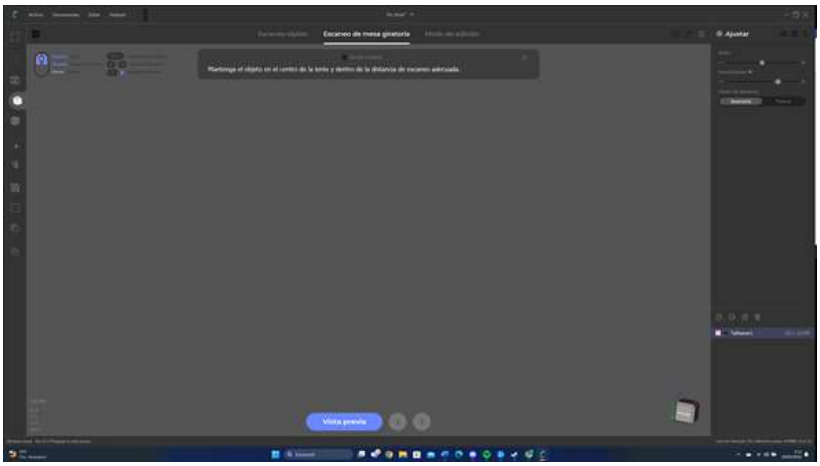

Ilustración 45 – Pantalla de trabajo de la opción “Escaneo de mesa giratoria”.

Inicialmente, se dispondrá de una previsualización del objeto en la pantalla para verificar si algún ajuste no está correctamente configurado y se necesita realizar una corrección de última hora. En esta visualización, también será posible observar cómo se capturarán los puntos, permitiendo realizar los ajustes necesarios para asegurar una óptima calidad en la captura de datos.

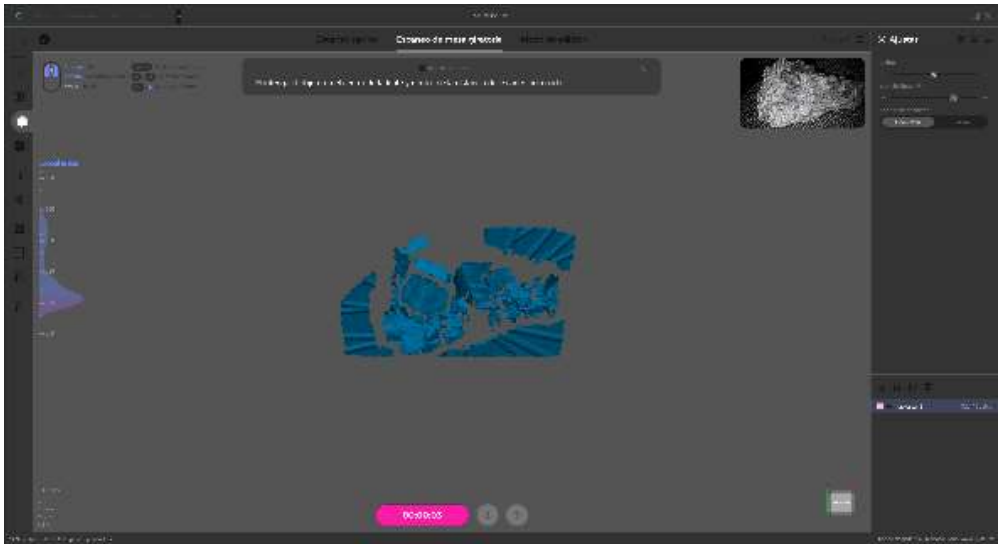

Ilustración 46 – Visión previa para realizar el ajuste

Posteriormente, se removerá el objeto y se realizará un escaneado únicamente de la base. Se considerará exitoso el escaneo de la base cuando esta adquiera un color rojo o rosado, lo cual indica que el proceso ha sido satisfactorio, lo que es un proceso rápido, suele tardar entre 1 y 2 segundos.

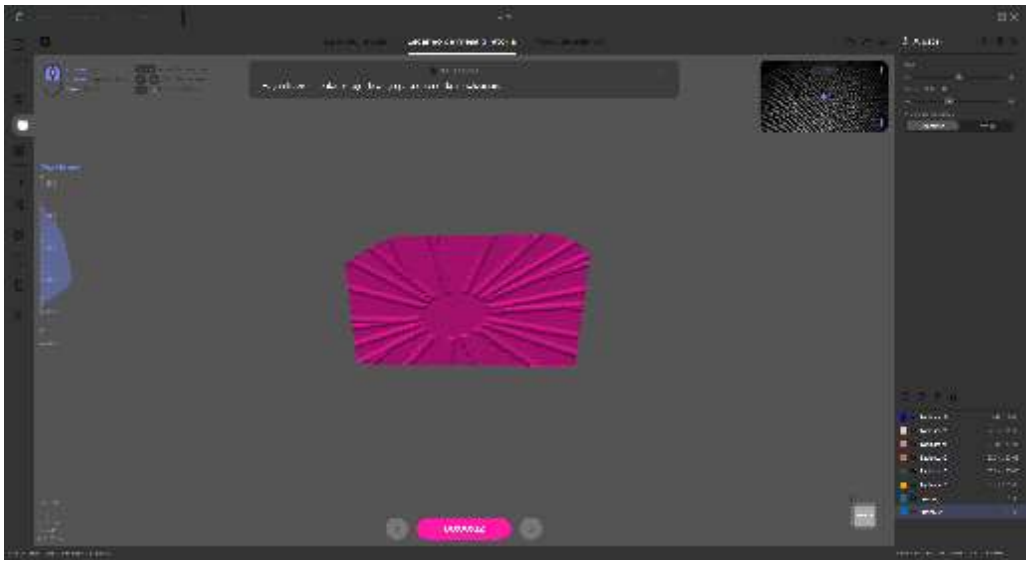

Ilustración 47 – Correcto escaneado de la base.

Una vez se ha completado el escaneo de la base, se procederá a la colocación del objeto a escanear asegurándose que esté correctamente posicionado en el centro de la plataforma, una vez se este seguro de su posición, se iniciará el proceso de escaneado de forma automática al seleccionar la opción "escanear".

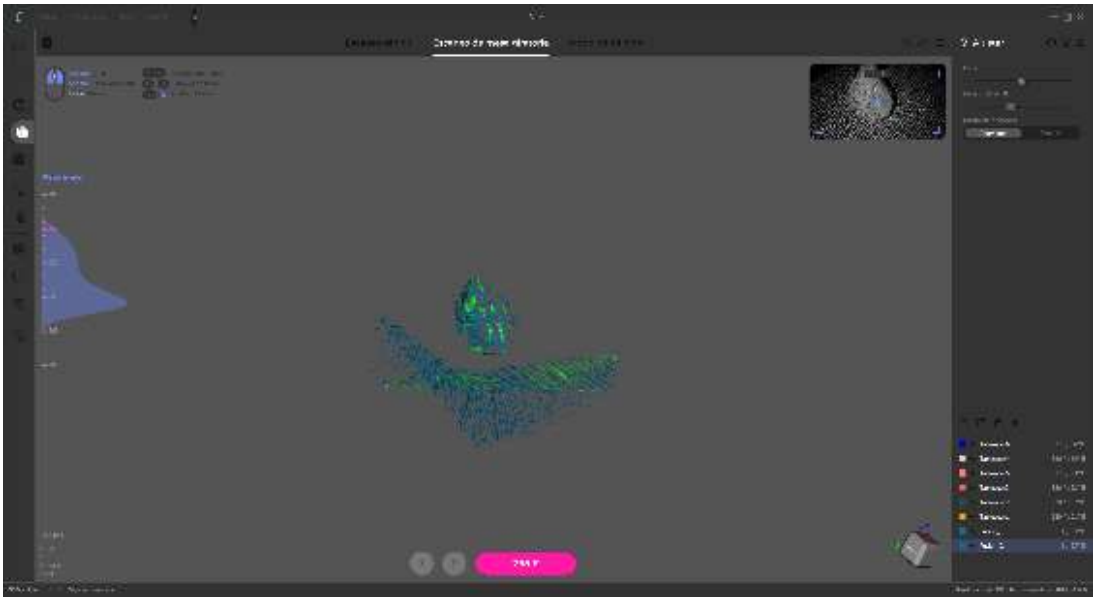

Ilustración 48 – Proceso de escaneado de un objeto.

Una vez finalizado todo el proceso, la plataforma se mostrará de color rojo o rosado de manera automática, indicando la finalización exitosa del escaneado.

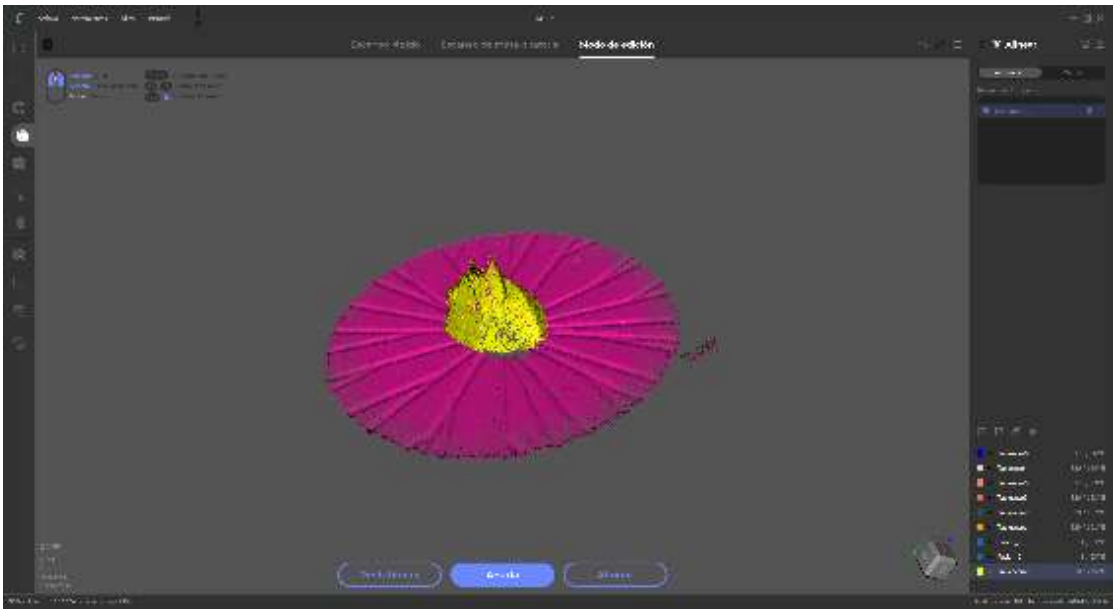

Ilustración 49 – Resultado final del escaneo de un objeto.

Para obtener un resultado óptimo, se puede realizar un escaneo del objeto en diversas posiciones, variando su postura en la plataforma. Al seleccionar la opción "añadir" seguida de "escaneo", se procederá al escaneo automático de la siguiente posición. Este proceso puede repetirse según sea necesario para obtener los escaneos suficientes que permitan la reconstrucción completa del modelo tridimensional de la superficie del objeto.

Después de realizar varios escaneos, los modelos resultantes se mostrarán en el área de trabajo, donde podrán ser seleccionados y visualizados. Luego, se debe seleccionar el botón "alinear" para iniciar el proceso de alineación automática. Una vez completado este procedimiento, se deberá verificar si la alineación ha sido exitosa. En caso de no estar satisfechos con el resultado del alineamiento automático, se puede optar por realizar una alineación manual y comenzar el proceso correspondiente.

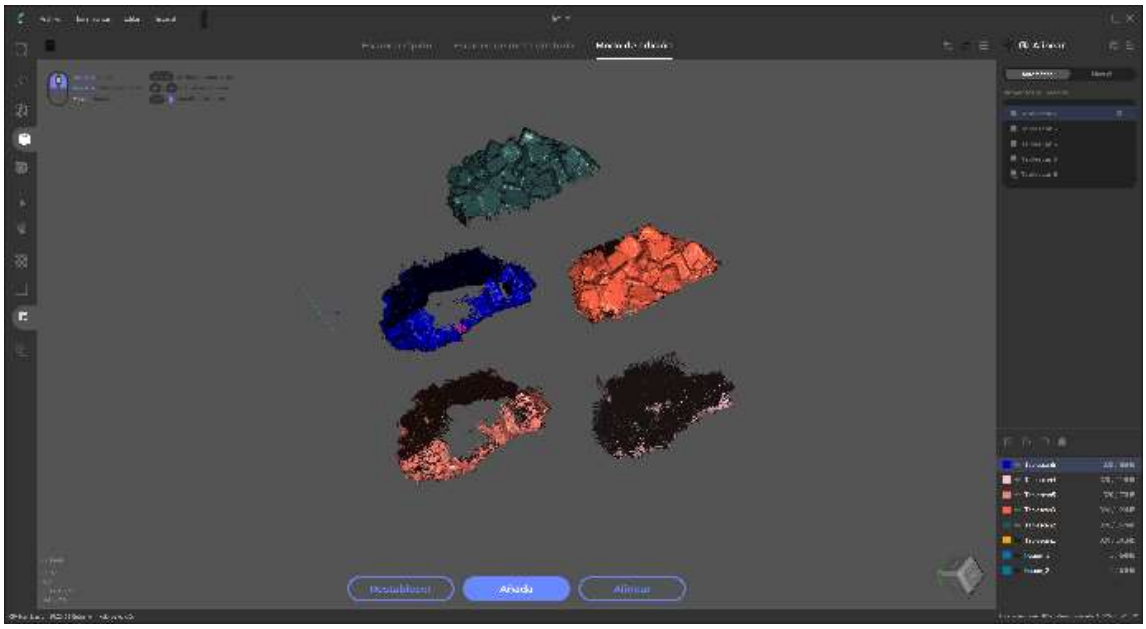

Ilustración 50 – Colocación previa al alineado automático.

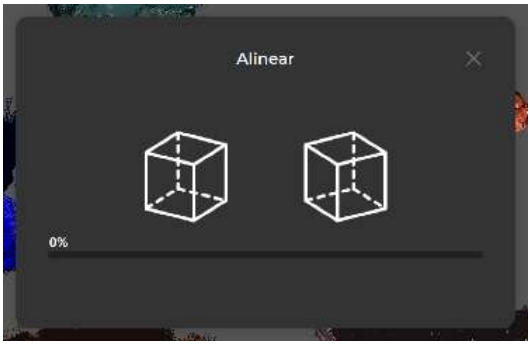

Ilustración 51 – Proceso de alineación automático.

En el proceso de alineación manual, se deben colocar los modelos del objeto en el área de trabajo de manera que estén lo más cercanos y similares posible en posición y forma. Posteriormente, se generarán tres líneas, donde se debe seleccionar con el botón derecho del ratón tres puntos en cada figura. Para asegurar una alineación adecuada, se recomienda seleccionar los mismos puntos en ambas figuras. Una vez colocados los puntos en ambas figuras, se seleccionará la opción "alinear". Al finalizar el proceso, se debe verificar que la alineación ha sido realizada correctamente.

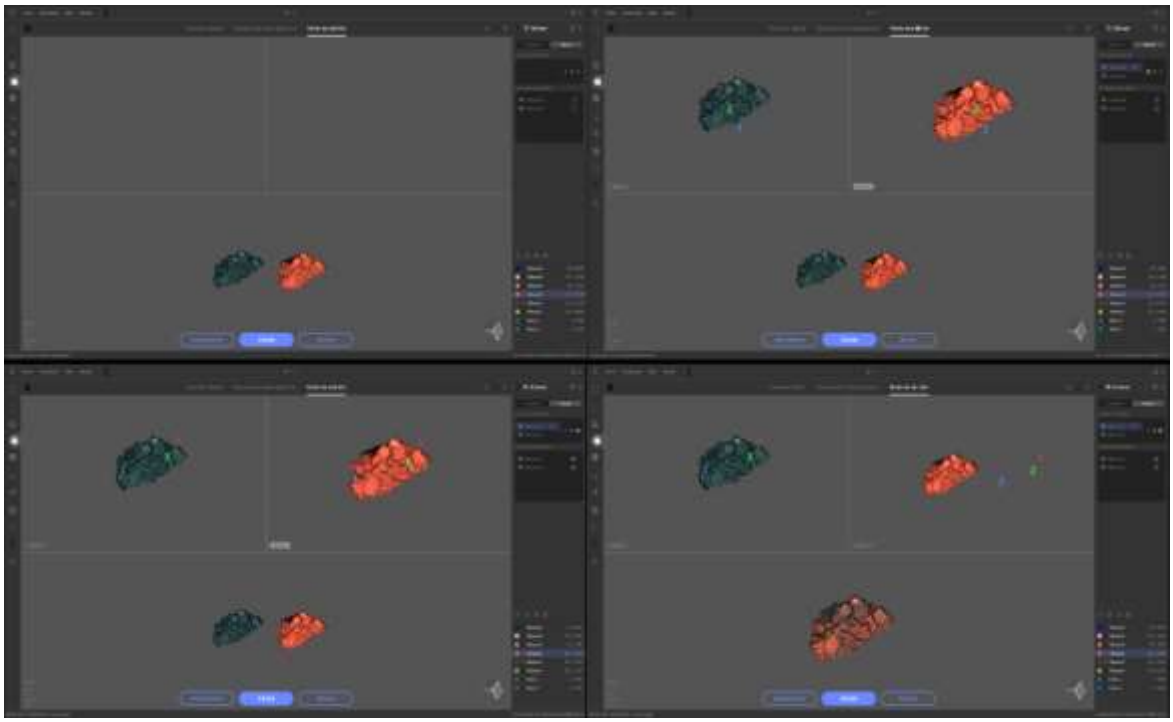

Ilustración 52 – Proceso de alineación manual en 3 puntos.

