

Diseño y construcción de un sistema estandarizado para la reconstrucción tridimensional
a nivel macro de objetos por medio de fotogrametría

Kevin Raúl Ovalle Rojas

Diego Fernando Carrillo Duarte

Trabajo de Grado para Optar el Título de Diseñador Industrial

Director

Javier Mauricio Martínez Gómez

Ph.D. Diseño Industrial

Codirector

Luis Eduardo Bautista Rojas

Magíster en Ingeniería de Sistemas e Informática

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de Diseño Industrial
Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado a mi familia, a mi “pa”, a mi “ma” y a mi hermano, ellos que siempre me apoyaron en todo y que con gran esfuerzo me permitieron llegar hasta este punto.

A mi compañero de tesis y gran amigo Diego con el que he compartido todo mi proceso de formación. Finalmente podemos celebrar, ¡lo logramos!

A mis profesores, Amandita y amigos les dedico este logro, porque cada uno de ustedes me dio una razón para llegar hasta acá,

Kevin Raúl Ovalle Rojas

Dedico este proyecto y finalización de carrera a mis padres quienes hicieron posible esta travesía dándome todo lo necesario y mucho más.

A mi amigo y compañero de tesis Kevin, quien siempre estuvo dispuesto a apoyar de la mejor manera.

A mis amigos, profesores, compañeros y todos aquellos que fueron parte del camino compartiendo o ayudando, estaré siempre agradecido por su apoyo y compañía.

Diego Fernando Carrillo Duarte

Agradecimientos

Al concluir esta gran etapa de nuestras vidas queremos agradecer a quienes hicieron posible este triunfo, aquellos que nos apoyaron, confiaron y de alguna forma pusieron su granito de arena. Esta mención es muy especial para nuestra familia, padres y hermanos, que con esfuerzo y trabajo duro nos permitieron llegar hasta este momento.

Nuestra gratitud, a la universidad industrial de Santander y la escuela de diseño industrial, que nos permitió encontrar nuestra verdadera vocación, gracias a nuestros directores de proyecto Javier Martínez y Luis Eduardo Bautista que nos motivaron en sus clases y siempre nos tuvieron confianza.

También debemos extender nuestros agradecimientos a nuestros compañeros y amigos, con los que compartimos las mejores experiencias en la universidad.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo General	15
1.2. Objetivos Específicos.....	15
2. Planteamiento del Problema de Diseño	16
2.1. Descripción del problema	16
3. Marco Teórico.....	17
3.1. Antecedentes de la Situación de Estudio	19
3.2. Captura de Imágenes.....	19
3.3. Macrofotografía	21
3.4. Procesamiento de Imágenes	21
3.5. Prototipado 3D.....	21
3.5.1. Estereolitografía	22
3.5.2. Polyjet	23
3.5.3. Deposición de Hilo Fundido	23
3.5.4. Inyección de Aglutinante	24
3.5.5. Sinterizado Selectivo con Láser.....	25
3.5.6. Sinterizado Láser Directo en Metal	26
4. Alcances	27
5. Justificación	28
5.1. Pregunta de Diseño	29

6. Metodología	30
6.1. Fase Exploratoria	30
6.2. Fase de Planificación y Diseño	31
6.3. Fase de Análisis y Evaluación	32
7. Desarrollo del Proyecto.....	33
7.1. Fase Exploratoria	33
7.1.1. Escoger un objeto.....	33
7.1.2. Esquemas de Iluminación	34
7.1.3. Fondo o Ambiente.....	35
7.1.4. Evaluación de Conceptos	56
7.2. Fase de Planificación y Diseño	62
7.2.1. Requerimientos del Montaje	62
7.2.2. Diseño del Montaje	62
7.3. Fase de Análisis y Evaluación	72
7.3.1. Secuencia de Trabajo	72
7.3.2. Tabla de los Objetos Seleccionados y sus Características	76
8. Conclusiones	84
Referencias Bibliográficas	87

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Información relevante y análisis estereolitografía	22
Tabla 2. Información relevante y análisis polyjet.....	23
Tabla 3. Información relevante y análisis: deposición de hilo fundido	23
Tabla 4. Información relevante y análisis: inyección de aglutinante.....	24
Tabla 5. Información relevante y análisis: sinterizado selectivo con láser.....	25
Tabla 6. Información relevante y análisis: sinterizado láser directo en metal	26
Tabla 7. Metodología Fase Exploratoria.....	30
Tabla 8. Metodología Fase de Planificación y Diseño	31
Tabla 9. Metodología Fase de Análisis y Evaluación.....	32
Tabla 10. Software de Reconstrucción 3D por Fotogrametría	37
Tabla 11. Especificaciones mínimas del sistema según hardware.....	37
Tabla 12. Descripción de los softwares	39
Tabla 13. Especificaciones Actividad 1	42
Tabla 14. Especificaciones Actividad 2.....	45
Tabla 15. Especificaciones Actividad 3.....	47
Tabla 16. Especificaciones Actividad 4.....	50
Tabla 17. Retroalimentación de las actividades.....	52
Tabla 18. Comparativa Alternativas de Macrofotografía	56
Tabla 19. Especificaciones del Sistema Según Software.....	60
Tabla 20. Materiales Básicos para el Sistema de Control de Plataforma	64
Tabla 21. Funcionamiento del Esquema de Interfaz de la Plataforma	70

Tabla 22. Secuencia de Trabajo	72
Tabla 23. Objetos Seleccionados y sus Características	76
Tabla 24. Modelo Digital de la Reconstrucción 3D del Objeto 1.....	78
Tabla 25. Modelo Digital de la Reconstrucción 3D del Objeto 2.....	79
Tabla 26. Modelo Digital de la Reconstrucción 3D del Objeto 3.....	80
Tabla 27. Comparativa 1	82
Tabla 28. Comparativa 2.....	82
Tabla 29. Comparativa 3.....	83

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquemas de fotogrametría.	20
Figura 2. Selección de Objeto.....	33
Figura 3. Esquema de tres luces laterales	35
Figura 4. Cromo verde para Esquema 1 y Fondo negro para Esquema 2.....	36
Figura 5. Nube de puntos Alice Visión Meshroom	40
Figura 6. Nube de puntos y nube densa en Agisoft Metashape	41
Figura 7. Fotografías Primera Actividad	42
Figura 8. Nube de puntos y Nube densa, respectivamente	43
Figura 9. Sólido con textura y Error de construcción en parte posterior	43
Figura 10. Detalle de textura.....	44
Figura 11. Fotografías Actividad 2	45
Figura 12. Error de reconstrucción nube de puntos	46
Figura 13. Error de reconstrucción utilizando máscaras de capa.....	46
Figura 14. Fotografías Actividad 3	47
Figura 15. Nube de puntos y Nube densa, respectivamente	48
Figura 16. Sólido con textura y Sólido con textura y altas luces, respectivamente	49
Figura 17. Detalle de textura.....	49
Figura 18. Fotografías Actividad 4	50
Figura 19. Error de reconstrucción por superficies brillantes.....	51
Figura 20. Fotografías cuarta actividad eliminando brillos con talco.....	51
Figura 21. Reconstrucción corregida	52

Figura 22. Alternativa 1 Macrofotografía.....	53
Figura 23. Alternativa 2 Macrofotografía.....	54
Figura 24. Alternativa 3 Macrofotografía.....	55
Figura 25. Alternativa 4 Macrofotografía.....	55
Figura 26. Alternativa 5 Macrofotografía.....	56
Figura 27. Comparación proporción antes y después de realizar el focus stacking	58
Figura 28. Superposición de imágenes	59
Figura 29. Palanquilla de Enfoque.....	59
Figura 30. Prueba de Sistema de Control de 15, 45 y 60°.....	66
Figura 31. Diseño del Circuito y su Prototipado.....	66
Figura 32. Carcasa del dispositivo.....	67
Figura 33. Brazos articulados	68
Figura 34. Detalle sistema de transmisión de corriente	69
Figura 35. Modulo LCD	69
Figura 36. Esquema de Interfaz de la Plataforma.....	70
Figura 37. Fotografías montaje del dispositivo terminado	71
Figura 38. Fotografías ubicación y montaje para realizar la fotogrametría.....	75
Figura 39. Fotografías Modelos Prototipados Escala 100:1	81

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca

UIS.

Apéndice A. Planos de fabricación del dispositivo.

Apéndice B. Ubicación de las piezas en la plataforma de impresión

Resumen

Título: Diseño y construcción de un sistema estandarizado para la reconstrucción tridimensional a nivel macro de objetos por medio de fotogrametría.*

Autor: Kevin Raúl Ovalle Rojas; Diego Fernando Carrillo Duarte**

Palabras Clave: Focus stacking, digitalizado 3D, macrofotografía, profundidad de campo.