Una vez se haya alcanzado la alineación deseada, se debe seleccionar la opción "Procesar" para iniciar el procesamiento automático de los datos. Antes de proceder con esta etapa, es posible realizar ajustes en la configuración de procesamiento según sea necesario.

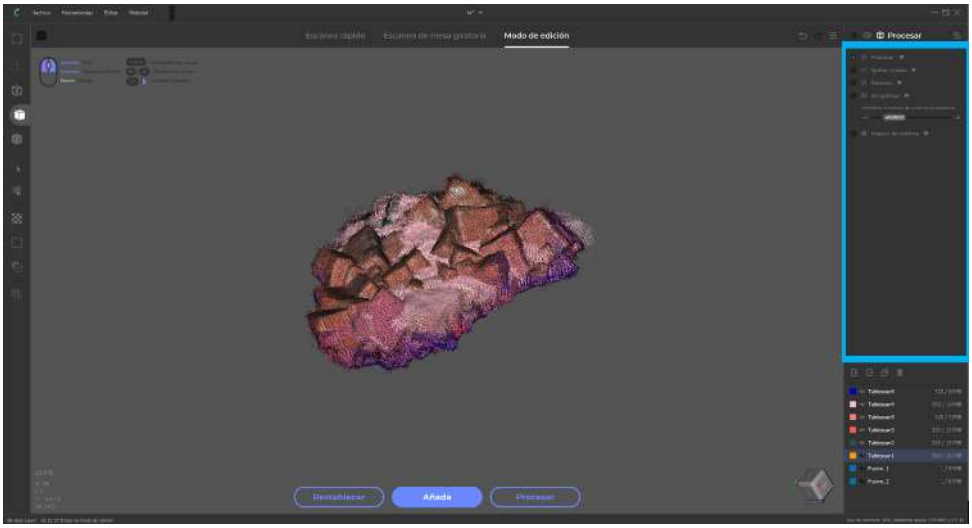

Ilustración 53 – Localización de las funciones de Procesar.

El proceso de "Fusión" implica la integración de datos para la construcción de la nube de puntos en el modelo digital.

El proceso de "Quitar ruidos" se encarga automáticamente de eliminar los ruidos que rodean los datos.

La función de "Reparación" de datos es automática y consiste en rellenar las áreas donde no se ha realizado el escaneo. Es importante no marcar esta opción cuando el objeto solo tiene una superficie disponible o es hueco.

La función de "Simplificar" se encarga de reducir la cantidad de cuadrículas para ajustar su cantidad. Es importante tener en cuenta que, si hay pocas cuadrículas, se perderán detalles. Se recomienda utilizar esta función para objetos que contengan entre 1000 mm y 2 millones de cuadrículas, así como para objetos que tengan entre 300 mm y 800,000 cuadrículas.

La función de "Mapeo de Textura" se encarga de mapear automáticamente la textura de las imágenes capturadas por la cámara dentro del escáner.

Ilustración 54 – Funciones disponibles para el procesado.

Una vez se han realizado todos los ajustes necesarios, se seleccionará la opción "Aplicar" para activar el procesamiento automático tras abrirse una ventana en la que se seleccionarán las nubes de puntos con las que se desea trabajar para realizar el modelo. Al finalizar el proceso, se generará un modelo tridimensional basado en las nubes de puntos.

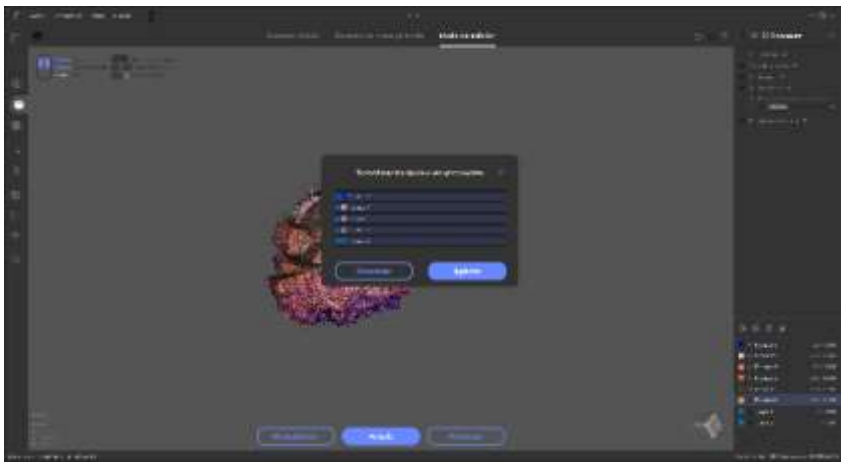

Ilustración 55 – Selección de escaneaos deseados para procesar.

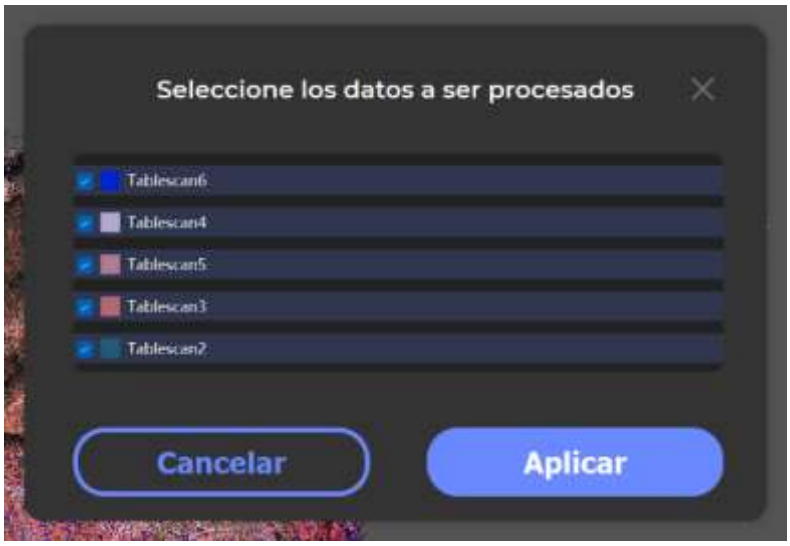

Ilustración 56 –Menú de seleccionado de capas para su procesamiento.

Finalmente, para obtener los archivos en formato OBJ o STL, se debe hacer clic en "Archivo" en el menú y luego seleccionar "Exportar", donde se podrá elegir el formato deseado.

Ilustración 57 – Resumen del proceso del escaneo automático.

b Escaneado Manual

Para iniciar el proceso manual, se debe hacer clic en "vista previa", lo que dará comienzo a una cuenta regresiva de 10 segundos. Durante este intervalo, se pueden ajustar el brillo, la distancia al objeto y el ángulo del escáner según sea necesario. Posteriormente, se iniciará el proceso de escaneo.

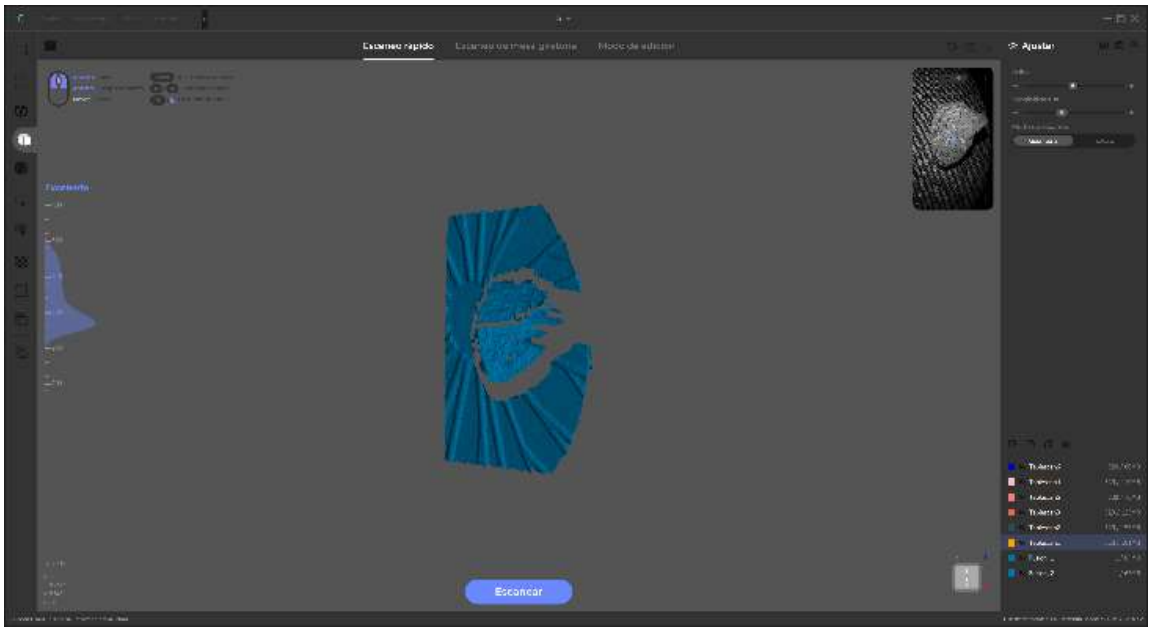

Ilustración 58 – Pantalla de trabajo de escaneo manual.

Durante el tiempo de escaneo, se debe intentar mover el escáner por la mayor superficie del área posible. En caso de perder el seguimiento del área que se está escaneando, es posible recuperarla volviendo a la zona previamente escaneada mediante la función de reubicación global. Este modo también permite escanear el objeto en diferentes posiciones para obtener un resultado completo.

Para eliminar la base en el modo manual, se debe ingresar al modo de edición. Manteniendo presionada la tecla de control y haciendo clic con el botón izquierdo del ratón, se deben seleccionar tres zonas de la plataforma.

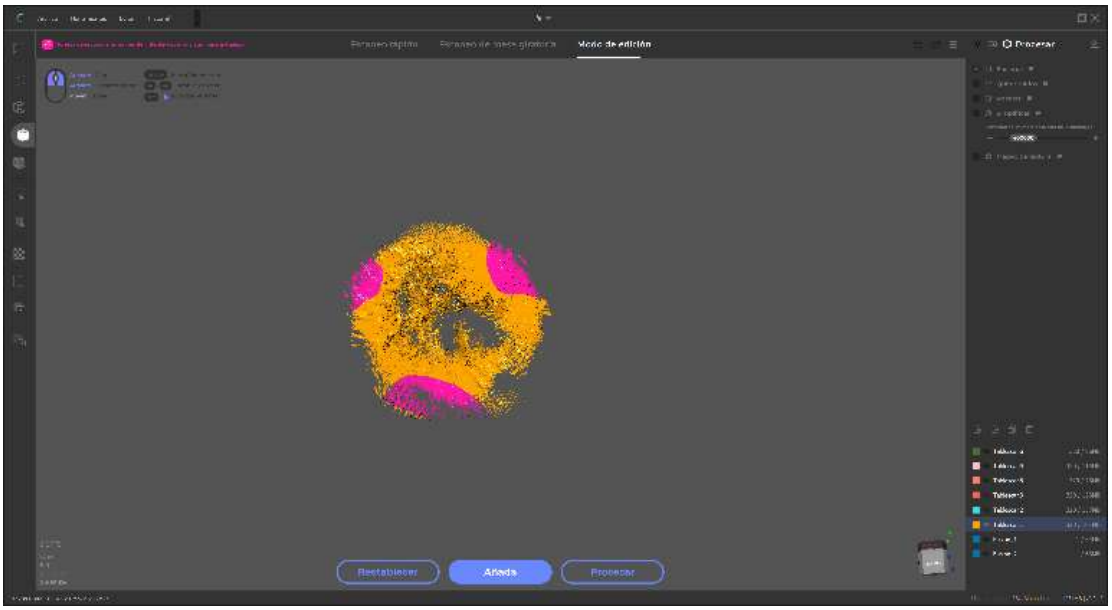

Ilustración 59 – Selección de tres zonas para la eliminación manual de la base.

Luego, al hacer clic con el botón derecho, se seleccionará la opción " selección de plano" o en la función de editar en la barra superior se encuentra la función “selección de plano". La plataforma se volverá roja o rosada y se podrá eliminar.

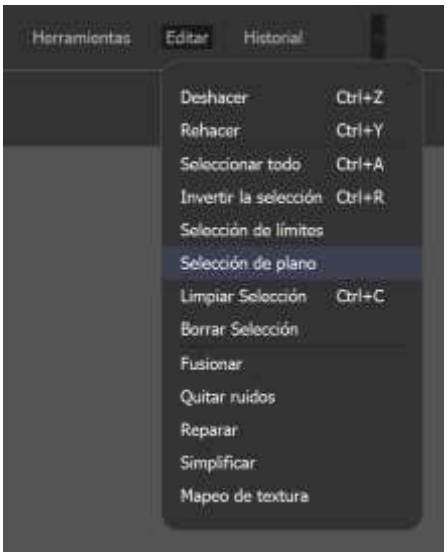

Ilustración 60 – Funciones disponibles en Editar.

Una vez que se han escaneado el objeto en varias posiciones, es necesario alinearlos. Esto se puede lograr utilizando el proceso automático o manual, según la preferencia del usuario. Se debe seguir el procedimiento mencionado anteriormente hasta obtener los resultados deseados.

Una vez concluido este paso, se debe hacer clic en "Procesar", donde se podrá cambiar el nombre del proyecto y guardarlo. Luego, se seleccionará "Aplicar" para activar el procesamiento. Finalmente, siguiendo el mismo procedimiento que en el método de escaneado automático, se accederá a "Archivo", luego a "Exportar" para indicar en qué formato se desea guardar el archivo. Una vez realizado esto, el proceso estará completo.

3.3.3 Función de teclado y ratón

Como es común en la mayoría de los programas, existen una serie de comandos de teclado, ratón o combinados que se pueden utilizar en el software. A continuación, se presentan algunos de ellos.

- Alt + clic derecho - localizar el centro de rotación del modelo.
- Ctrol + Arrastrar- selecciona el área de edición en el modelo.
- Del -eliminar área seleccionada.
- Clic izq.- menú de editar área seleccionada.

Ilustración 61 – Usos de teclado y ratón en los diferentes sistemas operativos.

3.3.4 Posibles errores o dificultades

Al iniciar el programa, se observa que está diseñado para usuarios de todos los niveles, desde novatos hasta expertos. En su introducción, advierte sobre posibles problemas que pueden surgir al escanear ciertas superficies. Estos problemas suelen presentarse con objetos transparentes, objetos deformables y objetos con superficies metálicas, debido a las propiedades reflectivas y refractivas que pueden interferir con la captura de datos.

Ilustración 62 – Ejemplos de diferentes superficies de posibles problemas.

Además de identificar estos problemas, el programa proporciona posibles soluciones para resolverlos. La recomendación consiste en rociar o aplicar polvo revelador, como líquido de base, harina, maicena, etc, sobre la superficie del objeto. Este tratamiento crea una superficie opaca y blanca que es ideal para el escaneado, facilitando así la obtención de datos precisos y minimizando las distorsiones que podrían afectar la calidad del modelo digital.

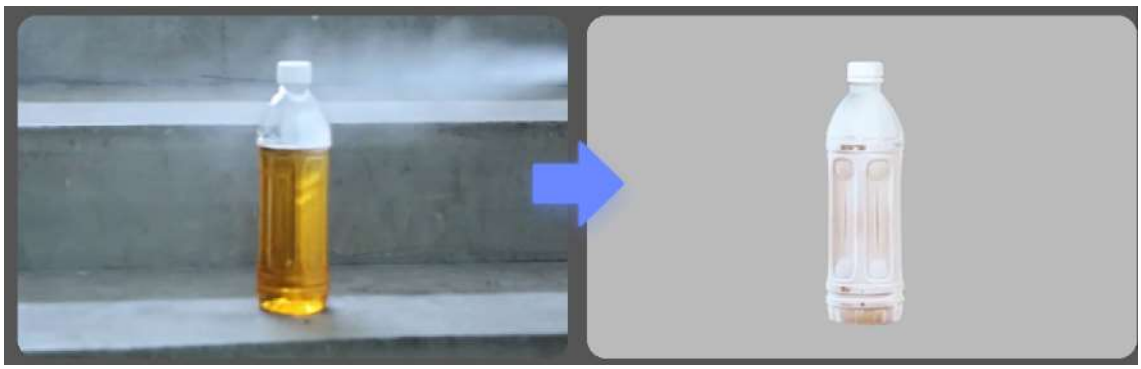

Ilustración 63 – Resultado de la solución una vez aplicada.

4 RESULTADOS

4.1 MODELIZACIÓN

El uso del escaneo láser se ha convertido en una herramienta fundamental para la modelización tridimensional en diversos campos científicos y técnicos. Sin embargo, la eficiencia y precisión del escaneo pueden variar significativamente dependiendo de las propiedades físicas y químicas de los objetos escaneados. En este estudio, se pretende evaluar la rentabilidad y la precisión del escaneo láser en la modelización de minerales con diferentes características.

Para ello, se seleccionaron tres muestras de minerales, cada una con variaciones en tamaño, color, formación, brillo y estructura cristalina. Estas propiedades pueden influir en la calidad del escaneo de diversas maneras. Por ejemplo, el tamaño de los minerales afecta el tiempo y la precisión del escaneo, mientras que el color puede influir en la reflectividad del láser. La formación y complejidad estructural del mineral pueden crear recovecos y puntos difíciles de modelar, y el brillo metálico puede alterar la dirección de retorno del láser. Finalmente, la estructura cristalina puede afectar la refractancia y, por ende, la precisión del escaneo.