Descripción:

Con el desarrollo de este proyecto y por medio de una metodología proyectual, se buscó obtener el diseño de un sistema funcional que sirva como dispositivo para realizar un barrido de 360° para la toma de fotografías con cámaras réflex, que combine las técnicas de reconstrucción 3D por fotogrametría y los conceptos del focus-stacking para capturar un banco de imágenes a nivel macro para su posterior procesamiento y digitalización 3D.

Para la obtención de una reconstrucción 3D de alta resolución es necesario tener en cuenta los procesos de captura de información, la calidad y resolución de las imágenes, y la relación entre los diferentes atributos de la captura: calidad e iluminación (que se encuentran directamente relacionados), profundidad de campo, angulación y número de capturas. La suma y ejecución de estas actividades y sus resultados, junto con la selección de objetivos óptimos de captura, sirvió de guía para alcanzar un sistema de captura de imágenes, un manual de uso que permita el control de todas las variables y parámetros durante la captura, una secuencia de uso que permite su adecuado post procesamiento y un modelo digital 3D de alta resolución listo para su respectiva aplicación en diferentes campos académicos y profesionales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Diseño Industrial. Director: Javier Mauricio Martínez Gómez. Magister en Ingeniería de Sistemas e Informática. Codirector: Luis Eduardo Bautista Rojas. Magister en Ingeniería de Sistemas e Informática

Abstract

Title: Design and construction of a standardized system for macro-level three-dimensional reconstruction of average photogrammetric objects.*

Author: Kevin Raúl Ovalle Rojas; Diego Fernando Carrillo Duarte **

Key Words: Focus stacking, 3D digitalized, macrophotography, depth of field.

Description:

With the development of this project and by means of a project methodology, we seek to obtain the design of a functional system that serves as a device to perform a 360° sweep for taking photographs with reflex cameras, which combines the techniques of 3D reconstruction by photogrammetry and the concepts of focus-stacking to capture a bank of images at macro level for subsequent processing and 3D digitization.

In order to obtain a high-resolution 3D reconstruction, it is necessary to consider the information capture processes, the quality and resolution of the images, and the relation between the different attributes of the capture: quality and illumination (which are directly related), depth of field, angulation and number of captures. The sum and execution of these activities and their results, together with the selection of optimal capture objectives, will guide us to achieve an image capture system, a user's manual that allows the control of all variables and parameters during capture, a sequence of use that allows its adequate post-processing and a high-resolution 3D digital model ready for its respective application in different academic and professional fields.

* Degree Work

** Faculty of Physics Mechanics Engeniers. School of Industrial Design. Director: Javier Mauricio Martínez Gómez. Master of Systems and Computing Engineering. Co-director: Luis Eduardo Bautista Rojas. Master of Systems and Computing Engineering.

Introducción

Los procesos de digitalizado 3D de objetos son una de las tecnologías de mayor crecimiento y aplicaciones de la industria actual, permitiendo productos integrados de mayor calidad, tiempos de entrega reducidos o mejoras en la eficiencia de fabricación. Algunas de las aplicaciones más destacadas son: control de calidad, ingeniería inversa, conservación de patrimonio arqueológico, prototipado rápido, aplicaciones médicas, entre otras. Sin embargo, esta tecnología no ha podido beneficiar a todos los sectores, debido a las dimensiones del objeto o al método de captura, ya que los scanners 3d se ven limitados por tamaños inferiores a 1cm (Polyga, s.f.). Así que estas necesidades llevaron a implementar otras formas de captura de información, como el uso de drones y fotogrametría para digitalizar incluso construcciones arquitectónicas y geografías complejas que serían imposibles con scanners convencionales (Arriola et al., 2018). Por eso, es necesario el diseño y construcción de un dispositivo que por medio de operaciones estandarizadas registre digitalmente objetos que los sistemas actuales no reconocen, manteniendo sus características físicas (dimensiones, volumen, y forma).

En el siguiente documento se expondrá el desarrollo de un sistema estandarizado de digitalizado 3d, que abarca las aplicaciones que están restringidas debido a las características formales del objeto, teniendo en cuenta estudios realizados de fotogrametría y soluciones existentes, seguido del planteamiento de la pregunta de diseño, objetivos, alcances y la metodología que se implementará. El documento finaliza con el cronograma de actividades a seguir y el presupuesto estimado para el desarrollo del proyecto.

Siguiendo la metodología estudiaremos cada una de las variables a conocer y controlar en la captura y procesamiento de las imágenes para así determinar las condiciones más favorables que garanticen un correcto post procesado.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Diseñar y construir un sistema que permita la captura y procesamiento de imágenes con el fin de obtener un modelo digital 3D de objetos con dimensiones inferiores a los 0.3X0.3X0.3 cm.

1.2. Objetivos Específicos

Aplicar la técnica de fotogrametría a un objeto de control para definir la variables y condiciones ideales necesarias en la captura de las imágenes.

Identificar y comparar las técnicas de macrofotografía y así seleccionar la más adecuada para el proyecto.

Diseñar y construir un montaje para realizar la captura de imágenes.

Proponer una secuencia de trabajo que abarque la captura de información, su procesamiento y posterior prototipado

Verificar el correcto funcionamiento del sistema propuesto construyendo un modelo a escala de un objeto de dimensiones inferiores a 0.3x0.3x0.3cm

2. Planteamiento del problema de diseño

2.1. Descripción del problema

La reconstrucción 3D y la fabricación aditiva se han convertido en una de las herramientas más usadas a nivel industrial, ya que mediante estos métodos casi cualquier objeto o entidad física puede digitalizarse con eficiencia para obtener los niveles más altos de calidad y realismo. Sus aplicaciones actualmente están en la arqueología, la medicina, el control de calidad, la ingeniería inversa, arte, arquitectura, la investigación, realidad virtual (creación de personajes y escenarios), creación de prototipos, entre otras (Inzunza et al., 2015).

Sin embargo, la utilización de estas tecnologías está condicionadas a la resolución de los aparatos que capturan la información del objeto. Independientemente de la tecnología usada la digitalización implica una toma de datos del objeto y un procesamiento de estos.

Actualmente existen técnicas y tecnologías de triangulación láser, luz estructurada y fotogrametría, para realizar la toma de datos del objeto. A pesar de esto, en aplicaciones como la biología, la joyería, el control de calidad, etc. esta tecnología no ha sido explotada debido a las dimensiones de los objetos que necesitan reconstruir ya que generalmente estas disciplinas requieren de modelos tan precisos de objetos cuyas dimensiones y características (textura, tamaño, imperfecciones) no son captadas por los scanners.

Para obtener un modelo 3D fiel al objeto real las empresas necesitan de expertos que realizan el modelado con herramientas como Rinconeros, Sketch Fab, 3DMView, 3D Max, SolidWorks etc. Razón por la cual incrementa costos y tiempo en la fabricación del modelo 3D; sin embargo, en campos como la biología, específicamente en la rama de la entomología (estudio de los insectos), los científicos, generalmente para estudiar una adaptación o característica en un

insecto sacrifican muchos ejemplares, porque durante su proceso de descomposición se pierden sus características originales, estas características de volumen, textura y forma podrían conservarse en un modelo 3D; pero los biólogos carecen de estos modelos debido a la instrumentación necesaria para tomar las dimensiones de los insectos. Por ende, ni un experto puede realizar un modelado fiel al insecto. De igual manera ocurren estos problemas en varios campos donde los objetos son tan pequeños que es prácticamente imposible obtener una réplica digital.

Las tecnologías actuales cuentan con resoluciones de trabajo impresionantes (0,1mm), esto permite capturar detalles profundos a nivel de la textura, con el inconveniente de que el volumen mínimo de escaneo es de aproximadamente 1x1x1 cm, dejando de lado elementos de menores proporciones (milimétricos y micrométricos) con infinidad de aplicaciones (POLYGA, s.f.).

Hoy en día el procesamiento de los datos está resuelto, es decir que si se cumple con las características de la información se obtendrá un modelo 3d con calidad de impresión (ALL3DP.pro, 2020). En definitiva, el problema de digitalizar objetos radica en tomar los datos de forma precisa. Por lo tanto, la tecnología hace un esfuerzo cada día por lograr aumentar la precisión de sus instrumentos para digitalizar objetos cada vez más pequeños, es decir, tomar los datos de un objeto se convierte en un campo exploratorio dirigido a lo microscópico. Mediante este proyecto se pueden proponer formas de registrar los datos (dimensiones, textura y forma) de los objetos para poder llevar la tecnología a campos que no la han podido usar debido a los problemas mencionados.

3. Marco Teórico

Según David Torreblanca Díaz (2016), Las Tecnologías de Fabricación Digital (TFD) son un conjunto de tecnologías emergentes que permiten materializar un modelo, prototipo o series

cortas directamente de un archivo digital CAD 3D y con una amplia gama de técnicas, materiales y acabados. Además, estas tecnologías (TFD) no solo permiten fabricar un conjunto de objetos, sino que los ensambla al mismo tiempo (Torreblanca, 2016). Como lo hemos mencionado con anterioridad, el proceso de digitalización 3D requiere de una toma de datos y un procesamiento de los mismos.

Hablando puntualmente de la toma de datos, la evolución de la tecnología nos ha permitido escoger entre dos tipos, los sistemas de contacto y los sistemas sin contacto (Gracia, 2015). La naturaleza de nuestro proyecto descarta los sistemas de contacto porque estos sistemas son invasivos, es decir, requieren apoyar un elemento de medida (palpador de acero o zafiro) sobre la superficie del objeto a escanear lo que puede ocasionar que el objeto se modifique o dañe. Además, los objetos de menos de 0.3x0.3x0.3 cm otorgarían muy poca información, ya que ésta es directamente proporcional a la superficie del objeto.

Por otro lado, en los sistemas sin contacto tenemos dos grandes grupos, los sistemas activos (tiempo de vuelo, triangulación, diferencia de fase, de holografía conoscópica, de luz estructurada y de luz modulada) y los sistemas pasivos (método estereoscópico, fotogrametría, método de siluetas, modelado manual basado en una imagen). Los activos emiten ondas electromagnéticas, radiaciones, ultrasonidos o señales que rebotan sobre el objeto y regresan a un sensor que capta esta información y la va convirtiendo en la geometría del objeto a nivel digital; mientras que los pasivos captan la luz blanca, la luz infrarroja o incluso la radiación del ambiente en el que se encuentra el objeto.

La precisión de los sistemas de captura actuales tiene muy buena resolución(0,1mm) y aun así no son capaces de captar elementos de proporciones menores a 2cm x 2 cm x 2 cm (objetos del tamaño de una uva), ya que estos requieren de puntos de referencia que sirven como coordenadas

para la digitalización. Estos puntos tienen dimensiones de área igual o superiores a los 0.5cm, representando un problema directo para el registro de la información (POLYGA, s.f.).

3.1. Antecedentes de la Situación de Estudio

La toma de datos de elementos de dichas dimensiones (0.3x0.3x0.3cm) representan un reto inclusive a nivel bidimensional, ya que la naturaleza del objeto no permite que sea registrado y enfocado en una sola imagen. Instrumentos como el microscopio o técnicas como la macrofotografía han podido registrar fielmente objetos de dimensiones menores a los 0.3 cm x 0.3 cm x 0.3 cm, con el inconveniente de que al querer una imagen completamente nítida es necesaria la implementación de la técnica focus stacking, esta técnica, por medio de un apilado de imágenes en secuencia, permite la reconstrucción bidimensional de una de las vistas del objeto (Brecko et al., 2014).

Partiendo de las imágenes obtenidas y con ayuda de un algoritmo de cálculo, podemos determinar los puntos comunes entre las fotografías conociendo los parámetros de posición, orientación y tamaño, a esto se le conoce como fotogrametría. Mediante este proceso, se obtiene un registro instantáneo con información objetiva de piezas complejas manteniendo un costo relativamente económico comparado con los demás procedimientos.

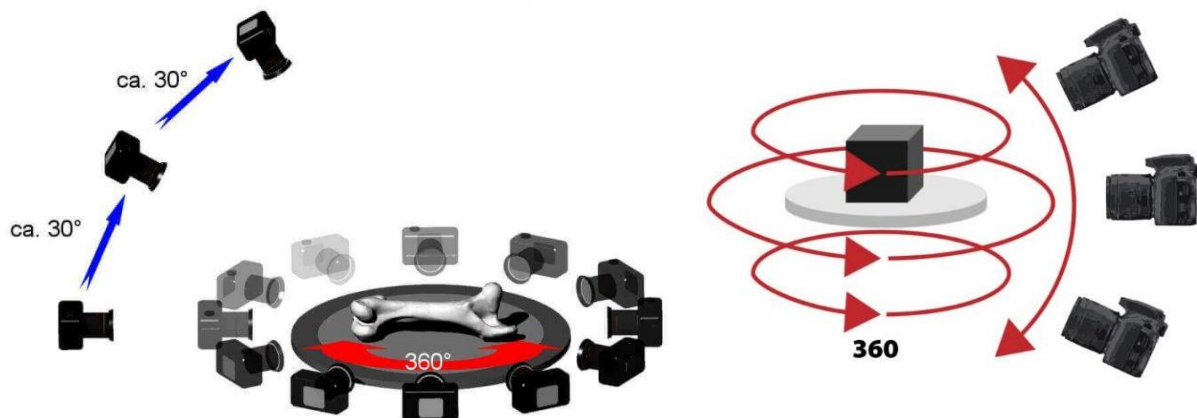
3.2. Captura de Imágenes

Debido a que los sistemas pasivos no necesitan ningún dispositivo especial para capturar la información del objeto, es preferible utilizar una cámara réflex para la captura de la información, ya que entre mejor sea la calidad de la fotografía; mejor será la calidad del modelo digitalizado (Blizard, 2014).

Para realizar un buen escaneo se recomienda que la captura de las fotos se haga alrededor del objeto, teniendo una separación entre foto y foto de 10 a 15 grados, donde las imágenes consecutivas se solapan un 10%. Software como Photoscan y 123D Catch recomiendan un mínimo de 24 fotografías para generar un modelo 3d completo. Debemos tener en cuenta la iluminación de nuestro objeto, ya que la fotogrametría no solo captura el volumen (nube de puntos) sino características como la textura y color del objeto, lo que favorece la construcción de un modelo más realista.

Figura 1.

Esquemas de fotogrametría, Método de paseo(Izquierda)/Método de plataforma giratoria(Derecha)



Debemos tener en cuenta que mediante la fotogrametría obtendremos los datos para generar la nube puntos del objeto, sin embargo, el objetivo del proyecto es capturar un modelo digital de un objeto cuyo volumen sea menor o igual a $0.3 \times 0.3 \times 0.3$ cm por lo que la captura de imágenes está limitada a ciertos parámetros de macrofotografía que nos permitirán captar con detalle las características del objeto.

3.3. Macrofotografía

Es una rama de la fotografía que se encarga de la de la captura de imágenes con una magnificación mayor a 1:1, es decir, que la imagen que se proyecta en el sensor de la cámara tiene una escala 1 a 1 con respecto a las dimensiones reales del objeto fotografiado. Esta técnica es favorable para el proyecto, debido a que nos permite capturar información de objetos cuyas dimensiones son inferiores a los 0.3x0.3x0.3 cm. sin embargo, debemos tener en cuenta que este tipo de fotografía requiere de procedimientos precisos, equipos especiales y software dedicados a esta técnica, ya que al aumentar la distancia focal para ganar aumento mayor a 1:1, la profundidad de campo disminuye, por ende necesitaremos recurrir a otra herramienta llamada FOCUS STACKING con la que solucionaremos el problema de la profundidad de campo reducida.

3.4. Procesamiento de Imágenes

Una vez realizado el proceso anterior, se descargan los archivos a programas como 123D Catch de Autodesk, ReconstructMe, PhotoScan de Agisoft, Photomodeler, entre otros; que se encargan de comparar y unir las fotografías para obtener una nube de puntos que se convertirá en el modelo digital 3D, No obstante, la calidad del modelo depende de factores como los megapíxeles de las fotografías, el tamaño del sensor de la cámara (APSC, full frame, etc.), la potencia de luz (watts) y del tamaño del objeto (ALL3DP.pro, 2020).

3.5. Prototipado 3D

También conocida como manufactura aditiva debido a que a diferencia de otros procesos no remueve material, sino que lo aporta capa por capa generando un desperdicio mínimo con respecto a otros procesos. Generalmente el prototipo requiere de un modelado o un diseño asistido por computadora del objeto que queremos replicar. Para el presente proyecto, este modelo se

obtendrá de la nube de puntos generada por fotogrametría a través del procesamiento del software, obteniendo el modelo en extensión STL (de estereolitografía) que es un formato de fichero que todos los programas de control de impresoras 3D aceptan. Según ASTM (American Society for Testing and Materials) respecto las Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva (TFDA), existen 6 nuevas tecnologías que están revolucionando el campo del prototipado y la fabricación aditiva:

3.5.1. Estereolitografía

Tabla 1.

Información relevante y análisis estereolitografía.