El objetivo de este ensayo es analizar cómo estas variables afectan la calidad del escaneo láser y determinar las condiciones óptimas para obtener modelos tridimensionales precisos y eficientes de los minerales. A través de este estudio comparativo, se espera identificar los desafíos y las mejores prácticas para la utilización del escaneo láser en la geología y otras disciplinas afines, para esto, las muestras de minerales escogidas han sido una muestra de pirita, fluorita y blenda o esferita.

Cada una de estas muestras representa un desafío específico para la tecnología de escaneo láser. La pirita, con su superficie metálica y brillo intenso, permite observar cómo el láser escáner maneja la reflectancia y la precisión en capturar aristas bien definidas. La fluorita, con sus cristales brillantes y formas poliedros, presenta una con alto brillo, lo que desafía la capacidad del escáner para captar detalles geométricos complejos. Por último, la blenda, que carece de brillo y formas definidas, ofrece una superficie no metálica y sin reflejos, permitiendo evaluar cómo el escáner se comporta con superficies irregulares y menos estructuradas.

La elección de estas tres muestras proporciona una comparación exhaustiva del comportamiento del láser escáner en diferentes contextos minerales. Evaluar el escaneo de la pirita, la fluorita y la blenda permite obtener conclusiones valiosas sobre la eficiencia, precisión y versatilidad del escáner láser en la digitalización de superficies con características diversas. Esta metodología asegura un conocimiento en distintas aplicaciones geológicas y materiales y asi poder contrastar el comportamiento en ellos.

La pirita, conocida también como "el oro de los tontos" debido a su apariencia dorada y brillante, es un mineral de sulfuro de hierro (FeS_2) que se encuentra comúnmente en una amplia variedad de ambientes geológicos. Su nombre deriva del griego "pyr" que significa "fuego", ya que produce chispas cuando se golpea con metal.

Las características más comunes de la Pirita son la cristalización en el sistema cúbico, formando cristales cúbicos y dodecaédricos. También puede aparecer en formas masivas, estalactíticas y radiales. Su color característico es dorado, con un brillo metálico que

puede parecer similar al oro. Sin embargo, a diferencia del oro, la pirita es más frágil y más ligera. Además de tener un brillo metálico. En la escala de Mohs, tiene una dureza de 6 a 6.5, lo que la hace más dura que la mayoría de los otros minerales metálicos. Con densidad es de aproximadamente 4.9 a 5.2 g/cm³.

La pirita se forma en diversas condiciones geológicas y se encuentra en muchos tipos de depósitos minerales, como:

- Depósitos hidrotermales: Asociados con minerales como galena (PbS), esfalerita (ZnS) y calcopirita ($CuFeS_2$).
- Sedimentarios: En rocas sedimentarias como lutitas y calizas, donde puede formar nódulos.
- Metamórficos: En rocas metamórficas, donde puede formar cristales bien definidos.
- Yacimientos masivos de sulfuro: Encontrados en lugares como los Montes Urales en Rusia, el cinturón de cobre de Zambia, y en diversas localidades en los Estados Unidos y España.

La pirita ha tenido diversos usos a lo largo del tiempo. Históricamente, se utilizó para la producción de ácido sulfúrico debido a su contenido de sulfuro, aunque hoy en día se prefieren otros métodos. En ciertos depósitos, se procesa para extraer oro de inclusiones microscópicas. También se emplea, en menor medida, como fuente de azufre en la industria siderúrgica. Además, es popular entre coleccionistas y en la educación debido a sus cristales bien formados y apariencia llamativa. Finalmente, se ha usado como pigmento en pinturas y materiales de construcción, aunque su susceptibilidad a la oxidación limita su uso en exteriores.

Ilustración 64 – Muestra de pirita empleada desde varias perspectivas.

La fluorita, también conocida como espato flúor, es un mineral compuesto por fluoruro de calcio (CaF2). Es conocido por su amplia gama de colores y su importancia industrial y científica. Su nombre proviene del latín "fluere", que significa "fluir", debido a su capacidad para reducir el punto de fusión de los metales durante el proceso de fundición.

Entre las características más comunes de la fluorita está su cristalización en el sistema cúbico, formando a menudo cristales cúbicos y octaédricos bien definidos. Su color se presenta en una amplia variedad de tonos incluyendo púrpura, verde, amarillo, azul, rosa, incoloro, y más. Su color puede ser uniforme o presentar bandas de diferentes gamas con un brillo vitreo. En la escala de Mohs, tiene una dureza de 4, lo que la hace relativamente suave. Su densidad es de aproximadamente 3.0 a 3.2 g/cm³.

La fluorita se encuentra en una variedad de ambientes geológicos, incluidos:

- Depósitos hidrotermales: Asociada con minerales como cuarzo, calcita, barita y sulfuros metálicos.
- Rocas sedimentarias: En venas y cavidades dentro de calizas y dolomitas.
- Depósitos pegmatíticos y metamórficos: Aunque menos comunes, también se encuentra en estos ambientes.

Los principales yacimientos de fluorita se encuentran en países como China, México, Estados Unidos, Sudáfrica, España y Mongolia.

La fluorita tiene múltiples usos industriales y científicos. En la industria del acero y aluminio, se utiliza como fundente para reducir el punto de fusión y eliminar impurezas. Es la principal fuente de fluoruro para la producción de ácido fluorhídrico, esencial en la fabricación de productos químicos fluorados, como refrigerantes y plásticos. En la fabricación de vidrio y cerámica, mejora la transparencia y resistencia a los ácidos. Las variedades coloridas y transparentes de fluorita se tallan en gemas y objetos decorativos, aunque su baja dureza limita su uso en joyería diaria. En óptica, la fluorita de alta pureza se utiliza en lentes y prismas para microscopios y telescopios debido a su baja dispersión de la luz. Además, su propiedad fluorescente la hace popular entre coleccionistas y en educación mineralógica.

Ilustración 65 – Muestra de fluorita empleada desde varias perspectivas.

La blenda, también conocida como esfalerita, es un mineral del grupo de los sulfuros con una composición química principal de sulfuro de zinc (ZnS). Este mineral es una de las fuentes principales de zinc, un metal esencial para muchas industrias. La blenda se presenta en una amplia gama de colores y formas, y se encuentra en varios tipos de yacimientos minerales alrededor del mundo.

Característica de la Blenda que se puede ver es la cristalización en el sistema cúbico. Sus cristales suelen ser tetraédricos o dodecaédricos, aunque también puede presentarse en formas masivas o granulares. El color varía ampliamente. Puede ser de color amarillo, marrón, negro, rojo, verde y, en raras ocasiones, incolora. La variedad de colores se debe a la presencia de impurezas y a la cantidad de hierro contenido en el mineral. Tiene un brillo de adamantino a resinoso, siendo la variedad negra, que contiene más hierro, generalmente más resinoso. En la escala de Mohs, tiene una dureza de 3.5 a 4, lo que la hace relativamente blanda y susceptible a rayarse fácilmente. La densidad de la esfalerita varía entre 3.9 y 4.1 g/cm^3.

La esfalerita se encuentra en varios tipos de depósitos minerales, incluyendo:

- Depósitos hidrotermales: Comúnmente asociados con otros minerales como galena (PbS), pirita (FeS2) y calcita (CaCO3).
- Depósitos sedimentarios: Como en las calizas dolomíticas.
- Skarns: Formaciones metasomáticas relacionadas con intrusiones ígneas.

Los principales yacimientos de esfalerita se encuentran en países como Estados Unidos (Missouri, Kansas), México (Chihuahua), Perú, Australia, y varios países de Europa como España, Alemania y Suecia.

La principal aplicación de la blenda, o esfalerita, es la producción de zinc, utilizado en galvanización para proteger el acero, en aleaciones como el latón y en químicos como el óxido de zinc para pinturas, cauchos y productos farmacéuticos. La esfalerita transparente se usa ocasionalmente como gema semipreciosa, aunque su baja dureza limita su uso. Además, la blenda se estudia en el ámbito científico y educativo para explicar los procesos de formación de minerales.

Para el presente ensayo, se han seleccionado tres muestras de minerales con características distintivas que permitirán evaluar la eficiencia y precisión del escaneo láser en función de sus propiedades físicas. A continuación, se detalla cada una de las muestras:

La primera muestra es una pirita de tamaño pequeño, conocida por su cristalización cúbica. Esta muestra presenta pequeños recovecos que pueden desafiar la capacidad del escáner para capturar todos los detalles de la superficie. Su brillo metálico, característico de la pirita, podría influir en la reflexión del láser, lo que la convierte en un sujeto interesante para evaluar cómo los materiales altamente reflectantes afectan la calidad del escaneo.

La segunda muestra es una fluorita de tamaño medio. Esta fluorita se distingue por su formación cúbica en cristales de color morado. A pesar de su estructura cristalina regular, la muestra incluye algunas zonas con recovecos, lo que proporciona una superficie ligeramente irregular. Este aspecto permitirá investigar cómo el escáner maneja tanto las áreas lisas como las más complejas y si el color influye en la precisión del escaneo.

La tercera muestra es una blenda de gran tamaño, con una apariencia opaca y una superficie rugosa pero simple. La simplicidad de la superficie de esta muestra, sin recovecos significativos, ofrece un contraste con las otras muestras, permitiendo una evaluación clara de cómo las características de superficie lisa y opaca afectan el proceso de escaneo y la calidad de los datos obtenidos.

Estas tres muestras han sido cuidadosamente seleccionadas para cubrir un rango de características que incluyen tamaño, color, formación cristalina, y textura de superficie. El análisis de estas muestras permitirá una comprensión más profunda de las capacidades y limitaciones del escaneo láser en la modelización de minerales con propiedades diversas.

Ilustración 66 – Muestra de blenda empleada desde varias perspectivas.

4.2 CAPTURA DE NUBES DE PUNTOS

En el escaneo láser de tres muestras de minerales: pirita, fluorita y blenda, se han utilizado tanto métodos automáticos como manuales. Durante el proceso, se encontraron diversos problemas específicos para cada tipo de mineral debido a sus propiedades intrínsecas. El objetivo principal fue evaluar la precisión y los problemas potenciales asociados con el escaneo de diferentes tipos de superficies minerales.

La muestra de pirita presentó problemas durante el escaneo relacionados con su brillo metálico. Es bien sabido que las superficies metálicas pueden generar errores como la reflexión, difusión y multitrayectoria en los sistemas de escaneo láser. En nuestro caso, el problema principal identificado fue la multitrayectoria, lo cual se manifestó a través de distorsiones en los datos obtenidos. Estos problemas surgieron tanto en el modo de escaneo automático como en el manual, lo cual era previsible dado el comportamiento de los materiales metálicos bajo el escaneo láser. La distorsión específica de la multitrayectoria se debió a la desviación del haz láser en múltiples direcciones, creando así errores en la captura de la superficie.

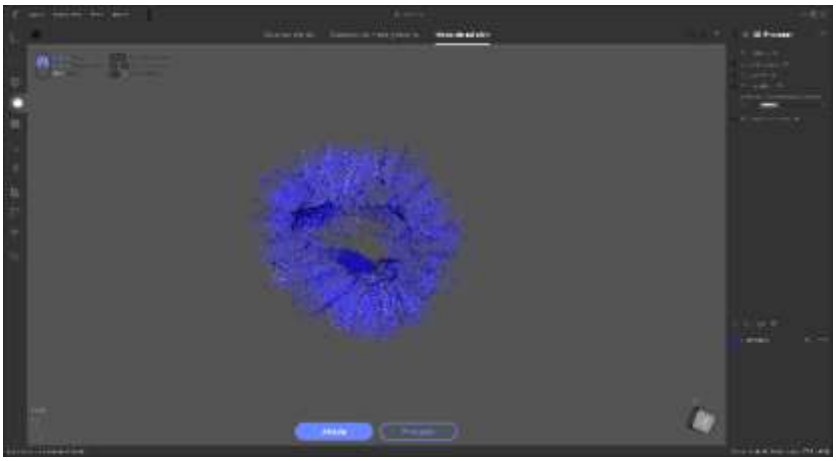

Ilustración 67 – Resultado de la nube de puntos de la pirita por el problema de la reflectancia.

La segunda muestra, la fluorita, también presentó desafíos significativos durante el escaneo. Las superficies cristalinas son conocidas por causar problemas de refracción, dispersión y reflexión interna. En este caso particular, el escaneo láser registró mediciones incorrectas, probablemente debido a la refracción o dispersión interna del láser en los cristales. Aunque el láser logró completar la medición, los datos obtenidos no fueron precisos. Este problema se manifestó en la forma de imágenes distorsionadas o inexactas, lo que subraya la necesidad de ajustar las condiciones de escaneo para manejar mejor este tipo de superficies.

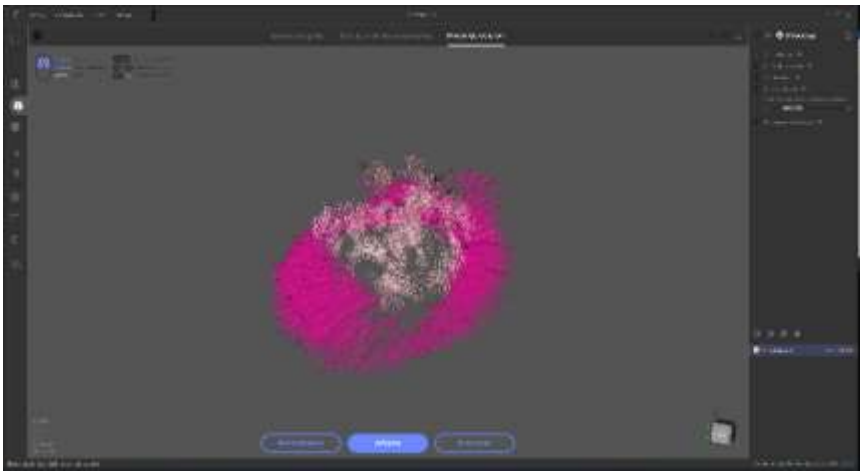

Ilustración 68 – Resultado de la nube de puntos de la fluorita por el problema de la reflexión.

Por otro lado, la muestra de blenda no presentó problemas durante el escaneo. La naturaleza opaca y rugosa de su superficie facilitó la captura de datos precisos, tanto en el modo automático, como en el manual. La ausencia de brillo y la textura simplificada permitieron que el escáner láser operara sin interferencias significativas, demostrando que las superficies opacas son las más adecuadas para este tipo de tecnología.

El software de escaneo láser utilizado no solo identificó los problemas iniciales, sino que también ofreció soluciones para mitigarlos. La recomendación principal fue el uso de un spray especializado que convierte la superficie a escanear en una superficie opaca y blanca, ideal para el escaneo láser. Este tipo de spray está diseñado para eliminar las reflexiones no deseadas y mejorar la captación de datos. Tras investigar diferentes marcas y productos, se encontró que estos sprays varían en sus características: algunos son permanentes, otros se evaporan tras unas horas, y algunos permiten escanear la textura sin alterar el color de la superficie.

En búsqueda de soluciones más económicas, se exploraron alternativas caseras. Se encontró como espolvorear harina y utilizar champú en seco. Este último fue el empleado y resultó ser particularmente efectivo, dejando las muestras en perfecto estado para el escaneo. El champú en seco tiene la ventaja de ser fácilmente accesible y de aplicación sencilla, proporcionando una capa temporal que reduce significativamente las reflexiones indeseadas.

Para la muestra de pirita, se utilizó el champú en seco para mitigar los problemas de reflexión. Esta solución permitió obtener una superficie adecuada para el escaneo, lo que se tradujo en datos más precisos y menos distorsionados.

Ilustración 69 – Resultado de la pirita tras usar la solución de champú en seco

Con la muestra de fluorita, también se aplicó esta solución, lo que ayudó a reducir los efectos de refracción y dispersión. Esta solución mejoró significativamente la calidad de los datos obtenidos.

Ilustración 70 – Resultado de la fluorita tras usar la solución de champú en seco.

En el caso de la blenda, dado que no se presentaron problemas durante el escaneo inicial, no fue necesario aplicar ninguna solución especial. La blenda fue escaneada utilizando tanto la opción de geometría, como la de texturas del software, logrando así una modelización completa y detallada e incluyendo la captura de detalles texturales.

Durante el escaneo, no fue necesario ajustar continuamente el brillo y la sensibilidad del aparato. Un único ajuste antes de comenzar cada escaneo por muestra resultó suficiente, lo que garantizó resultados consistentes y minimizó el tiempo dedicado a la configuración entre capturas.

Estos resultados destacan la importancia de adaptar las técnicas de preparación de superficies para optimizar la precisión y eficiencia del escaneo láser en diferentes tipos de minerales. El uso de métodos accesibles y efectivos como el champú en seco demostró ser una solución viable para superar los desafíos presentados por superficies problemáticas como las de la pirita y la fluorita.

4.2.1 Pirita

a Pirita automática.

En el proceso de escaneo automático de la muestra de pirita, se observó que la simplicidad del procedimiento se debió en gran medida a las características físicas de la muestra. Debido a su tamaño compacto, el escaneo se realizó de manera eficiente, requiriendo únicamente tres capturas desde diferentes posiciones.