Tecnología	Estereolitografía
Materiales	Resinas fotosensibles
Tamaño mínimo de detalles	*0.1 mm
Tolerancia	*+/-0.15 mm
Ventajas	Alto grado de precisión y acabados, posibilidad de generar formas complejas, paredes delgadas, transparencia o translucidez, es posible hacer piezas y prototipos funcionales, pero no siempre es aconsejable.
Desventajas	Alto costo, no utiliza material estándar, se requiere material de soporte para la construcción de las piezas. Las características de resistencia mecánica no perduran en el tiempo, debido al tipo de resinas utilizadas en este proceso (resinas foto-reactivas).
Tipo de representaciones sugeridas	Modelos de apariencia y prototipos funcionales para estos últimos no siempre es aconsejable.

Nota: Tomado de: Additively, spin-off of ETH Zurich (2015). Análisis de Sinterizado Láser.

3.5.2. Polyjet

Tabla 2.

Información relevante y análisis polyjet.

Tecnología	Polyjet
Materiales	Resinas fotosensibles
Tamaño mínimo de detalles	*0.15 mm
Tolerancia	*+/-0.025 mm
Ventajas	Alto grado de precisión y acabados, posibilidad de generar formas complejas, paredes delgadas, transparencia o translucidez, también es posible integrar diferentes materiales en una misma impresión (multimaterialidad); al igual que en la estereolitografía las características de resistencia mecánica no perduran en el tiempo, debido al tipo de resinas utilizadas (foto-reactivas).
Desventajas	Alto costo, no se utiliza material estándar, requiere material de soporte.
Tipo de representaciones sugeridas	Modelos de apariencia y funcionales para estos últimos no siempre es aconsejable

Nota: Tomado de: Additively, spin-off of ETH Zurich (2015). Análisis de Sinterizado Láser.

3.5.3. Deposición de Hilo Fundido

Tabla 3.

Información relevante y análisis: deposición de hilo fundido.

Tecnología	Deposición de hilo fundido
Materiales	Polímeros, tales como: ABS, PLA, PCL, policarbonato
Tamaño mínimo de detalles	*0.178 mm

Tolerancia	*+/-0.178 mm
Ventajas	Utiliza polímeros standard y hay diferentes marcas accesibles a bajo costo, permite hacer prototipos funcionales con buena resistencia mecánica que permanecen en el tiempo.
Desventajas	No tiene un acabado superficial fino (puede ser mejorado con post-procesos) y las piezas son anisotrópicas en el eje vertical (Z), por tanto, la resistencia a esfuerzos mecánicos no es homogénea. En modelos con cámara abierta es común tener problemas con la regulación de la temperatura, lo cual genera piezas incorrectas.
Tipo de representaciones sugeridas	Prototipos funcionales, producción de series cortas de productos.

Nota: Tomado de: Additively, spin-off of ETH Zurich (2015). Análisis de Sinterizado Láser.

3.5.4. Inyección de Aglutinante

Tabla 4.

Información relevante y análisis: inyección de aglutinante.

Tecnología	Inyección de aglutinante
Materiales	Material compuesto cerámico-polimérico (Impresora modelo Zprinter)
Tamaño mínimo de detalles	*0.1 mm
Tolerancia	*+/-0.13 mm
Ventajas	Impresión más rápida que otras tecnologías, buena definición de formas y superficies, geometrías complejas, impresión con diferentes colores imágenes y texturas en la misma pieza. Es posible aplicar masillas (de poliéster u otra) para mejorar su acabado superficial si es

	necesario, también se puede mejorar sus propiedades mecánicas infiltrando resina y reforzando con fibra de vidrio u otras similares si la pieza lo requiere. Esta tecnología no requiere soportes, ya que el polvo de la plataforma de construcción soporta la pieza.
Desventajas	Las piezas son frágiles, son útiles para ser manipuladas o para modelos de apariencia, pero no tienen alta resistencia mecánica. Los materiales no son standard y en el caso del modelo Zprinter se requieren diversos insumos (polvo, líquido, cartridge) lo cual hace más complejo el mantenimiento de la máquina. Esta tecnología requiere varios postprocesos, tales como: remover el polvo, infiltrar piezas (con cianocrilato o resina), lijado y pulido según los requerimientos.
Tipo de representaciones sugeridas	Modelos de apariencia

Nota: Tomado de: Additively, spin-off of ETH Zurich (2015). Análisis de Sinterizado Láser.

3.5.5. Sinterizado Selectivo con Láser

Tabla 5.

Información relevante y análisis: sinterizado selectivo con láser.

Tecnología	Sinterizado selectivo con láser
Materiales	Polímeros (nylon, poliestireno) cerámicos y vidrio.
Tamaño mínimo de detalles	*0.15 mm
Tolerancia	*+/-0.25 mm
Ventajas	Esta tecnología no requiere soportes, ya que el polvo de la plataforma de construcción soporta la pieza, uso de materiales standard

	ampliamente disponibles y resistencia mecánica similar a piezas generadas por procesos tradicionales
Desventajas	El proceso es lento y el acabado superficial no es totalmente liso, comparado con procesos de fabricación tradicional (inyección de termoplásticos, fundición de precisión, etc).
Tipo de representaciones sugeridas	Prototipos funcionales, producción de series cortas de productos.

Nota: Tomado de: Additively, spin-off of ETH Zurich (2015). Análisis de Sinterizado Láser.

3.5.6. Sinterizado Láser Directo en Metal

Tabla 6.

Información relevante y análisis: sinterizado láser directo en metal.

Tecnología	Sinterizado láser directo en metal
Materiales	Metales: acero, aluminio, titanio y aleaciones.
Tamaño mínimo de detalles	*0.04-0.2 mm
Tolerancia	*+/- 0.05-0.2 mm (+/- 0.1-0.2%)
Ventajas	Al igual que el Sinterizado Selectivo por Láser e Inyección de Aglutinante esta tecnología no requiere soportes, ya que el polvo de la plataforma de construcción soporta la pieza, uso de materiales standard ampliamente disponible, puede fabricar piezas de alta densidad y resistencia mecánica similar a piezas generadas por procesos tradicionales.

Desventajas	El proceso es lento, caro y el acabado superficial no es totalmente liso, comparado con procesos de fabricación tradicional (inyección de termoplásticos, fundición de precisión, etc).
Tipo de representaciones sugeridas	Prototipos funcionales, producción de series cortas de productos.

Nota: Tomado de: Additively, spin-off of ETH Zurich (2015). Análisis de Sinterizado Láser.

No nos detendremos a analizar específicamente algún modelo de prototipado debido a que depende del uso que se vaya a dar y en qué material se quiere prototipar. Los modelos obtenidos tienen como objetivo ser escalados a volúmenes superiores de los 5x5x5cm, lo que permitirá establecer los parámetros que debe tener la impresora 3D a utilizar.

4. Alcances

Realizar el montaje necesario para capturar las imágenes que utilizará el software para crear el modelo digital.

Desarrollar un sistema de captura de imágenes estandarizado diseñado específicamente para macrofotografía, el cual permita realizar un focus stacking a objetos cuyas dimensiones sean menores o iguales a 0.3 X 0.3 X 0.3 cm.

Obtener un modelo digital 3D a partir del procesamiento de las imágenes previamente obtenidas por medio de fotogrametría.

Generar tres modelos prototipados de objetos con características y distribuciones formales diferentes, con sus respectivas especificaciones técnicas.

5. Justificación

Las tecnologías de reconstrucción aditiva tienen un amplio catálogo de posibilidades, hoy en día es una herramienta común que permite crear modelos personalizados, geometrías complejas, prototipado rápido y de bajo costo, esta se ha convertido en un aliado para el diseño y la investigación, utilizada en todas las ramas de la ciencia excepto en las que la tecnología no es capaz de llegar debido a la resolución de los equipos que capturan la información del objeto o simplemente a las dimensiones del objeto (menores a 0.3x0.3x0.3cm). Por esta razón es importante crear un sistema que permita ampliar los campos de la reconstrucción 3d para explorar y mejorar el rendimiento de muchos procesos que requieren personal especializado.

El desarrollo de este proyecto busca incentivar en pequeñas y grandes empresas el uso del sistema de reconstrucción por fotogrametría debido a su bajo costo y resultados de calidad, además, se podrá explotar muchas aplicaciones del prototipado 3D.

Las investigaciones de bioforma y entomología tendrán modelos anatómicos escalables y tangibles de especímenes tan pequeños que en la actualidad solo se pueden observar a través de fotografías o inspecciones con el microscopio lo que permitiría que menos animales sean sacrificados para su estudio, simplemente bastaría crear una base de datos digital donde se encuentren las reconstrucciones 3d de los especímenes que hay en la colección de insectos de museos, universidades, etc. ya que el sistema propuesto no es invasivo y no daña los objetos a reconstruir.