El proceso comenzó con un ajuste inicial de los parámetros fundamentales del dispositivo, la distancia entre la base y el escáner, la altura del dispositivo y el ángulo de inclinación. Una vez establecidos estos parámetros, no fue necesario volver a realizar todo el procedimiento desde el principio en cada captura. Este ajuste inicial fue suficiente para mantener la consistencia y precisión del escaneo en las tres posiciones diferentes.

El software de escaneo láser facilitó la alineación de las tres nubes de puntos generadas. La alineación automática demostró ser altamente efectiva, logrando una correcta superposición de las diferentes capturas en un solo intento. Esto eliminó la necesidad de alinear manualmente las nubes de puntos, lo que habría requerido un esfuerzo adicional y una mayor inversión de tiempo. La eficacia de la alineación automática en este caso optimizó el flujo de trabajo en el escaneo de la muestra.

El proceso automático, en el caso de la pirita, permitió una cobertura completa de la superficie, con un número mínimo de capturas, aun teniendo en cuenta su característica forma cubica y recovecos. El resultado fue una adquisición de datos precisa y eficiente, lograda sin la necesidad de repetidos ajustes o recalibraciones del sistema de escaneo.

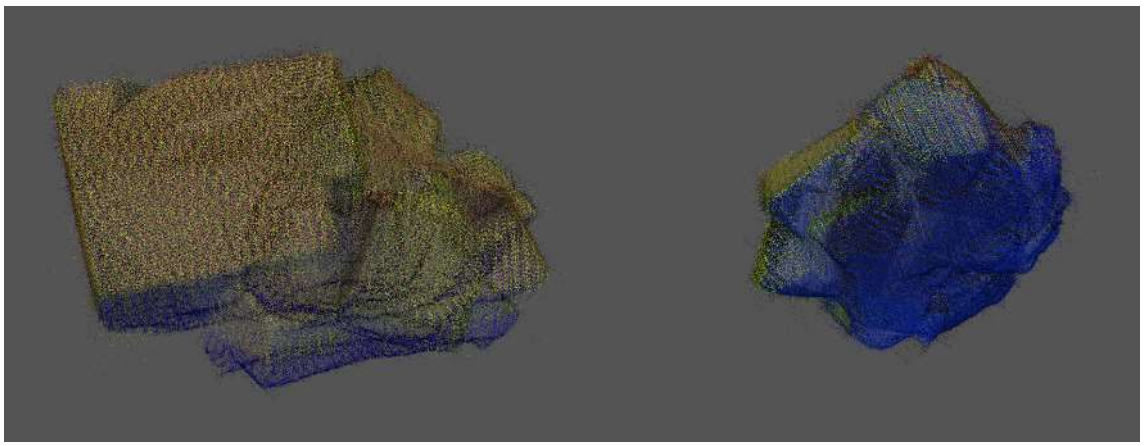

Ilustración 71 – Nube de puntos de la pirita en automático.

b Pirita manual

El escaneo manual de la muestra de pirita resultó ser igual de sencillo que el proceso automático, debido a su tamaño compacto. Este factor permitió completar el escaneo con solo dos capturas desde diferentes posiciones. Al realizar el escaneo manualmente, se sostuvo el escáner en la mano, lo que permitió realizar ajustes instantáneos para mejorar la medición de zonas difíciles y recovecos. Este enfoque manual dio lugar a una nube de puntos más densa y pesada, lo que proporcionó una mayor resolución, precisión y calidad del escaneo.

La capacidad de ajustar el escáner manualmente en tiempo real facilitó la captura detallada de toda la superficie de la pirita, incluyendo áreas que podrían haber sido difíciles de alcanzar con métodos automáticos. La flexibilidad proporcionada por el manejo manual permitió que se adaptara fácilmente la posición del escáner para obtener una cobertura completa de la muestra. Esto fue particularmente útil para escanear las pequeñas cavidades y recovecos que son característicos de la cristalización cúbica de la pirita.

El proceso de alineación de las dos nubes de puntos generadas también se realizó de manera eficiente. La alineación automática del software, en un solo intento, fue capaz de lograr una correcta superposición de las capturas, eliminando la necesidad de ajustes manuales adicionales.

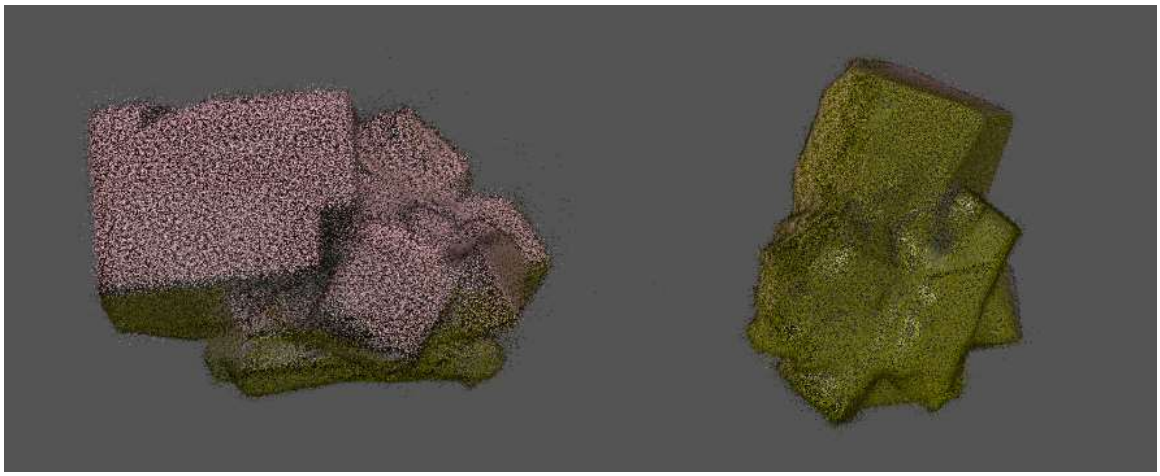

Ilustración 72 – Nube de puntos de la pirita manual.

4.2.2 Fluorita

a Fluorita automática

El escaneo de la muestra de fluorita, de tamaño medio, se realizó mediante cinco capturas de datos distintas, distribuidas en dos posiciones: con los cristales orientados hacia arriba y hacia abajo. Este enfoque, permitió cubrir la totalidad de la superficie de la muestra de manera exhaustiva de forma detallada a pesar de su formación en cristales cúbicos. Específicamente, se realizaron dos escaneos de la parte superior, dos de la zona media y uno de la parte inferior tras invertir la muestra.

Durante el proceso de escaneo, se ajustó la distancia entre la base y el escáner en una sola ocasión. Sin embargo, la altura y el ángulo del escáner requirieron dos ajustes para adaptarse a las diferentes orientaciones de la muestra. Estos ajustes fueron cruciales para capturar con precisión los detalles de la superficie cristalina de la fluorita.

Los cinco escaneos realizados proporcionaron datos suficientes para una medición completa y precisa de toda la superficie de la muestra. La alineación de las nubes de puntos obtenidas se llevó a cabo de manera automática. El software de escaneo demostró su eficacia al completar la alineación en un solo intento, garantizando una correcta superposición de los datos capturados.

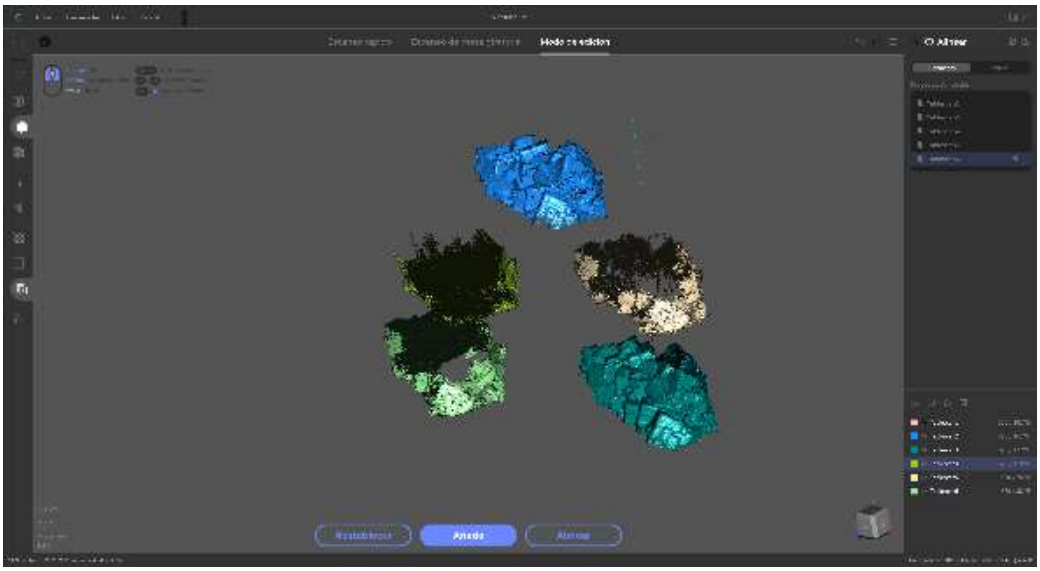

Ilustración 73 – Colocación previa de las nubes antes de la alineación.

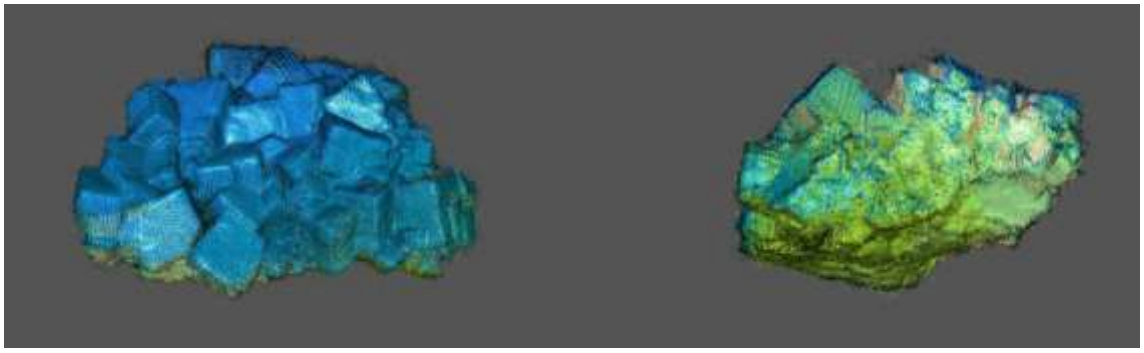

Ilustración 74 – Nubes de puntos de la fluorita automática.

b Fluorita manual

El proceso de escaneo de la muestra de fluorita en método manual, con el dispositivo en la mano durante la captura de datos permitió realizar únicamente dos escaneos, alternando entre dos posiciones distintas de la muestra: una con los cristales orientados hacia arriba y la otra con los cristales hacia abajo. A pesar del reducido número de escaneos, estos proporcionaron datos suficientes para obtener una medición precisa de toda la superficie de la muestra.

La ejecución del escaneo manual garantizó una mayor flexibilidad en la exploración de las distintas áreas de la muestra, lo que contribuyó a capturar con precisión los detalles de la superficie de la fluorita.

Posteriormente, el proceso de alineación de los datos obtenidos se llevó a cabo de manera automática mediante el software de escaneo. La alineación automática logró una correcta superposición de los escaneos en un solo intento. Esta capacidad del software eliminó la necesidad de intervención manual en el proceso de alineación.

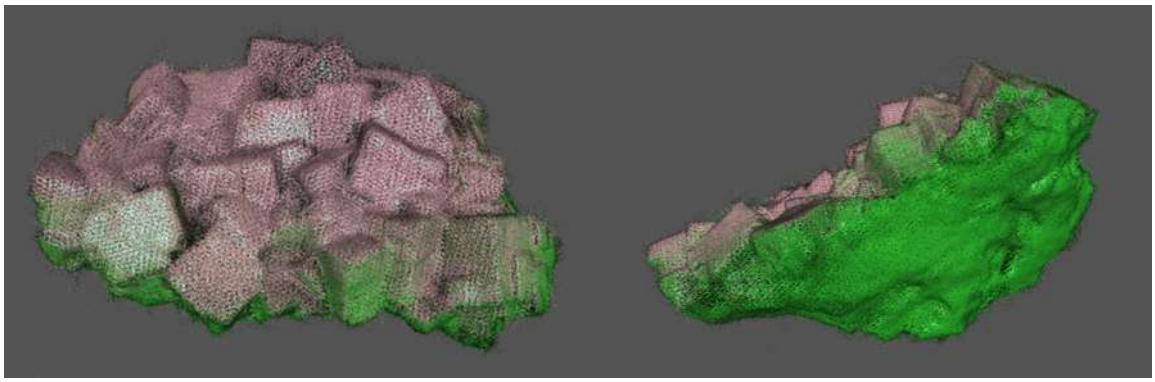

Ilustración 75 – Nubes de puntos de la fluorita manual.

4.2.3 Blenda

a Blenda automática

El escaneo de la muestra de blenda, la más grande entre las tres muestras analizadas, requirió un enfoque meticuloso debido a su considerable tamaño. Se realizaron dos series de capturas, primero en posición "boca arriba" y luego otra, donde se le daba la vuelta completa a la muestra, para asegurar una cobertura completa de su superficie. Para lograr esto, se realizaron un total de ocho capturas de nubes de puntos en distintas áreas de la muestra. En cada captura, se ajustaron la distancia, la altura y el ángulo del escáner con el objetivo de obtener la mayor cantidad de datos posible y garantizar la precisión del escaneo.

Para la alineación de las nubes de puntos obtenidas, se utilizó el método automático. Sin embargo, debido a la complejidad de la muestra, y la necesidad de una alineación precisa, no fue posible alinear todas las nubes de puntos simultáneamente. En su lugar, se llevó a cabo un proceso secuencial de alineación, donde se alinearon dos nubes de puntos a la vez. Esto implicó ocultar todas las nubes de puntos, excepto las dos a alinear, alinearlas entre sí y luego repetir el proceso para cada par de nubes de puntos hasta completar la alineación de todas las capturas.

Si bien la alineación manual podría haber sido una opción viable, se optó por el método automático debido a la naturaleza de la muestra de blenda. Dado que la muestra no presentaba grandes aristas o esquinas distintivas que facilitaran la identificación precisa de puntos de referencia para la alineación manual, y considerando que el proceso manual implicaría seleccionar los mismos puntos en cada escaneo, se determinó que el enfoque automático sería más eficiente en términos de tiempo y precisión para este caso particular.

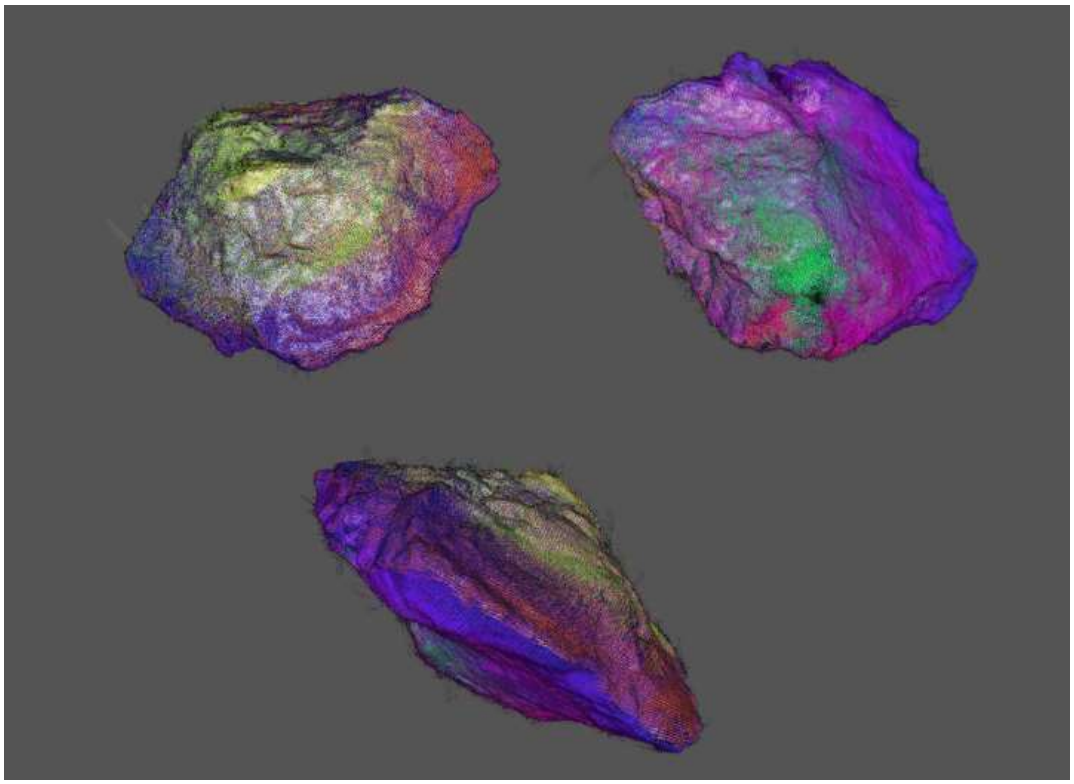

Ilustración 76 – Nubes de puntos del proceso automático alineadas y en diferentes perspectivas

b Blenda manual

A pesar de ser la muestra más grande entre las tres, el proceso de escaneo manual de la blenda resultó notablemente sencillo debido a su superficie relativamente uniforme y sin complicaciones. Con solo dos posiciones diferentes de la muestra y un escaneo por cada posición, se logró obtener datos suficientes para cubrir toda la superficie de la muestra de manera precisa y exhaustiva. La ejecución del escaneo manual con el escáner fue eficiente y sin contratiempos, lo que facilitó considerablemente la obtención de los datos necesarios para el análisis.

Una vez completada la captura de datos, el proceso de alineación automática demostró ser igualmente eficaz. En un solo intento, el software de escaneo logró alinear todas las nubes de puntos generadas durante el escaneo manual, garantizando una correcta superposición de los datos de forma precisa de la muestra de blenda.

Siendo el escaneo manual de la blenda un proceso directo y efectivo, gracias a la simplicidad de su superficie, la combinación de un número reducido de posiciones de escaneo y la alineación automática de los datos.

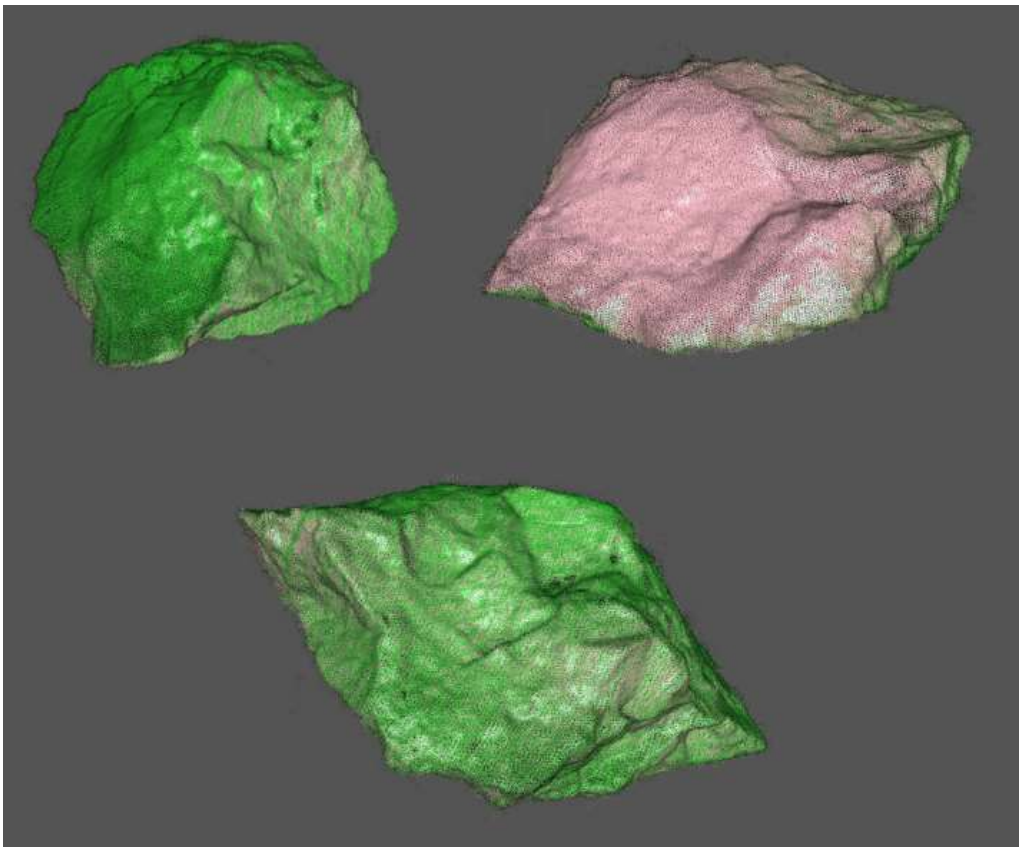

Ilustración 77 – Nubes de puntos del proceso manual en diferentes perspectivas y alineadas.

c Blenda textura manual

En el escaneo de la blenda por textura, se prefirió el método manual, dada la simplicidad de la muestra y su tamaño. Se realizaron únicamente dos escaneos en posiciones diferentes para abarcar toda la superficie de manera eficiente. Durante el proceso, la propia nube de puntos generada proporcionó detalles sobre el color y las texturas presentes en la muestra. La alineación de las capturas se llevó a cabo de forma automática, lo que simplificó el proceso y aseguró la precisión en la reconstrucción tridimensional de la muestra de blenda.

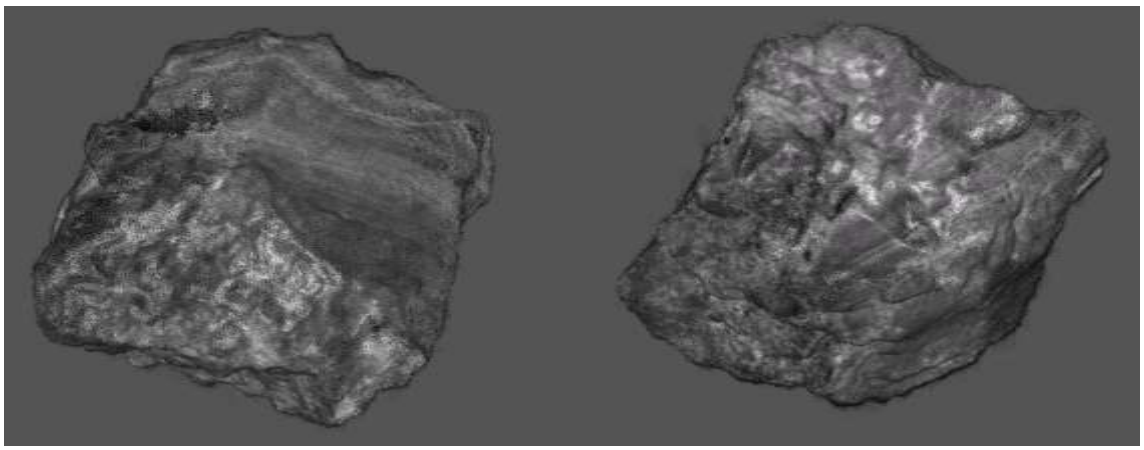

Ilustración 78 – Nubes de puntos de la blenda alineadas y con diferentes perspectivas.

4.3 PROCESAMIENTO DE NUBES DE PUNTOS

La transformación de una nube de puntos sin procesar en un modelo digital 3D visualmente atractivo y funcional implica un proceso integral que abarca técnicas de renderizado y triangulación. Este procedimiento meticuloso convierte los datos de puntos desorganizados en una representación estructurada y utilizable. Exploremos las etapas clave de este proceso:

En la primera fase, el preprocesamiento de los datos de la nube de puntos, se realiza una limpieza y filtrado exhaustivos. Esto incluye la reducción de ruido, eliminando cualquier punto extraño o valor atípico que pueda distorsionar la representación general, y la eliminación de valores atípicos mediante técnicas estadísticas. También se eliminan los puntos duplicados, identificando y reduciendo a un único punto representativo las instancias en las que varios puntos ocupan la misma ubicación. A continuación, se procede a la normalización, donde se alinea el sistema de coordenadas de la nube de puntos con un marco de referencia estándar y se ordena la escala de la nube de puntos a una unidad uniforme, asegurando que todos los puntos se representen de manera consistente y permitiendo mediciones precisas.

En la fase de clasificación y segmentación de la nube de puntos, se agrupan los puntos en función de características compartidas, como el color, la intensidad o el tipo de superficie, permitiendo la identificación de objetos o regiones distintos dentro de la escena. Se emplean algoritmos de agrupación en clústeres, como el clustering k-means o el clustering jerárquico, para agrupar automáticamente los puntos en función de su proximidad o similitud. Se extraen características importantes, como la estimación de la normal y la curvatura de la superficie, así como el análisis de texturas, proporcionando detalles visuales y estructurales al modelo. La estimación de la normal es crucial para los cálculos de sombreado e iluminación, mientras que la curvatura ofrece información sobre la forma y las variaciones del objeto. El análisis de texturas añade una capa adicional de detalle visual, mejorando la fidelidad del modelo final.

En la fase de reconstrucción de la superficie a partir de la nube de puntos, se genera una malla poligonal conectando puntos vecinos, creando una representación de la superficie del objeto o escena. Se emplean algoritmos de triangulación, como la triangulación de Delaunay o la triangulación de Delaunay restringida, para garantizar una malla bien estructurada y precisa. La malla inicial puede someterse a un refinamiento para mejorar su calidad, utilizando técnicas como el intercambio de aristas, la eliminación de vértices o el relleno de agujeros. Además, se utilizan técnicas de reconstrucción de superficies, como métodos basados en cuadrículas, el algoritmo de cubos marchantes y la reconstrucción volumétrica, para obtener una representación precisa de la superficie. Los métodos basados en cuadrículas dividen el espacio en una cuadrícula regular y estiman la altura de la superficie en cada punto de la cuadrícula utilizando técnicas de interpolación. El algoritmo de cubos marchantes recorre iterativamente la nube de puntos, identificando cubos y determinando si cada cubo está dentro, fuera o sobre la superficie, reconstruyendo la superficie en consecuencia. La reconstrucción volumétrica implica reconstruir el objeto como un volumen 3D y extraer la superficie utilizando técnicas como la captación de isosuperficies o los cubos marchantes.

En la fase final de renderizado del modelo digital, se aplican técnicas de sombreado como el sombreado Phong, que calcula el color de cada vértice en función de la posición de la fuente de luz, la normal de la superficie y las propiedades del material, produciendo efectos de sombreado realistas. También se emplea el mapeo de normales, una técnica que utiliza mapas de normales para agregar detalles finos y variaciones a la superficie del modelo, mejorando el realismo sin aumentar significativamente la complejidad geométrica. Este proceso integral asegura que la nube de puntos se convierta en un modelo digital 3D visualmente atractivo y funcional, adecuado para diversas aplicaciones. La renderización final del modelo incluye la aplicación de texturas y materiales que replican las propiedades visuales del objeto original, asegurando una representación fiel y precisa. Además, se pueden incorporar efectos de iluminación avanzados, como el trazado de rayos y la oclusión ambiental, para mejorar aún más la apariencia visual del modelo.

El proceso de convertir una nube de puntos en un modelo digital 3D implica múltiples etapas de preprocesamiento, clasificación, segmentación, reconstrucción de superficies y renderizado, cada una de las cuales contribuye a la creación de un modelo digital detallado y preciso. Estas técnicas no solo garantizan una alta calidad visual, sino que también aseguran que el modelo sea funcional y utilizable en una variedad de aplicaciones, desde la ingeniería y la arquitectura hasta el entretenimiento y la investigación científica.

4.3.1 Pirita

El procesado de la muestra de pirita, tanto en formato manual como automático, se llevó a cabo siguiendo las mismas pautas establecidas. Tras realizar la alineación de las nubes de puntos, se procedió a la eliminación manual de los puntos más visibles relacionados con la base y aquellos que se encontraban dispersos. Este paso aseguraba la limpieza de los datos antes de proceder con el procesado principal.

Una vez realizadas estas acciones preliminares, se utilizó la función de "fusionar" proporcionada por el software, que se encarga de unificar todas las nubes de puntos en una sola representación coherente y realizar la triangulación en una representación más precisa y continua de la muestra.

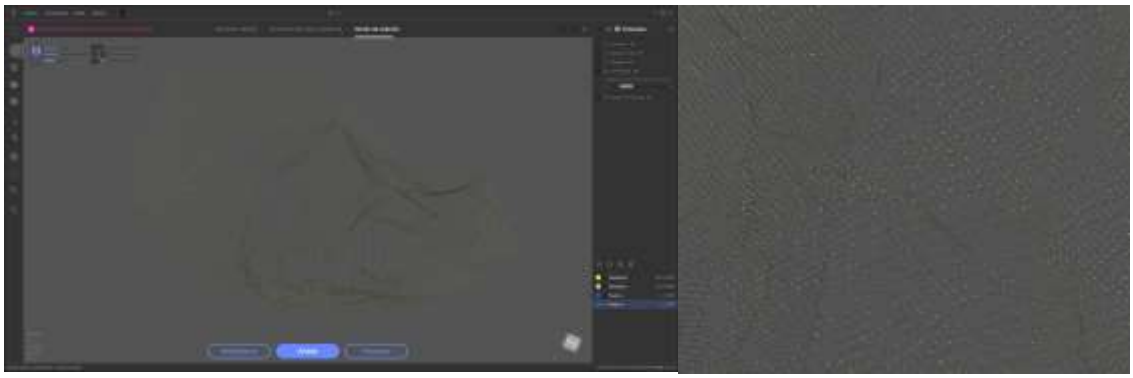

Ilustración 79 – Nube de puntos generada a partir del procesado de los escaneados.

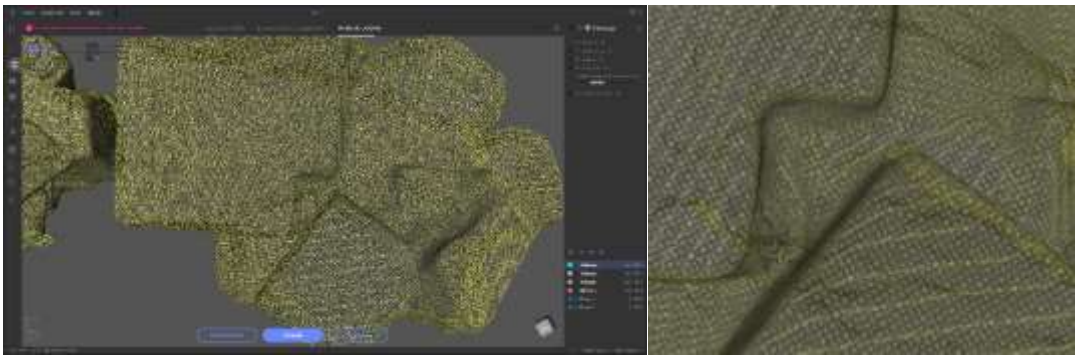

Ilustración 80 – Triangulación generada en la pirita tras su procesado.

Tras completar esta fusión se consiguieron modelos de la muestra con algunas imperfecciones alrededor de los bordes. Estas imperfecciones se encontraban principalmente en áreas periféricas y podían ser corregidas mediante un simple proceso de postprocesado manual, enfocándose en la eliminación de estos defectos.

Para optimizar aún más los resultados, se probó un segundo procesado utilizando las mismas nubes de puntos, pero esta vez se emplearon adicionalmente las funciones de "fusionar", "reparar" y "quitar ruido". Aunque este segundo proceso tardó un poco más, el tiempo adicional fue mínimo casi imperceptible, debido al tamaño reducido de la muestra. Estas funciones avanzadas permitieron rellenar las zonas con pocos puntos y eliminar aquellos que no concordaban con el resto o que estaban dispersos. Como resultado, se obtuvo un modelo perfecto de la muestra de pirita, sin necesidad de postprocesado adicional. Este método evitó la necesidad de trabajar la figura tras su procesado.

El modelo obtenido de la muestra de pirita, tanto en el proceso manual como en el automático, resultó ser idéntico en ambos casos y visualmente fiel a la muestra original. Ambos modelos representan con precisión las formaciones cúbicas características de la pirita, incluyendo grietas, recovecos y las zonas rugosas de la parte inferior. La precisión de estos modelos con la muestra se podría decir que es buena, asegurando una representación detallada y exacta de todas las características morfológicas de la muestra a nivel visual.

a Pirita automática

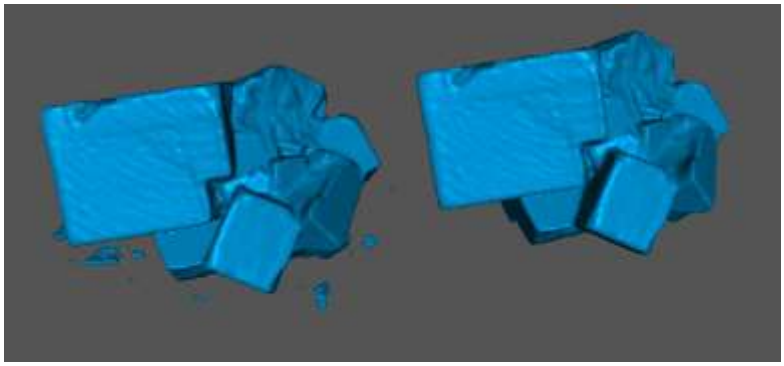

Ilustración 81 – Comparación de modelos digitales con diferentes procesamientos.

b Pirita manual

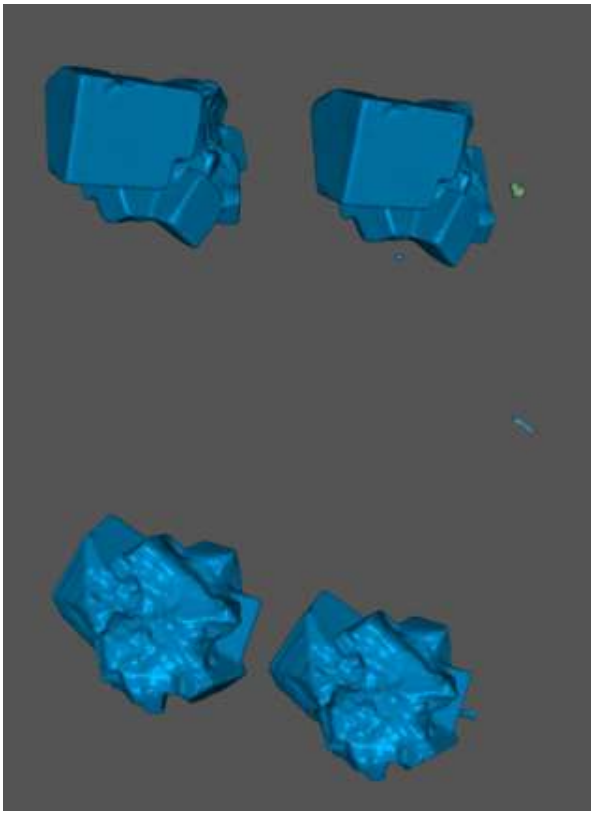

Ilustración 82 – Comparación de ambos modelos digitales manuales con diferente procesamiento.