Desde otro punto de vista, es importante tener en cuenta que el sistema no solo se podría usar para el prototipado sino para obtener los planos de un objeto tan pequeño (menor a 0.3X0.3X0.3 cm) y con ellos poder realizar control de calidad o incluso ingeniería inversa. Es habitual encontrar objetos de estas dimensiones en sectores como la relojería, la joyería, la

mecatrónica etc., se podrían reconstruir piezas arqueológicas, fósiles, fragmentos dentales, texturas, etc., con gran precisión. Sin embargo, se deben tener en cuenta Cualidades de imagen que afectan negativamente al software de fotogrametría como lo son:

- Imágenes desenfocadas.
- Movimiento en el objeto fotografiado.
- Objetos transparentes y brillantes.
- Objetos entrecruzados.
- Texturas sin rasgos.
- Luces parpadeantes o en movimiento.
- Desenfoque de movimiento.
- Distorsión de la lente.
- Compresión JPEG.
- Sombras oscuras o imagen subexpuesta
- Sobreexposición o parches blancos en la imagen.

5.1. Pregunta de Diseño

A partir del análisis realizado en los ítems anteriores se plantea la siguiente pregunta de investigación, ¿Como se puede garantizar la digitalización 3D de un modelo a partir de un sistema estandarizado de captura de imágenes?

6. Metodología

Con el fin de establecer la metodología a seguir durante el proyecto, se establece una descripción de las actividades, las tareas, las técnicas y herramientas para llevar a cabo cada objetivo específico.

6.1. Fase Exploratoria

Comprende los OE1 y OE2, consiste en identificar las causas de la problemática, encontrar condiciones controladas y estandarizar el procedimiento de captura de imágenes.

Tabla 7.

Metodología Fase Exploratoria.

Objetivos	Actividad	Método	Resultados
1. Aplicar la técnica de fotogrametría a un objeto de control para definir las variables y condiciones ideales necesarias en la captura de las imágenes.	1.1 Escoger un objeto. 1.2 Investigar los esquemas de iluminación pertinentes para realizar la captura de datos. 1.3 Determinar qué tipo de croma (fondo de fotografía) a usar. 1.4 Seleccionar el software de reconstrucción 3D por fotogrametría. 1.5 Realizar el digitalizado del objeto combinando cada esquema de iluminación con cada croma y determinar los parámetros que utilizaremos en el proyecto con el fin de crear un entorno controlado.	1.1 Lista de chequeo con las características dimensionales de los objetos. 1.2 Realizar un estudio exploratorio acerca de los sistemas de iluminación. 1.3 Benchmarking. 1.4 Benchmarking. 1.5 Protocolo de validación	1.1 Tabla comparativa de los objetos puestos a prueba. 1.2 Matriz comparativa entre los esquemas encontrados. 1.3 Lista descriptiva. 1.4 Lista descriptiva y selección del software. 1.5 Matriz comparativa entre las combinaciones generadas y sus correspondientes digitalizados.

2. Identificar y comparar las técnicas de macrofotografía y así seleccionar la más adecuada para el proyecto.	<p>2.1 Investigar los métodos de macrofotografía y determinar cuáles métodos ofrecen las características deseadas.</p> <p>2.2 Seleccionar el software para el apilamiento por focus-stacking.</p> <p>2.3 Comparar los métodos realizando un focus-stacking a una réplica del objeto de control escalado a una dimensión de 0.3x0.3x0.3cm.</p>	<p>2.1 Realizar un estudio exploratorio acerca de los métodos de macrofotografía.</p> <p>2.2 Benchmarking.</p> <p>2.3 Matriz FODA</p>	<p>2.1 Tabla comparativa de los métodos de macrofotografía.</p> <p>2.2 Lista descriptiva y selección del software.</p> <p>2.3 Selección del método para lograr imágenes con un aumento mayor a 4x.</p>
---	---	---	--

6.2. Fase de Planificación y Diseño

Comprende el OE3, pretende reunir las condiciones iniciales para poder construir el sistema de captura de imágenes.

Tabla 8.

Metodología Fase de Planificación y Diseño.

Objetivos	Actividad	Método	Resultados
3. Diseñar y construir un montaje para realizar la captura de imágenes.	<p>3.1 Definir los requerimientos que debe tener el sistema de captura de imágenes</p> <p>3.2 Realizar un diseño para la captura de imágenes teniendo en cuenta los parámetros de fotogrametría escogidos y la técnica de fotogrametría escogida</p>	<p>3.1 Definir y evaluar atributos del dispositivo.</p> <p>3.2 Diseño de detalle y modelado 3d del dispositivo propuesto.</p> <p>3.3 Prototipado</p> <p>3.4 Elaboración del modelo funcional. Construcción y ensamblado del dispositivo de captura de datos.</p> <p>3.5 Prueba experimental</p>	<p>3.1 Lista de requerimientos teniendo en cuenta el usuario.</p> <p>3.2 planos del montaje</p> <p>3.3 Modelo funcional</p>

6.3. Fase de Análisis y Evaluación

Comprende OE4 y OE5, pretende establecer una secuencia de uso del sistema de captura y comprobar que el sistema construido funciona.

Tabla 9.

Metodología Fase de Análisis y Evaluación.

Objetivos	Actividad	Método	Resultados
4. Proponer una secuencia de trabajo que abarque la captura de información el procesado de esta y su posterior prototipado	4.1 Ordenar los procesos de la manera más eficiente.	4.1 Diagrama de Gantt	4.1 Secuencia de trabajo
5. Verificar el correcto funcionamiento del sistema propuesto construyendo un modelo a escala de un objeto de dimensiones inferiores a 0.3x0.3x0.3cm.	5.1 Seleccionar tres objetos con características de textura y forma diferentes pero que sus dimensiones no sobrepasen los 0.3x0.3x0.3cm. 5.2 Obtener el modelado 3d de los objetos siguiendo la secuencia de uso propuesta. 5.3 Prototipar los tres objetos. 5.4 Comparar los atributos del objeto real, el modelo digital y el modelo prototipado, para determinar el porcentaje de atributos que se pierden durante el proceso de digitalizado.	5.1 Lista de chequeo con las características dimensionales de los objetos. 5.2 Hacer uso de un software de reconstrucción 3d y utilizar las imágenes recolectadas con el dispositivo. 5.3 Impresión 3d por adición de material 5.4 Matriz de comparación y contraste.	5.1 Tabla con los objetos seleccionados y sus características. 5.2 Tres modelados digitales 5.3 Tres replicas impresas en 3d escala 100:1 5.4 Tabla comparativa con los atributos del objeto real, el modelo digital y el modelo prototipado.

7. Desarrollo del Proyecto

Considerando la metodología del capítulo anterior se desarrolla el proyecto realizando las actividades propuestas en su orden estipulado: fase exploratoria, fase de planificación, fase de análisis y evaluación.

7.1. Fase Exploratoria

7.1.1. Escoger un objeto

Se escogió un objeto con características que según el marco teórico garantizaran una buena fotogrametría.

Lista de chequeo:

- Objeto opaco
- Dimensiones mayores a 10 cm
- No ser translucido
- Sin colores sólidos
- Asimétrico

Figura 2.

Selección de Objeto.



El objetivo de seleccionar un objeto con estas características fue eliminar las variables que, según la literatura (Guerrero, s.f.), podrían arruinar la fotogrametría y sesgar los resultados obtenidos en los modelos 3d.

7.1.2. Esquemas de Iluminación

La calidad de una reconstrucción 3d por fotogrametría siempre depende de la calidad de las imágenes obtenidas, por lo que se debe centrar la atención tanto en el equipo con el que se capturan como en la iluminación del objeto.