4.3.2 Fluorita

El procesado de la muestra de fluorita, al igual que el de la pirita, se realizó tanto en formato manual como automático siguiendo las mismas pautas establecidas. Inicialmente, tras realizar la alineación de las nubes de puntos, se procedió a la eliminación manual de los puntos relacionados con la base y aquellos que se encontraban dispersos. Esta fase es crucial para asegurar la integridad y calidad de los datos antes de proceder con el procesado principal.

A continuación, se utilizó la función de "fusionar" proporcionada por el software, la cual se encarga de unificar todas las nubes de puntos y realizar la triangulación. Este proceso permite obtener una representación de la muestra. Al finalizar, se obtuvieron modelos tanto del escaneo automático como del manual. El modelo automático presentaba algunas imperfecciones alrededor de la muestra, principalmente en áreas periféricas pero ninguna imperfección en la superficie de la muestra, mostrándonos en perfecto estado las formaciones cubicas de este mineral. Estas imperfecciones podían ser corregidas mediante un simple proceso de postprocesado enfocado en la eliminación de defectos menores. En contraste, el modelo obtenido mediante el escaneo manual salió perfecto desde el inicio, sin necesidad de postprocesado adicional.

Para mejorar aún más los resultados del escaneo automático, se realizó un segundo procesado utilizando las mismas nubes de puntos y aplicando las funciones de "fusionar", "reparar" y "quitar ruido". Este segundo proceso, aunque un poco más prolongado, permitió obtener un modelo perfecto de la muestra de fluorita, sin necesidad de correcciones adicionales.

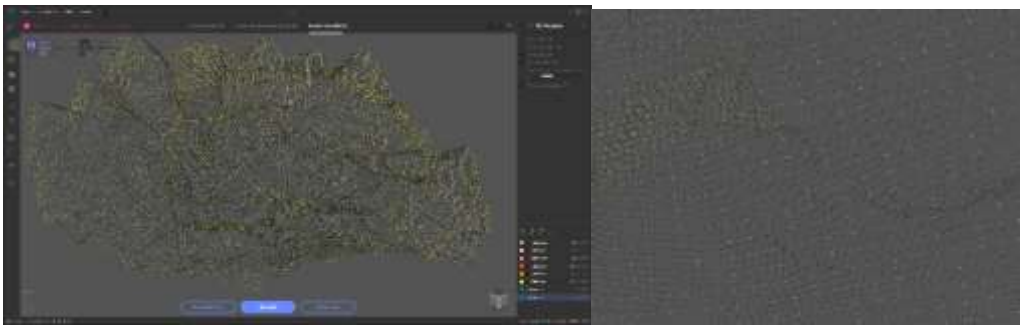

Ilustración 83 – Nube de puntos final tras su procesado.

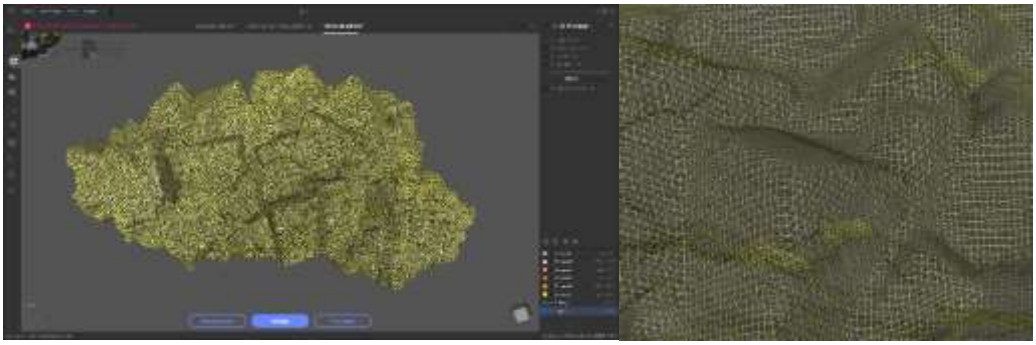

Ilustración 84 – Triangulación de las nubes de puntos tras su procesado.

El modelo final obtenido de la muestra de fluorita tanto en el escaneado manual como automático, tras todos los procesos de limpieza y procesamiento, resultó ser extremadamente fiel a la realidad. Logrando una representación precisa y detallada de todas las características distintivas de la muestra a nivel visual.

En la parte superior se observan claramente todas las formas cúbicas y los recovecos que forman los cristales. La parte posterior de la pieza también se representa con notable exactitud, capturando todas las variaciones de la superficie. Incluso una pequeña cavidad o deformación en la superficie se reproduce con gran fidelidad, demostrando la capacidad para reflejar fielmente la estructura física de la muestra.

a Fluorita automática

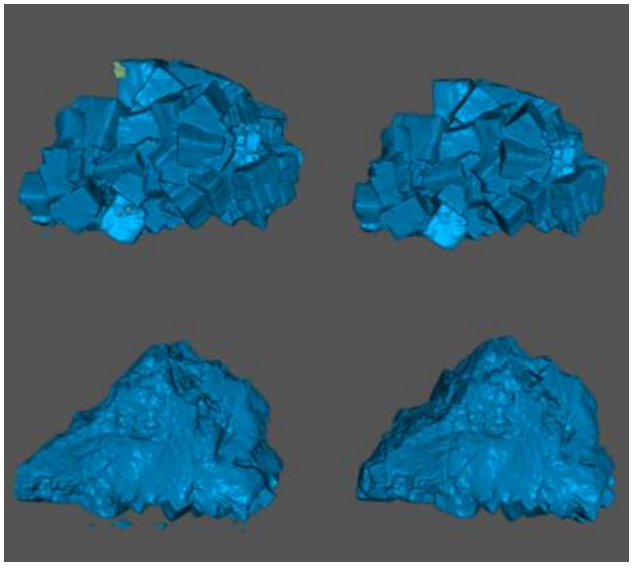

Ilustración 85 – Comparación de ambos procesos en la generación de modelos digitales en automático de la fluorita.

b Fluorita manual

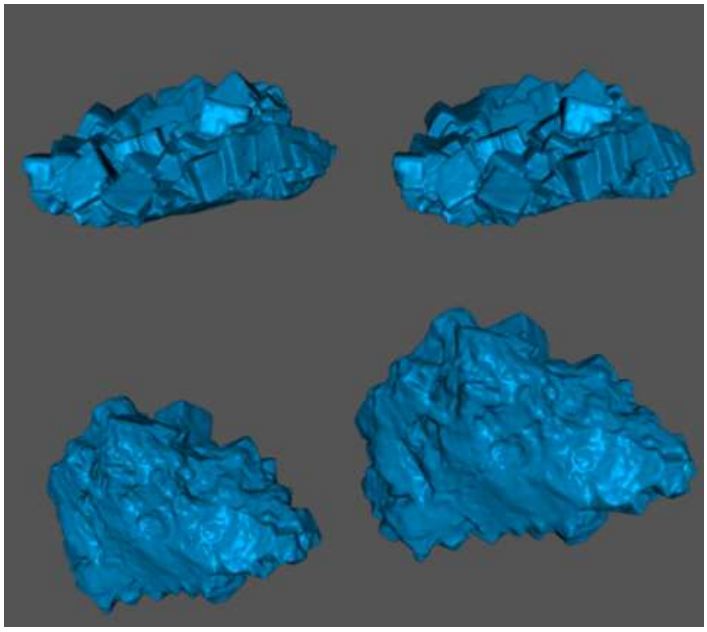

Ilustración 86 – Comparación de ambos procesos de generación de modelos digitales en manual de la fluorita.

4.3.3 Blenda

El procesado de la muestra de blenda, al igual que las anteriores muestras, se realizó tanto en formato manual como automático siguiendo las mismas pautas establecidas. Inicialmente, se llevó a cabo la alineación de las nubes de puntos. En el caso del proceso manual, la alineación fue inmediata, mientras que en el proceso automático, aunque se logró con éxito, requirió un poco más de trabajo debido a la cantidad de escaneos involucrados. Tras la alineación, se procedió a la eliminación manual de los puntos relacionados con la base y aquellos que se encontraban dispersos. Esta fase es crucial para asegurar la integridad y calidad de los datos antes de proceder con el procesado principal.

A continuación, se utilizó la función de "fusionar" proporcionada por el software, que unifica todas las nubes de puntos y realiza la triangulación. Este proceso permite obtener una representación coherente de la muestra. Al finalizar, se obtuvieron modelos tanto del escaneo automático como del manual. El modelo automático presentaba algunas imperfecciones alrededor de la muestra, especialmente en áreas periféricas, aunque lograba representar fielmente la superficie de este mineral. Estas imperfecciones podían ser corregidas mediante un simple proceso de postprocesado enfocado en la eliminación de defectos menores. En contraste, el modelo obtenido mediante el escaneo manual salió perfecto desde el inicio, sin necesidad de postprocesado adicional.

Para mejorar aún más los resultados del escaneo automático, se realizó un segundo procesado utilizando las mismas nubes de puntos y aplicando las funciones de "fusionar", "reparar" y "quitar ruido". Este segundo proceso, aunque un poco más prolongado, permitió obtener un modelo perfecto de la muestra de blenda, sin necesidad de correcciones adicionales.

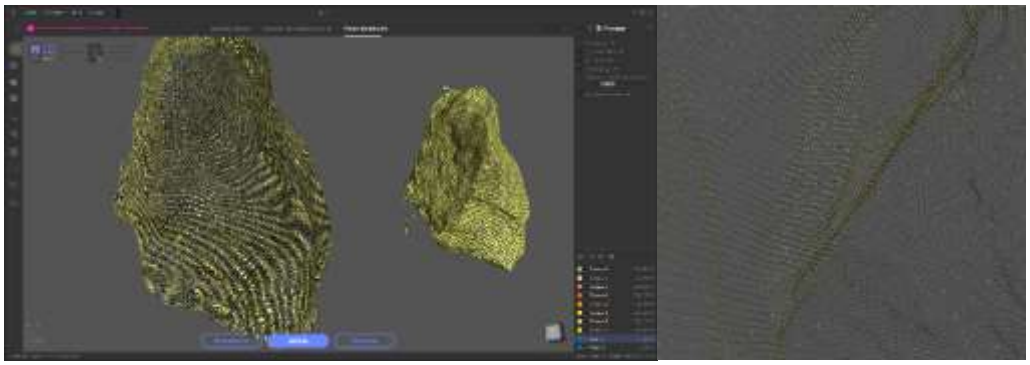

Ilustración 87 – Nubes de puntos de ambos procesos tras su procesado.

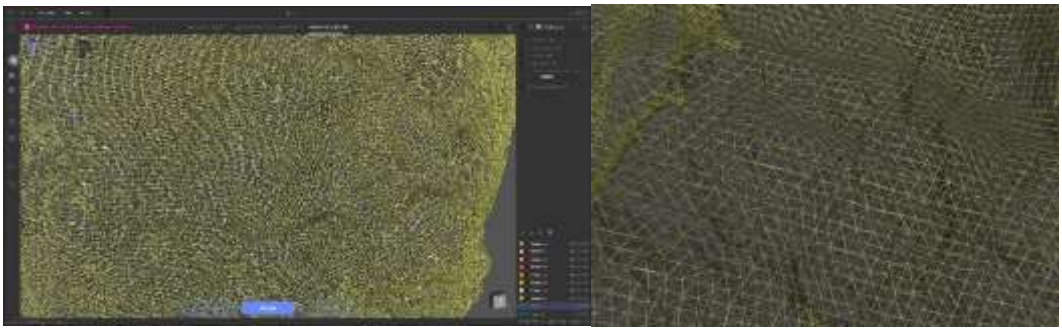

Ilustración 88 – Triangulación de las nubes de puntos tras su procesado por el software.

El modelo final obtenido de la muestra de blenda, tanto en el escaneado manual como en el automático, tras todos los procesos de limpieza y procesamiento, resultó ser extremadamente fiel a la realidad. Logró una representación precisa y detallada de todas las características distintivas de la muestra a nivel visual. Se observan claramente todas las partes de la superficie, tanto las lisas como las irregulares, y los recovecos presentes en ella, capturando todas las variaciones de la superficie. Incluso una pequeña cavidad o deformación en la superficie se reproduce con gran fidelidad.

a Blenda automática

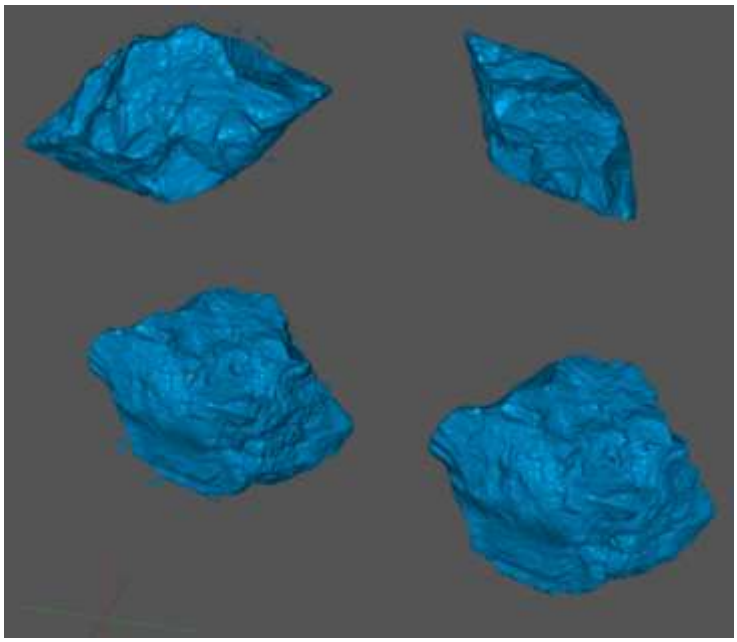

Ilustración 89 – Comparación de los modelos digitales en proceso automático de la blenda.

b Blenda manual

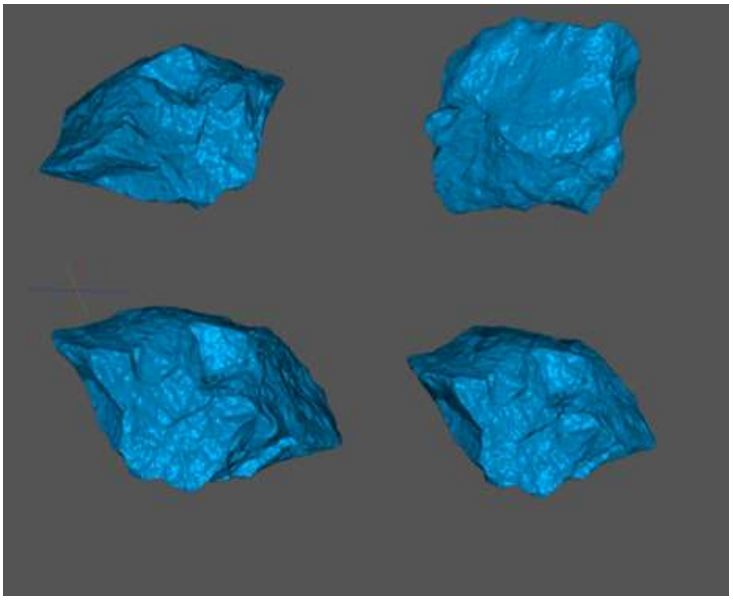

Ilustración 90 – Comparación de los modelos digitales en proceso manual de la blenda.

c Blenda manual textura

En el procesamiento de la muestra de blenda, que fue la última de las tres, se siguieron las mismas pautas establecidas en los procedimientos anteriores, tanto en el escaneo automático como en el manual. Inicialmente, se realizó una limpieza manual de la pieza para eliminar puntos relacionados con la base y puntos dispersos que se observaban fuera de la muestra en cada nube de puntos.

El primer procesamiento se llevó a cabo utilizando la función de "fusionar". En el escaneo automático, esto generó superficies fuera del modelo de la muestra, similares a los casos anteriores, debido a una limpieza insuficiente de puntos, lo que requirió un postprocesado adicional. En contraste, el escaneo manual no presentó estos problemas, resultando en un modelo correcto desde el inicio.

Se procedió con un segundo procesamiento utilizando las funciones de "fusionar", "reparar" y "quitar ruido", lo que proporcionó un modelo limpio y preciso sin necesidad de postprocesado adicional, reduciendo así el trabajo posterior al procesamiento. Los modelos obtenidos representan la forma geométrica de la blenda con exactitud, incluyendo sus caras planas de rotura y las zonas más rugosas, además de capturar con precisión algunos recovecos presentes en la superficie.