Fuentes de luz para fotografía:

- Luz natural
- Flashes
- Luz continua artificial

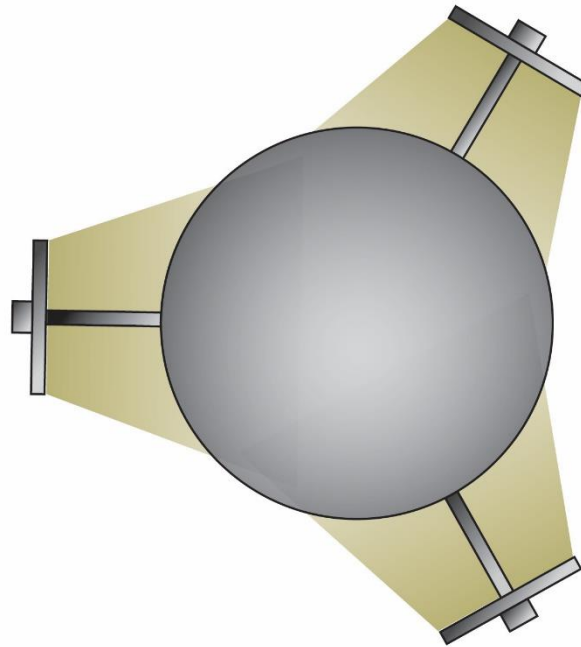
Según el marco teórico en fotogrametría se debe hacer un barrido de imágenes 360 al objeto a modelar, por lo que el procesamiento es de un volumen considerable de imágenes independientemente del tamaño del objeto, por lo tanto, se descartó el uso de flashes en este proyecto ya que controlar los rebotes en los objetos y paredes del recinto donde se capturan las imágenes requiere de un experto en iluminación y la vida útil promedio de un equipo de estos es de 48000 disparos lo que supondría una inversión costosa. En cuanto a la luz natural se descartó pensando en la posibilidad de hacer capturas fotográficas en la noche y el hecho de no poder controlar los parámetros de está dificulta la captura de imágenes a lo largo del día.

Es importante aclarar que la fotogrametría requiere de imágenes donde aprecien todos los detalles del objeto, es decir una imagen de bajo contraste donde se distingan todos los detalles sin zonas sobre expuestas ni zonas subexpuestas por lo que se descartaron todos los esquemas clásicos

(Rembrandt, Paramount, etc.) y se tuvo en cuenta los esquemas donde el objeto quede completamente iluminado por una luz difusa y envolvente que no genere sombras sobre el objeto.

Figura 3.

Esquema de tres luces laterales.



7.1.3. Fondo o Ambiente

En esta etapa se determinaron los fondos que se pueden utilizar en fotogrametría para obtener la mejor calidad en el modelo 3d, teniendo en cuenta calidad del modelo digital y método de fotogrametría (manteniendo la cámara fija o haciendo una rotación 360 con la cámara).

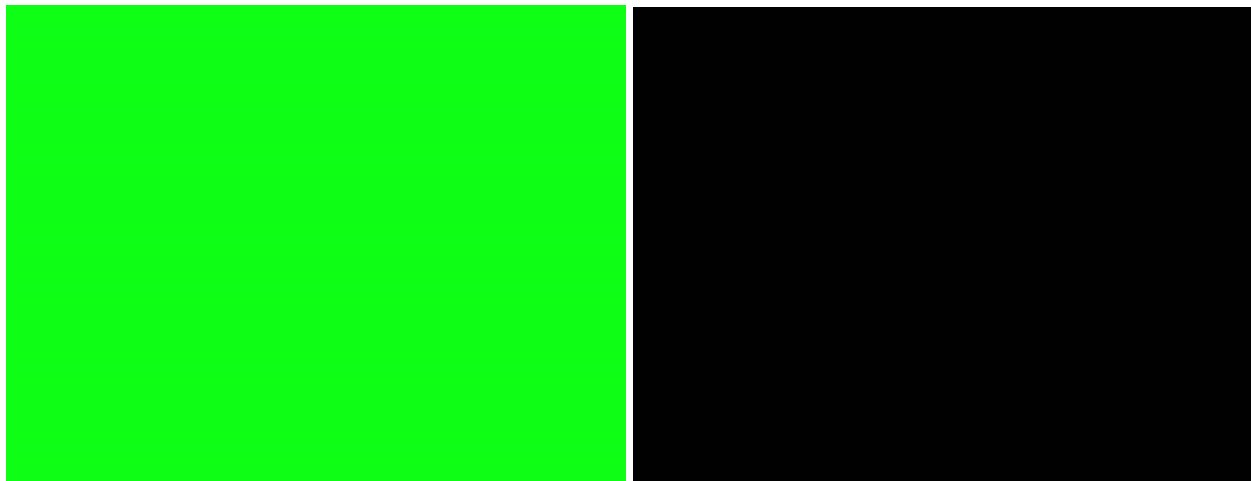
Según el marco teórico existen dos esquemas para realizar fotogrametría, para el primer esquema figura 4 (croma verde) se requiere que la cámara haga un barrido de 360° al objeto por lo que el software debe reconocer esta acción, se recomienda un fondo que no sea uniforme es decir que presente puntos de referencia como colores, texturas y formas diferentes. Por lo tanto,

para el esquema uno no se utilizó ningún cromas o fondo de color simplemente el fondo se ambientó por el recinto donde se hizo la captura de las imágenes.

Para el segundo esquema (con la cámara fija) figura 4 (fondo negro), es necesario que el software no encuentre puntos de referencia en el fondo por lo que se requiere de fondos totalmente planos como lo son los cromas (verde o azul) sin embargo otros programas están diseñados para ignorar los fondos blancos y negros, por esta razón para el esquema dos se utilizó el fondo recomendado por el desarrollador del software (Agisoft Metashape) que recomienda el cromas verde para fotografías que requieren de una máscara de recorte y el fondo negro mate para fotografías de objetos pequeños.

Figura 4.

Croma verde para Esquema 1 y Fondo negro para Esquema 2 respectivamente.



7.1.3.1. Software de Reconstrucción 3D por Fotogrametría

Para la selección del software se hizo una selección de tecnologías para determinar las características y requerimientos de los softwares más utilizados para la reconstrucción 3d y así poder seleccionar el más adecuado para este proyecto.

Tabla 10.*Software de Reconstrucción 3D por Fotogrametría.*

Software	Método de Captura de Imágenes		
	Cámara	Smartphone	Dron
Autodesk Recap	Si	No	Si
Agisoft Metashape	Si	Si	Si
Alicevision Meshroom	Si	Si	Si
Pix4d	No	Si	Si
Photomodeler Technologies	No	No	Si
3DF Zephyr	Si	No	Si
Webodm	No	No	Si
Trimble Inpho	No	No	Si
Regard3D	Si	No	No

Teniendo en cuenta el marco teórico se descartaron los programas cuyo método de captura no incluye la cámara, ya que el objetivo fue utilizar la mejor calidad en la captura de imágenes.

Requerimiento de Hardware

Tabla 11.*Especificaciones mínimas del sistema según hardware.*

Especificaciones Mínimas Del Sistema

Autodesk Recap

Memoria RAM de 4 GB o más

CPU	Procesador Intel o AMD cpus (2019 o más)
-----	--

Tarjeta gráfica	Dispositivo de gráficos compatible con OpenGL 3.1 con 256 MB de memoria gráfica
-----------------	---

Agisoft Metashape

Memoria	DDR3-1600, 4 x 2 GB (8 GB en total) o 4 x 4 GB (16 GB en total)
---------	---

CPU	Intel Core i5 de cuatro núcleos, Socket LGA 1150 o 1155 o Amd Ryzen 5 3400 o más
-----	--

Tarjeta gráfica	GPU: Nvidia GeForce GTX 980 o GeForce GTX 1080
-----------------	--

Alice Visión Meshroom

Memoria	DDR4-2133 o DDR3-1600, 8 x 4 GB (32 GB en total) o 8 x 8 GB (64 GB en total)
---------	--

CPU	Procesador Intel o AMD cpus (2019 o más)
-----	--

Tarjeta gráfica	NVIDIA CUDA-enabled GPU (compute capability >= 2.0)
-----------------	---

Zephyr

Memoria	DDR4-2133 o DDR3-1600, 4 x 4 GB (16 GB en total)
---------	--

CPU	Procesador Intel o AMD cpus (2.5 Ghz.)
-----	--

Tarjeta gráfica	Dispositivo de gráficos compatible con OpenGL 3.1 con 256 MB de memoria gráfica
-----------------	---

Regard3D

Memoria RAM	DDR4-2133 o DDR3-1600, 4 x 4 GB (16 GB en total)
-------------	--

CPU	CPU quad-core o hexa-core Intel i7/Intel i9/Threadripper/Xeon/.
-----	---

Tarjeta gráfica	GPU compatible con OpenGL 3.2 y 2 GB de RAM. Disco duro: SSD.
-----------------	---

Capturing Reality

Memoria RAM	DDR4-2133 o DDR3-1600, 8GB
CPU	Supporting SSE 4.2.
Tarjeta gráfica	NVIDIA card with 1GB VRAM and CUDA 3.0+

Tabla 12.