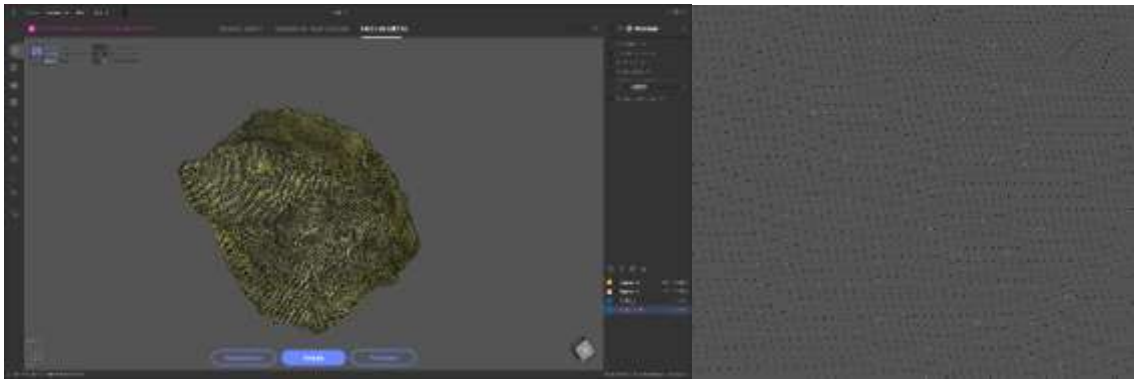

Ilustración 91 – Nube de puntos final procesada por el software.

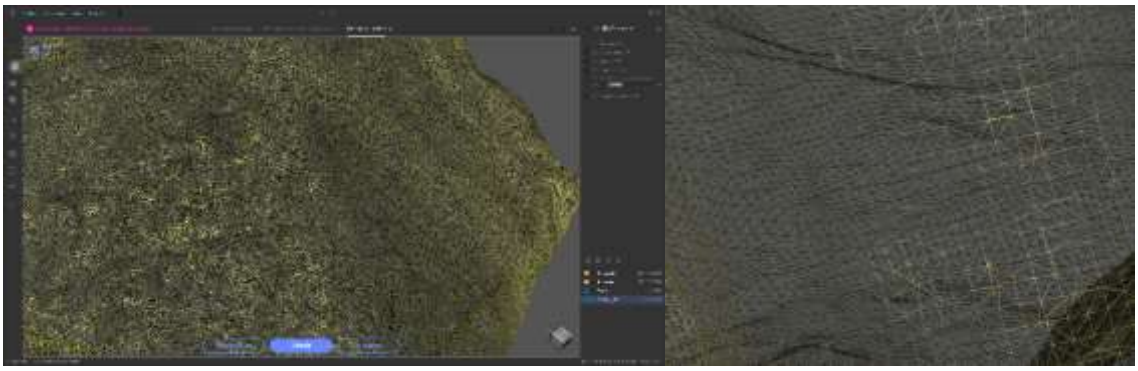

Ilustración 92 – Triangulación en la blenda realizada por el software.

Finalmente, para el modelo de texturas, se realizó un solo procedimiento empleando las funciones de "fusionar", "quitar ruido", "reparar" y "mapa de texturas". Este proceso produjo un modelo que no solo representa fielmente la forma de la muestra, sino también las texturas y colores de la superficie. Los colores de la superficie se mostraron en tonalidades de negros, grises y blancos, pero con una precisión y exactitud muy alta. Esto permitió obtener una representación visual realista y detallada de la muestra de blenda.

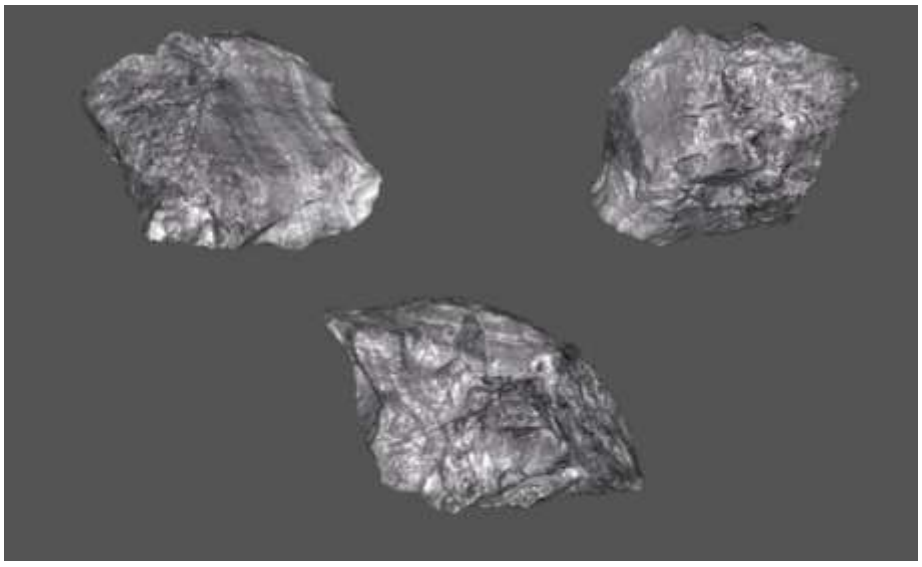

Ilustración 93 – Modelo digital de blenda con textura.

4.4 COMPARACION DE RESULTADOS

En el ensayo realizado, una vez obtenidos todos los modelos digitales de las tres muestras tanto en los procesos automáticos como manuales, se procederá a una comparación detallada de los resultados. Además, dado que en el caso de la blenda se dispuso de un modelo manual con texturas, este también será incluido en la comparación. La observación inicial de la comparativa visual entre los modelos obtenidos de forma automática y manual revela que son muy similares, si no idénticos. Al superponer uno sobre el otro, no se perciben diferencias visibles. Sin embargo, para una evaluación exhaustiva, la comparación se centrará en otras métricas de confrontación, tales como el tiempo empleado en el escaneo y en el proceso de captura de datos, el tamaño de las nubes de puntos, la cantidad de nubes de puntos necesarias, así como la dificultad y el tiempo de procesado de dichas nubes.

La primera característica a evaluar será el tiempo empleado en el escaneo. Esto incluirá tanto el tiempo necesario para configurar el equipo y preparar las muestras como el tiempo efectivo de captura de datos. Evaluar esta variable es crucial para entender la eficiencia de cada método. Una mayor rapidez en el escaneo puede traducirse en una mayor productividad y menor tiempo de espera en proyectos futuros.

	Características	Ajuste parámetros	Tiempo de escaneado
Pirita	Automático	Rápido	Rápido
	Manual	Rápido, se modifican según escaneas	Rápido
Fluorita	Automático	Necesario realizar ajustes en casi todos los escaneos	Moderado
	Manual	Rápido, se modifican según escaneas	Muy rápido
Blenda	Automático	Lento, ajustar por cada escaneo	Lento
	Manual	Rápido, se modifican según escaneas	Rápido
	Manual con textura	Rápido, se modifican según escaneas	Rápido

Tabla Numero 7 – Comparación de características de ajuste de parámetros y tiempo de escaneo por muestra.

La segunda característica a examinar será el tamaño de las nubes de puntos generadas en cada método. El tamaño de la nube de puntos influye directamente en la memoria y el almacenamiento necesarios, así como en el tiempo de procesamiento posterior. Nubes de puntos más grandes pueden ofrecer mayor detalle, pero también pueden derivar en una mayor carga computacional. Comparar los tamaños permitirá evaluar el balance entre detalle y eficiencia en cada método.

	Características	Peso individual de escaneados	Peso suma de escaneos	Tamaño del modelo final
Pirita	Automático	Menor	Mayor	Mayor (33MB)
	Manual	Mayor	Menor	Menor (11MB)
Fluorita	Automático	Menor	Mayor	Mayor (64MB)
	Manual	Mayor	Menor	Menor (40MB)
Blenda	Automático	Menor	Mayor	Mayor (150MB)
	Manual	Mayor	Menor	Menor (93MB)
	Manual con textura	Mucho mayor	Menor	Mucho mayor (212MB)

Tabla Numero 8 – Comparativa de pesaje entre las muestras.

El tamaño exacto de los escaneos realizados permite una comparación precisa entre ellos. Esta característica es esencial para evaluar la densidad de puntos, la resolución y la calidad de cada escaneo, facilitando el análisis cuantitativo de los datos obtenidos.

	Escaneos	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Pirita	Automático	49	50	40						139MB
	Manual	67	64							131MB
Fluorita	Automático	161	127	115	75	88				566MB
	Manual	261	101							362MB
Blenda	Automático	222	143	156	133	184	158	132	103	1321MB
	Manual	405	378							783MB
	Manual con textura	1333	1207							2540MB

Tabla 9 – Comparación de pesaje exacte de los archivos de los escaneos.

La cantidad de nubes de puntos necesarias es otra métrica importante. Esto se refiere al número de escaneos individuales que deben realizarse para obtener una representación completa y precisa de cada muestra. Menos nubes de puntos pueden indicar un proceso más eficiente y menos propenso a errores en la alineación y fusión, mientras que un mayor número de nubes puede proporcionar mayor cobertura y detalle.

	Características	**Tiempo e procesado**	**Alineación**	**Numero de escaneado**
Pirita	Automático	Rápido	Automática y rápida	3
	Manual	Rápido	Automática y rápida	2
Fluorita	Automático	Normal	Automática y rápida	5
	Manual	Normal	Automática y rápida	2
Blenda	Automático	Normal	Automática y lenta	8
	Manual	Normal	Automática y rápida	2
	Manual con textura	Normal	Automática y rápida	2

Tabla Numero 10 – Comparación de características de tiempo en procesado y alineación.

La dificultad y el tiempo de procesado de las nubes de puntos serán también analizados. Esto incluye la alineación de las nubes, la eliminación de puntos innecesarios y el uso de funciones de software como la fusión, reparación y eliminación de ruido. Un proceso de procesamiento más simple y rápido puede ser indicativo de un método más robusto y menos susceptible a errores, lo cual es esencial para aplicaciones prácticas donde el tiempo y la precisión son críticos, por eso se tendrá en cuenta tambien el procesamiento de datos de dos maneras diferentes, la primera con solo la función “Fusionar” para ver el resultado del modelo con una limpieza de los errores a simple vista y una segunda con las funciones “Fusionar”, “Quitar ruido”, “Reparar” un procesamiento más detallado que ayudara a conseguir un modelo más preciso y con menos errores.

	Características	**Comodidad del escaneo**	**Resultados procesamiento 1**	**Resultado procesamiento 2**
Pirita	Automático	Muy cómodo	Muy preciso, sin errores	Muy preciso, sin errores
	Manual	Cómodo, cansado	Muy preciso, sin errores	Muy preciso, sin errores
Fluorita	Automático	Cómodo	Preciso en la figura principal, algún error errores como nubes sueltas. Necesita postproceso	Precisa sin errores
	Manual	Cómodo	Precisa sin errores	Precisa sin errores
Blenda	Automático	Cómodo	Preciso en la figura principal, algún error errores como	Precisa sin errores

			nubes sueltas. Necesita postproceso	
	Manual	Muy cómodo	Precisa sin errores	Precisa sin errores
	Manual con textura	Muy cómodo		Precisa sin errores

Tabla Numero 11 – Comparación de características relacionados con los resultados de los modelos.

Esta comparativa se realizará individualmente para cada muestra, permitiendo un análisis pormenorizado de las ventajas y desventajas de cada método. A través de esta evaluación, se buscará determinar no solo la eficiencia de los procesos en términos de tiempo y recursos, sino también la precisión y calidad de los modelos obtenidos. Este análisis permitirá identificar las mejores prácticas y optimizar futuros escaneos y procesamientos de muestras similares, proporcionando una base sólida para trabajos posteriores en el ámbito de la digitalización de muestras minerales.

	Características	**Fortalezas**	**Debilidades**
Pirita	Automático	Solo se necesita un ajuste para escanear 3 veces	
	Manual	Centrarte donde más difícil el acceso	Escaneo desde la mano y pieza muy pequeña solo sostenías el dispositivo en una posición se te cansaba el brazo
Fluorita	Automático	Realizas todos sin sostener el dispositivo	Centrarte donde más difícil el acceso
	Manual	Estar pendiente de mantener la distancia y luz correcta en todo el escaneo	Tener que ir al ritmo de escaneo para no perder la referencia
Blenda	Automático	Realizas todos sin sostener el dispositivo	Realizar ajustes cada vez que se escanea. La alineación se necesitó hacer de dos en dos escaneados sin poder realizarlos todos a la vez
	Manual	Centrarte donde más difícil el acceso	Asegurarse coger todas las zonas con gran detalle
	Manual con textura	Puedes conseguir la textura de la superficie	Estar atentos para conseguir seguir el ritmo sin perder referencias del escaneo ni texturas

Tabla Numero 12 – Fortalezas y debilidades de ls diferentes escaneados según la muestra y procedimiento.

4.5 CONTRASTE METRICO

En el análisis de modelos digitales, no solo se busca la fidelidad visual, sino también la precisión en las medidas. Un modelo digital debe ser lo más realista posible, y esto incluye mantener las dimensiones exactas del objeto real. Para lograr esto, es crucial realizar mediciones precisas tanto en el objeto físico como en el modelo digital.

Para obtener las medidas del objeto físico, se utilizaron instrumentos de precisión como el calibre (o pie de rey) y el micrómetro. El calibre es un instrumento de medición versátil que puede medir dimensiones internas, externas y de profundidad con alta precisión. Este dispositivo funciona con dos juegos de mordazas, uno para medir dimensiones externas y otro para dimensiones internas, y una varilla para la profundidad. La medición se realiza deslizando las mordazas hasta que tocan las superficies del objeto, permitiendo la lectura del valor en la escala principal y el nonio. El nonio, o vernier, es una pequeña escala que permite leer fracciones de la escala principal, aumentando significativamente la precisión de la medición. Con este método, se pueden obtener medidas con una precisión de hasta 0.02 mm.

El micrómetro, por otro lado, es un dispositivo aún más preciso, utilizado para medir dimensiones pequeñas con una precisión de hasta 0.01 mm. Consta de un marco en forma de C, un tornillo micrométrico que se ajusta mediante un tambor giratorio, y una escala que proporciona la lectura. Para medir con un micrómetro, se coloca el objeto entre el yunque y el husillo, y se gira el tambor hasta que el husillo toca el objeto. La medida se lee combinando las lecturas de la escala del tambor y la escala principal. La exactitud del micrómetro lo convierte en una herramienta ideal para medir detalles finos y características críticas de los objetos.

Ilustración 94 – Calibre y micrómetro.

En este estudio, se tomaron medidas precisas de cada muestra física utilizando el micrómetro y en las mediciones que no era posible utilizarle se usaba el calibre. Estas mediciones se realizaron en puntos estratégicos de las muestras para asegurar una evaluación integral de sus dimensiones. Posteriormente, se replicaron estas mediciones en los modelos digitales utilizando herramientas de medición proporcionadas por el software. Este software permite seleccionar puntos específicos en el modelo digital y medir las distancias entre ellos, simulando las mediciones físicas. Al comparar las medidas obtenidas del objeto real con las medidas del modelo digital, fue posible calcular el error medio entre ambas.

Para cada muestra, se seleccionaron varios puntos de referencia y se midieron las distancias entre estos puntos en el objeto físico. Luego, se replicaron estas mediciones en el modelo digital. Los resultados mostraron una pequeña discrepancia entre las medidas físicas y digitales, indicando el grado de precisión del proceso de escaneo y modelado. Por ejemplo, se observó que el error medio era de 0.3109mm para la pirita y de 0. 3035mm para la fluorita, tomando en cuenta el uso de champú en seco que añadió una capa fina al objeto. Esta capa adicional podría haber introducido una pequeña variación en las medidas del modelo digital, pero incluso con esta variación, los errores eran mínimos y dentro de un rango aceptable para aplicaciones precisas.

	N.º.	**Distancia 1**		**Distancia 2**		**Distancia 3**		**Distancia 4**	
		Modelo	Muestra	Modelo	Muestra	Modelo	Muestra	Modelo	Muestra
Pirita	1	26,020	26,310	13,400	13,720	16,870	17,190	33,880	34,180
	2	26,000	26,300	13,430	13,730	16,850	17,200	33,850	34,190
	3	26,010	26,305	13,440	13,730	16,860	17,190	33,870	34,170
	4	26,000	26,310	13,410	13,700	16,850	17,180	33,870	34,180
	Media	26,008	26,306	13,420	13,720	16,858	17,190	33,868	34,180

Tabla Numero 13 – Mediciones en muestra de pirita.

	N.º.	**Distancia 1**		**Distancia 2**		**Distancia 3**		**Distancia 4**	
		Muestra	Modelo	Muestra	Modelo	Muestra	Modelo	Muestra	Modelo
Fluorita	1	19,010	19,315	23,160	23,457	20,150	20,457	18,160	18,467
	2	19,020	19,310	23,150	23,449	20,160	20,440	18,170	18,457
	3	19,000	19,320	23,140	23,468	20,150	20,448	18,150	18,458
	4	19,010	19,315	23,150	23,453	20,140	20,458	18,160	18,464
	Media	19,010	19,315	23,150	23,457	20,150	20,451	18,160	18,462

Tabla Numero 14 – Mediciones en muestra de fluorita.

En el caso de la blenda, al no generar problemas de reflexión o refracción, fue posible evaluar tanto la geometría como la textura del objeto. Las mediciones en el modelo digital de la blenda también mostraron un alto grado de precisión, aunque con un error medio ligeramente mayor de 0.4066mm. Este aumento en el error puede atribuirse a la dificultad de medir superficies irregulares y menos definidas en comparación con las formas geométricas claras de la pirita y la fluorita. Al medir puntos en superficies no planas y sin características destacadas, es más difícil garantizar que los puntos seleccionados en el modelo digital correspondan exactamente a los puntos medidos en el objeto físico. A pesar de esta dificultad, el error sigue siendo extremadamente bajo, demostrando la capacidad del escáner para capturar detalles finos y complejos con alta precisión.