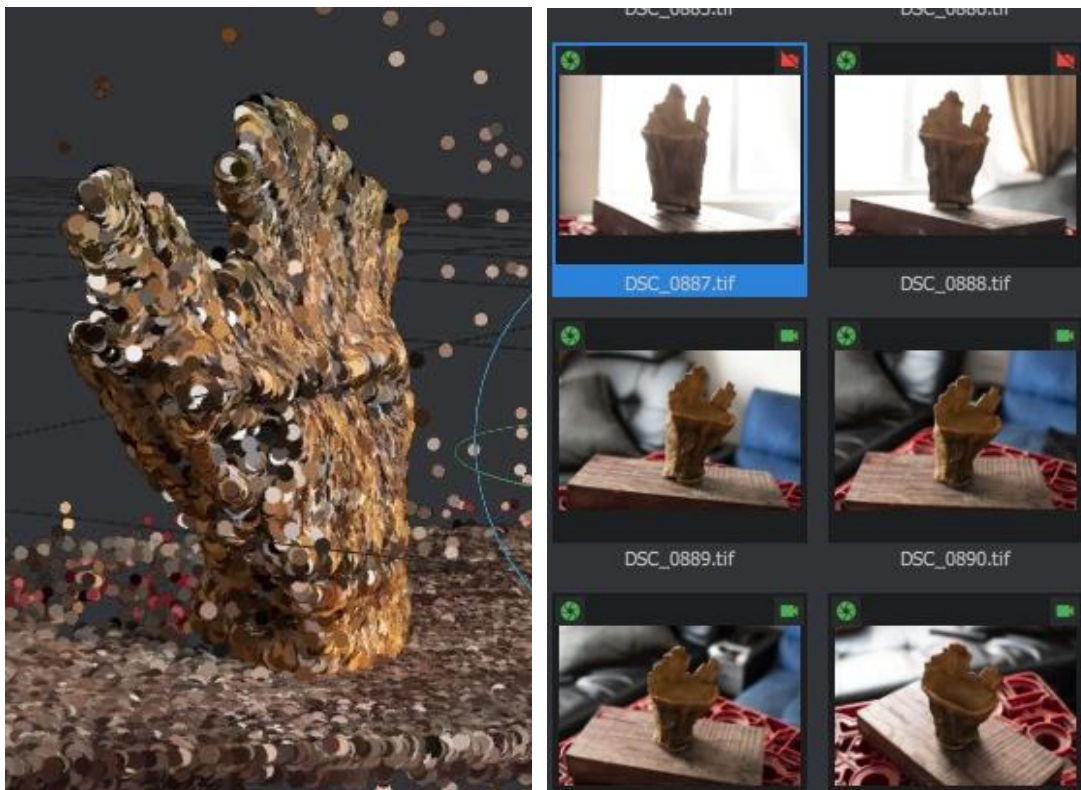
Descripción de los softwares.

Software	Características generales	Costo
Autodesk Recap	Software centrado en la reconstrucción de entornos arquitectónicos, tanto de recintos cerrados, edificaciones o exteriores.	\$340 US al año
Agisoft Metashape	El software más completo de fotogrametría, sirve tanto para reconstrucciones de objeto cercano como para cartografía. Sus funciones intuitivas y su generación de texturas, es ideal a la hora de producir un resultado realista	\$179 US al año
Alice Visión Meshroom	Digitalización de objetos a partir de fotografía o videos, es gratis y de código abierto permitiendo actualizaciones constantes. Como desventaja presenta un soporte técnico que se limita a su comunidad de usuarios. Cuenta con un módulo programable poco intuitivo para la configuración de los parámetros.	Gratis
3DF Zephyr	Software de digitalizado 3D centrado en elementos del entorno y espacios, Cuenta con una versión gratuita sin mayores prestaciones y varios planes pagos. Como ventaja presenta un flujo de trabajo muy intuitivo y en caso de querer sacar el máximo potencial opciones avanzadas	Versión Gratuita; Planes pagos desde \$149 US hasta \$390 US
Regard3D	Software de reconstrucción 3D de código abierto con resultados de muy baja fidelidad	Gratis

Partiendo de las características de los softwares mencionados se decidió probar el líder en el mercado (**Agisoft Metashape**) y la mejor opción gratuita (**Alice Visión Meshroom**) para compararlos, obteniendo como resultado:

Figura 5. Nube de puntos Alice Visión Meshroom

Nube de puntos Alice Visión Meshroom.

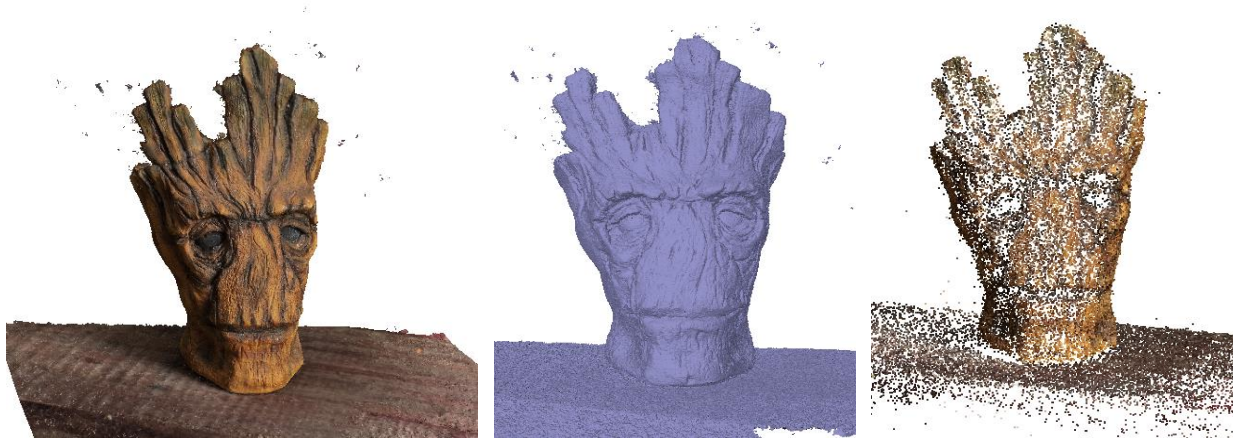


Siguiendo el flujo de trabajo propuesto por cada uno de los softwares y utilizando las mismas fotografías se obtuvieron 2 resultados muy diferentes, la primera quedó inconclusa y no reconoció varios de los ángulos capturados. **El procedimiento tardó aproximadamente 2 horas y 30 minutos y no concluyó.**

Por otro lado, en Agisoft Metashape el proceso tardó alrededor de 45 min incluyendo la nube densa, la aplicación de las texturas y la exportación del modelo.

Figura 6.

Nube de puntos y nube densa en Agisoft Metashape.



Según los requerimientos mínimos de hardware, la duración del proceso y la eficacia de este el software más apropiado para la ejecución del Proyecto fue Agisoft Metashape, debido a que no requiere un equipo especializado ni costoso para la reconstrucción 3d por lo tanto puede ser utilizado por un usuario que recién llega al campo de la fotogrametría.

- Atributos del software seleccionado:
- Procesamiento de varios tipos de imágenes: aéreas (nadir, oblicuas) y de corto alcance.
- Calibración automática: marco (incl. ojo de pez), cámaras esféricas y cilíndricas.
- Texturas foto realistas: Compatibilidad con HDR y archivos múltiples.
- Reconstruidos en secuencia de tiempo.
- Herramientas incorporadas para medir distancias, áreas y volúmenes.
- Corrección de color para una textura homogénea.
- Clasificación de puntos para personalizar la reconstrucción geométrica.

7.1.3.2. Reconstrucción 3D

Para determinar los parámetros que se utilizan en el proyecto se realizó una serie de reconstrucciones 3D del objeto seleccionado, utilizando el esquema de iluminación, los fondos propuestos y el software seleccionado.

Para la **Actividad 1** se utilizó el primer esquema de fotogrametría figura 1 que consiste en rotar la cámara alrededor del objeto seleccionado para capturar las imágenes.

NOTA: es importante aclarar que para el primer esquema de fotogrametría no se tuvo en cuenta los fondos o cromas de color. ya que al ser una toma de 360° el fondo debe tener variaciones de contraste y formas para que el software determine que efectivamente se está haciendo una rotación alrededor del objeto.

Figura 7.

Fotografías Primera Actividad.



Tabla 13.

Especificaciones de la Actividad 1.

Especificaciones de la Actividad 1	
Número de Fotos	55

Ángulo	15°
Cámara	Nikon D7500
Lente	35 mm
Iluminación	Octabox con luz continua

Resultados Fotogrametría Actividad 1

El software ajustó los ángulos desde los que se tomaron las imágenes. Después se creó una nube de puntos que debe asemejarse al objeto fotografiado como se observa en la **Figura 6**, una vez completado este proceso se triangularon los puntos para obtener un modelo sólido sin textura

Figura 8.

Nube de puntos y Nube densa, respectivamente.



En el siguiente paso, el software fusionó la nube de puntos y los convirtió en una malla poligonal. Luego el software realizó el mapeo de texturas y una vez terminado el proceso se pudo exportar el modelo 3D.