	N.º.	**Distancia 1**		**Distancia 2**		**Distancia 3**	
		Muestra	Modelo	Muestra	Modelo	Muestra	Modelo
Blenda	1	75,240	75,640	30,200	30,620	40,490	40,900
	2	75,250	75,680	30,210	30,610	40,470	40,850
	3	75,250	75,630	30,210	30,620	40,480	40,870
	4	75,260	75,700	30,200	30,600	40,480	40,900
	Media	75,250	75,663	30,205	30,613	40,480	40,880

Tabla Numero 15 –Mediciones en muestra de blenda

Estas mediciones precisas y el cálculo del error medio son fundamentales para evaluar la calidad del modelo digital. Un error bajo indica que el modelo digital es una representación fiel del objeto físico no solo en apariencia, sino también en dimensiones. Esto es esencial en aplicaciones donde la precisión dimensional es crucial y siempre se tiene en cuenta que el error en estos dispositivos es de 0.005mm-1mm.

Muestra	Media en muestra	Media en modelos	Error medio	Error medio total
Pirita	22,538	22,849	0,3109	
Fluorita	20,118	20,421	0,3035	0,340368
Blenda	48,645	49,052	0,40667	

Tabla 16 – Tabla de medias en mediciones y media total del error

5 DISCUSIÓN

Tras la realización de los modelos digitales de las tres muestras, tanto en formato automático como manual, se han podido deducir diversas conclusiones sobre los escáneres de luz de corto alcance. Este análisis ha permitido determinar cuál es el proceso más eficiente según el tamaño del objeto a modelar, identificar problemas potenciales, evaluar el tamaño de los escaneos y modelos, y comparar las opciones disponibles dentro de las modalidades de textura y geometría. Asimismo, se ha explorado cuándo es más conveniente utilizar alineación automática o manual, la calidad del modelo con respecto al objeto real, los tiempos empleados en los escaneos, la comodidad del proceso y, finalmente, una serie de fortalezas y debilidades del sistema.

Primero, es fundamental destacar la relación entre el tiempo total empleado y el tamaño del objeto. No siempre un objeto más grande implica un mayor tiempo de escaneo, la eficiencia depende en gran medida de la elección del proceso adecuado, ya sea con mesa giratoria el automático o el manual. Para piezas pequeñas, tanto el escaneo automático como el manual son rápidos y requieren pocos escaneos de la pieza con un ajuste mínimo en cada caso. La principal diferencia radica en la comodidad, el escaneo automático, utilizando trípode y mesa giratoria, es simplemente presionar un botón y esperar, mientras que el escaneo manual requiere sujetar el escáner con la mano, moviéndolo cuidadosamente para capturar todas las partes necesarias.

En objetos de tamaño medio, el tiempo de escaneo es similar para ambos métodos, pero el automático puede requerir ajustes adicionales, haciendo que la desventaja del manual de tener que mover el escáner a mano sea menos significativa. No obstante, en objetos grandes, donde a menudo no cabe en la base giratoria, el escaneo automático queda descartado. El escaneo manual se convierte en la opción óptima, permitiendo realizar la mayor parte de la superficie en una sola pasada, reduciendo así la necesidad de múltiples escaneos y alineaciones. En el caso de que el objeto grande entre en la base giratoria, hay una clara desventaja para el escaneo automático, ya que obliga a realizar escaneos por zonas del objeto y ajustes por cada zona, aumentando el tiempo y esfuerzo del proceso, y disminuyendo la eficiencia.

Los problemas asociados a las superficies del objeto también son cruciales. Superficies transparentes, cristalinas, metálicas o blandas pueden presentar desafíos significativos. Las superficies transparentes y cristalinas pueden causar reflexiones, desviando el haz de luz y provocando deformaciones en el escaneo. Para objetos con brillo metálico, el problema se denomina reflectancia, resultando en errores similares. Sin embargo, existen numerosas soluciones, desde sprays especializados para esta tarea con diferentes características como que sean permanentes o temporales que modifique el color de la superficie o que solo quiten el brillo hasta métodos más rudimentarios como el uso de champú en seco, harina o maicena, que convierten la superficie en opaca y de un solo color, permitiendo utilizar la función de geometría sin capturar colores y texturas. Es importante considerar que, aunque estos métodos rudimentarios sean efectivos, pueden no ser ideales en situaciones donde la preservación de la textura original del objeto sea crucial.

En cuanto a la alineación de los escaneos, el tiempo de carga es idéntico para ambas opciones, por lo que no es un factor decisivo. La elección depende de las características

geométricas y del número de escaneos. Para objetos con pocos escaneos y formas geométricas destacadas, la alineación manual es innecesaria, ya que el software realiza una alineación correcta con un solo clic. Con muchos escaneos, también se prefiere la alineación automática, ya que, aunque tome más tiempo, garantiza una correcta alineación. En ausencia de superficies fáciles de identificar, se prueba primero el escaneo automático. Si no se logra una alineación satisfactoria, se recurre a la alineación manual, especialmente útil en objetos con formas geométricas complejas o con superficies homogéneas que no presentan puntos de referencia claros.

Los escaneos de corto alcance tienen un tamaño de archivo reducido, lo que facilita su almacenamiento y procesamiento. La calidad visual de los modelos es fiel al objeto real, con errores no visibles en las muestras, como la pirita y la fluorita, debido a sus formas geométricas en cubos estos errores serian fácilmente visibles y no se encuentra ninguno ni tampoco ninguna forma extraña en el caso de la blenda que es una superficie más homogénea y en algunas zonas rugosas tampoco se aprecia a nivel visual ningún error por lo que la precisión en este aspecto es muy fiel.

Para mejorar la calidad y reducir la necesidad de postprocesado, es recomendable utilizar las funciones de "fusionar", "reparar" y "quitar ruido" antes de comenzar el procesamiento y la generación del modelo en vez de usar solo la función de “Fusionar”. Esto realiza un trabajo adicional que el software realiza por el usuario, eliminando imperfecciones que pueden pasar desapercibidas por el propio usuario. La función de "fusionar" unifica todas las nubes de puntos y realiza la triangulación necesaria para crear un modelo tridimensional cohesivo. La función de "reparar" se encarga de corregir pequeños errores y defectos que puedan haberse producido durante el escaneo, y la función de "quitar ruido" elimina puntos dispersos y datos irrelevantes que puedan afectar la calidad del modelo final.

El tamaño de los escaneos es otro aspecto relevante. Al tratarse de un escáner de corto alcance, los archivos generados no son excesivamente grandes, lo que facilita su almacenamiento y manejo. Este factor es crucial para proyectos que requieren la captura y procesamiento de múltiples objetos, ya que permite trabajar con un volumen considerable de datos sin problemas significativos de almacenamiento. Además, el tamaño reducido de los archivos contribuye a la rapidez en los tiempos de procesamiento, alineación y generación de los modelos.

El tiempo empleado en los escaneos varía según el método utilizado y las características del objeto. El escaneo manual, aunque requiere más intervención directa del usuario, puede ser más rápido en ciertos casos, especialmente con objetos grandes o de formas complejas que no se adaptan bien a la mesa giratoria del escáner automático. Por otro lado, el escaneo automático, si bien es más cómodo y requiere menos intervención, puede ser más lento debido a la necesidad de realizar ajustes y escaneos por partes en objetos grandes.

La comodidad del proceso también es un factor importante a considerar. El escaneo automático, con el uso de un trípode y una mesa giratoria, permite una operación más relajada, ya que el usuario solo necesita configurar el dispositivo y presionar un botón. En contraste, el escaneo manual requiere que el usuario sostenga y mueva el escáner, lo que puede resultar cansado en sesiones prolongadas. No obstante, la flexibilidad del

escaneo manual es una ventaja significativa cuando se trabaja con objetos que no se adaptan bien a un entorno de escaneo fijo.

Finalmente, al evaluar las fortalezas y debilidades del sistema, se destacan las siguientes: entre las fortalezas, se encuentra la facilidad de uso del dispositivo y del software, diseñado para usuarios de todos los niveles. El software es intuitivo, con instrucciones claras para un escaneo adecuado lo que dificulta la generación de un mal modelo, y el dispositivo es ligero, facilitando la manipulación manual sin fatiga. La combinación de escaneos manuales y automáticos es útil para áreas de difícil acceso, permitiendo una mayor flexibilidad y precisión en la captura de datos.

Otra fortaleza importante es la selección de muestras con diferentes mineralizaciones, lo cual permitió abarcar características tan drásticamente distintas entre sí dentro de los minerales. Esto se hizo con el objetivo de comprobar el comportamiento del láser escáner en diversas condiciones. Al utilizar la pirita, con su superficie metálica y brillante; la fluorita, con sus cristales poliedros y brillo característico; y la blenda, sin brillos ni formas definidas, se logró evaluar cómo el escáner maneja diferentes tipos de superficies y texturas. Esta diversidad de muestras proporcionó una comprensión más completa de las capacidades y limitaciones del sistema de escaneo láser en la digitalización de materiales geológicos.

En cuanto a las desventajas, una muy perceptible es el ruido molesto del ventilador al conectar el dispositivo, que se mantiene en funcionamiento hasta que se apaga el dispositivo. Otro problema es la dificultad del escáner para detectar superficies muy oscuras, que son percibidas como manchas grandes, independientemente de los ajustes de luz. Además, la necesidad de realizar ajustes de distancia y ángulo en el escaneo automático puede ser un inconveniente, especialmente en objetos grandes o de formas complejas.

6 CONCLUSIÓN

En conclusión, tras realizar los modelos de las tres muestras de diferentes formas tanto en modo automático como manual, se llegó a la comprensión de que la elección entre estos dos procesos depende principalmente del objeto a escanear, tal y como se menciona en las instrucciones del software. Para objetos pequeños, el proceso automático es el más adecuado debido a su rapidez y precisión en el manejo de piezas de menor tamaño. Para objetos medianos, tanto el proceso automático como el manual resultan igualmente eficientes en términos de tiempo. La flexibilidad del software, que permite la combinación de ambos métodos, es ideal en estos casos. Se puede utilizar el modo automático para escanear las zonas más accesibles y realizar la mayor parte del trabajo, mientras que el modo manual se puede emplear para capturar zonas de difícil acceso con mayor precisión.

Para objetos grandes, el escaneo automático se descarta debido al tiempo y la complejidad que implica escanear por partes y realizar ajustes individuales para cada sección. En este escenario, el escaneo manual es la opción óptima, permitiendo una sola pasada precisa y rápida, siempre y cuando se mantenga la distancia y el ajuste de luz adecuados. Este método facilita un escaneo completo y eficiente de toda la superficie del objeto.

En cuanto al tamaño de los archivos generados, a diferencia de los escáneres láser, que suelen producir archivos voluminosos debido a la cantidad de información capturada, este dispositivo pequeño está diseñado para todos los públicos. Los escaneos no ocupan una gran cantidad de memoria, lo que hace que el procesamiento y el trabajo con estos archivos sean fáciles y rápidos. No se requiere un dispositivo de alta potencia para realizar estas tareas; cualquier computadora doméstica con acceso a internet para descargar el software puede manejar estos modelos sin problemas.

El software es de libre acceso y se encuentra fácilmente en internet. Además, la compañía responsable lo actualiza regularmente para mejorar la experiencia del usuario. El software es intuitivo, permitiendo su uso tanto por expertos como por principiantes, incluidos niños y adultos. Desde el inicio, ofrece explicaciones claras sobre cada función, posibles errores, soluciones, alineación y procesamiento de escaneos, utilizando imágenes y descripciones breves para facilitar la comprensión.

La calidad de los modelos digitales es uno de los aspectos más importantes. En este estudio, se presentaron dos problemas que tuvieron fácil solución: se utilizó champú en seco para tratar la pirita, debido a su brillo metálico que genera reflectancia, y la fluorita, por su capacidad de reflexión. En estos casos, solo se pudo emplear la función de geometría. A nivel visual, los modelos resultantes representaron con alta fidelidad las formas cúbicas de las muestras. La exactitud de los modelos fue impresionante, con un error de 0.31094 mm para la pirita y 0.3035 mm para la fluorita. Este error incluye no solo la precisión del escáner, sino también la fina capa adicional generada por el champú en seco.

En el caso de la blenda, que no presentó problemas de reflectancia o transparencia, se pudo probar tanto la función geométrica como la de textura. En ambos casos, el modelo final fue increíblemente preciso. Además, el modelo de textura proporcionó un resultado exacto al real, permitiendo observar los colores de la superficie, así como las zonas lisas y rugosas presentes. Aunque el error de medición fue mayor (0.40667 mm), esto se debió

a la dificultad de medir una superficie irregular y sin puntos de referencia geométricos claros. En general, el error promedio de los escaneos se encuentra entre 0.005 mm y 1 mm, lo que indica una precisión muy alta de los modelos.

El comportamiento del láser escáner al modelizar diferentes tipos de minerales genera diversas ventajas e inconvenientes centradas en el mineral a escanear. Por ejemplo, los minerales metálicos y brillantes como la pirita pueden causar problemas de reflectancia, afectando la precisión del escaneo. Por otro lado, minerales con superficies cristalinas, como la fluorita, pueden presentar dificultades debido a su capacidad de refracción y reflexión de la luz láser. Finalmente, minerales sin brillo y con formas no definidas, como la blenda, presentan desafíos en la identificación de puntos de referencia para un escaneo preciso. Estas diferencias destacan la importancia de seleccionar técnicas y ajustes específicos para optimizar el escaneo de cada tipo de mineral.

Para mejorar aún más la calidad de los modelos, es recomendable utilizar no solo la función de fusionar, sino también las funciones de reparar y quitar ruido durante el procesamiento de la nube de puntos. Estas herramientas proporcionan una ayuda adicional al corregir posibles imperfecciones o puntos sueltos que pueden pasar desapercibidos para el usuario.

En resumen, la combinación de las características del escáner y la flexibilidad del software ofrece una solución eficiente y precisa para la digitalización de objetos de diferentes tamaños y características. La accesibilidad del software, junto con su facilidad de uso y capacidad para generar modelos altamente precisos, hace que este dispositivo sea una herramienta valiosa tanto para expertos como para principiantes.

7 REFERENCIAS

[1] BURROUGH, Peter A. *Principles of geographical information systems for land resources assessment.* B.m.: Oxford, 1997.

[2] LONGLEY, Paul A., Michael F. GOODCHID, David J. MAGUIRE a David W. RHIND. *Geographic information systems and science.* B.m.: WILEY, 2016.

[3] BURROUGH, Peter A. a Rachael A. MCDONNELL. *Principles of geographical information systems.* B.m.: Oxford University Press., 2001.

[4] SMITH, Dr Michael J. de, Prof Michael F. GOODCHILD a Prof Paul A. LONGLEY. *Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide*. 2018. ISBN 978-1-912556-04-5.

[5] CAMPBELL, James B. *Introduction to Remote Sensing*. 2008. ISBN 978-1-60623-074-9.

[6] DE LUIS RUIZ, Julio Manuel. *Curso: Topografía Aplicada a la Ingeniería (2018)* [online]. [vid. 2024-04-28]. Dostupné z: https://ocw.unican.es/course/view.php?id=268

[7] SAMPLE, Al, ed. *Remote Sensing and GIS in Ecosystem Management*. 1994. ISBN 978-1-55963-284-3.

[8] JOHN, Jensen. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. 2006. ISBN 978-0-13-188950-7.

[9] AGULIAR, Francisco J., José M. FORTEZA a Pedro J. GARCIÁ. *Modelos Digitales del Terreno: Fundamentos y Aplicaciones*. nedatováno.

[10] *Delaunay triangulation* [online]. 2024 [vid. 2024-04-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Delaunay_triangulation&oldid=1219091670

[11] *Voronoi diagram* [online]. 2024 [vid. 2024-04-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi_diagram&oldid=1219821668

[12] DIGGLE, Peter a Oliver CRESPO. *Geostatistical Techniques for Spatial Data Analysis*. nedatováno.

[13] LI, Weioing. A Delaunay-Based Approach for Terrain Extraction from Lidar Data. nedatováno.

[14] SHELLITO, Bradley A. *Introduction to Geospatial Technologies*. 2015. ISBN 978-1-4641-8872-5.

[15] JOHN, Jensen a Jensen RYAN. *Introductory Geographic Information Systems:International Edition*. 2012. ISBN 978-0-13-302953-6.

[16] DE LUIS RUIZ, Julio Manuel a Benjamín PIÑA PATÓN. *Contrastes en la ejecución de auscultacione géodesicas por métodos clásicos y con láser escáner.* B.m., 2019. Universidad de cantabria.

[17] PÉREZ-ÁLVAREZ, Rubén, Julio Manuel DE LUIS-RUIZ, Gema FERNÁNDEZ-MAROTO a José Ramón BERASATEGUI MORENO. *Aplicaciones del Láser Escáner en Entornos Mineros, Implementación en el Grupo Minero La Florida (Cantabria).* Cantabria, 2014. Universidad de cantabria.

[18] *Introduction to Creaform 3D Scanners* [online]. 13. srpen 2021 [vid. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=4ORo7JON258

[19] Laser Scanning: The Powerful, Flexible Tool of Choice for Advanced Manufacturing - Nikon Metrology. *Nikon Industrial Metrology - European English* [online]. [vid. 2024-05-20]. Dostupné z: https://industry.nikon.com/en-gb/case-studies/laser-scanning-the-powerful-flexible-tool-of-choice-for-advanced-manufacturing/

[20] *White Light vs Blue Light Scanning* [online]. [vid. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/white-light-vs-blue-light-scanning