Figura 9.

Sólido con textura y Error de construcción en parte posterior, respectivamente.



Sin embargo, el resultado de la **Actividad 1** presentó un error en la reconstrucción por subexposición de las fotos posteriores del modelo, debido a que se contaba solamente con una fuente de luz natural, por consiguiente, para las siguientes actividades se realizaron con luz artificial.

Figura 10.

Detalle de textura.



La luz natural proveniente del sol está se afecta por el clima y constantemente cambia ya sea por el movimiento del sol o por el paso de las nubes, generando leves cambios en la luz que incide en el objeto, por lo que la textura que se obtuvo en la **Figura 8** no está totalmente nítida.

Para la **Actividad 2** se realizó el segundo esquema de fotogrametría **Figura 2** siguiendo las indicaciones se hace una rotación de 180° del objeto seleccionado para realizar la capturar las imágenes, en las que se utilizó un fondo o croma de color verde con el fin de eliminar patrones en el fondo que entorpezcan la reconstrucción.

Figura 11.

Fotografías Actividad 2.



Tabla 14.

Especificaciones Actividad 2.

Especificaciones de la Actividad 2	
Número de Fotos	40
Ángulo	15°
Cámara	Nikon D7500
Lente	35 mm

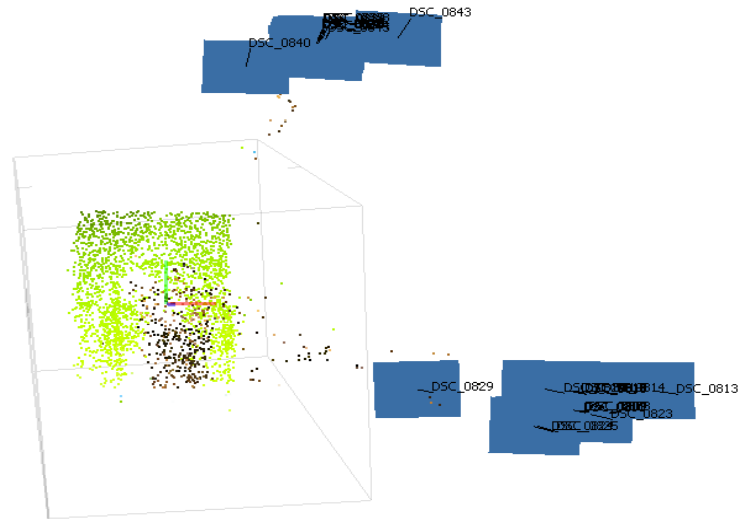
Iluminación

Octabox con luz continua

Resultados Fotogrametría Actividad 2

Figura 12.

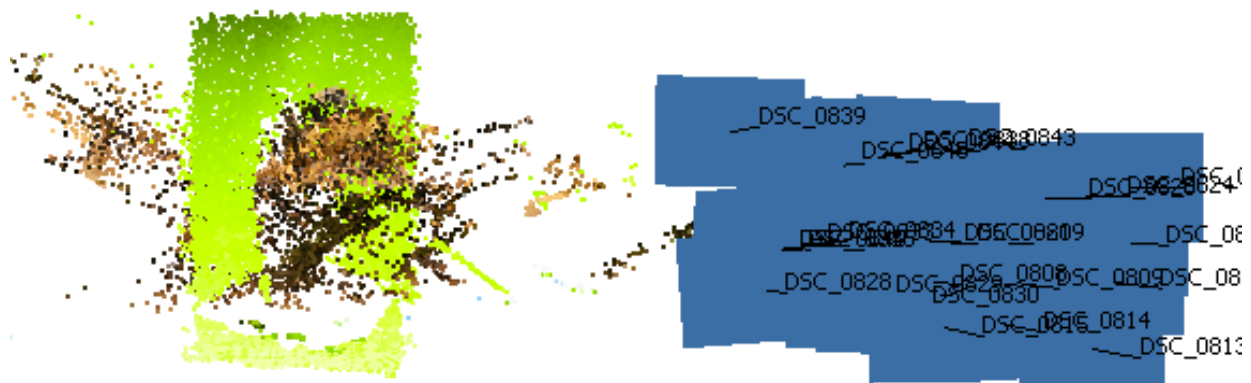
Error de reconstrucción nube de puntos.



El software no reconoció la rotación por lo que la nube de puntos es indeterminada, el programa asimió que todas las fotos fueron tomadas desde el mismo punto por lo que se recomienda crear una máscara de recorte para que reconozca la rotación.

Figura 13.

Error de reconstrucción utilizando máscaras de capa.



El software no reconoció la rotación por lo tanto a partir de esta actividad se descartó el croma verde para la captura de imágenes.

La **Actividad 2** se realizó con luz artificial para evitar los problemas de subexposición de las fotos tomadas en la **Actividad 1**, dio como resultado un conjunto de puntos aleatorios que no se asemejaban al modelo fotografiado, además existen puntos del color de fondo (verde) lo que indicó que el software no logró diferenciar el objeto del fondo. Por lo tanto, en esta actividad se concluyó que el croma verde no es el indicado para realizar la fotogrametría del proyecto.

Para la **Actividad 3** se realizó el segundo esquema de fotogrametría **Figura 2** siguiendo las indicaciones se hace una rotación de 180° del objeto seleccionado para realizar la capturar las imágenes, en las que se utilizó un fondo o croma de color negro con el fin de eliminar patrones en el fondo que entorpezcan la reconstrucción.

Figura 14.

Fotografías Actividad 3.



Tabla 15.

Especificaciones Actividad 3.

Especificaciones de la Actividad 3

Número de Fotos	38
Ángulo	15°
Cámara	Nikon D7500
Lente	35 mm
Iluminación	Octabox con luz continua

Resultados Fotogrametría Actividad 3

Figura 15.

Nube de puntos y Nube densa, respectivamente.

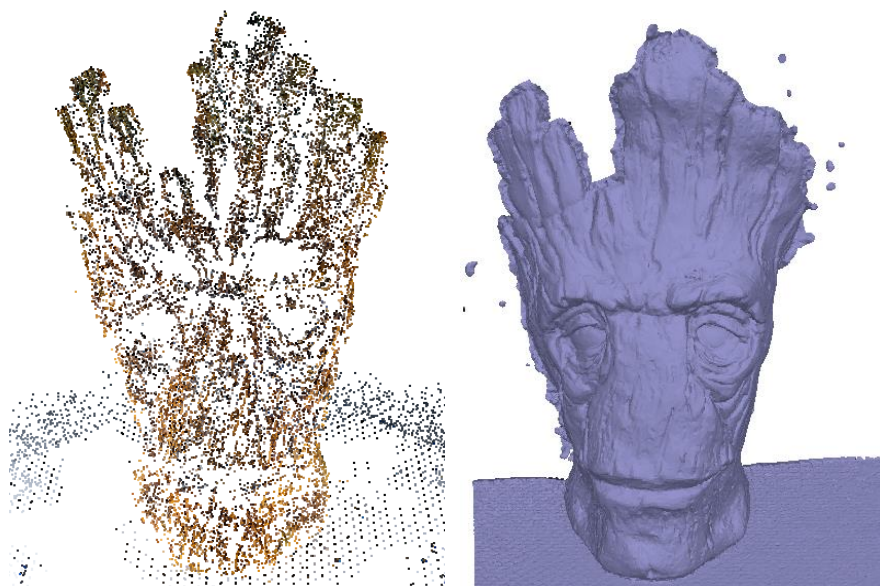


Figura 16.

Sólido con textura y Sólido con textura y altas luces, respectivamente.



Figura 17.

Detalle de textura.



Para la **Actividad 4** se realizó el segundo esquema de fotogrametría **Figura 2** a un objeto con dimensiones inferiores a (5cmx5cmx5cm) tales que un escáner convencional no reconozca o que tenga problemas para reconocerlo, siguiendo las indicaciones se hizo una rotación de 180° del

objeto seleccionado para realizar la capturar las imágenes, en las que se utilizó un fondo o croma de color negro con el fin de eliminar patrones en el fondo que entorpezcan la reconstrucción.

Figura 18.

Fotografías Actividad 4.



Tabla 16.

Especificaciones Actividad 4.

Especificaciones de la Actividad 4	
Número de Fotos	40
Ángulo	15°
Cámara	Nikon D7500
Lente	35 mm
Iluminación	Octabox con luz continua

Resultados Fotogrametría Actividad 4

Figura 19.

Error de reconstrucción por superficies brillantes.



A continuación, se aplicó talco para reducir los brillos y se realizó de nuevo la reconstrucción.

Figura 20.

Fotografías cuarta actividad eliminando brillos con talco.

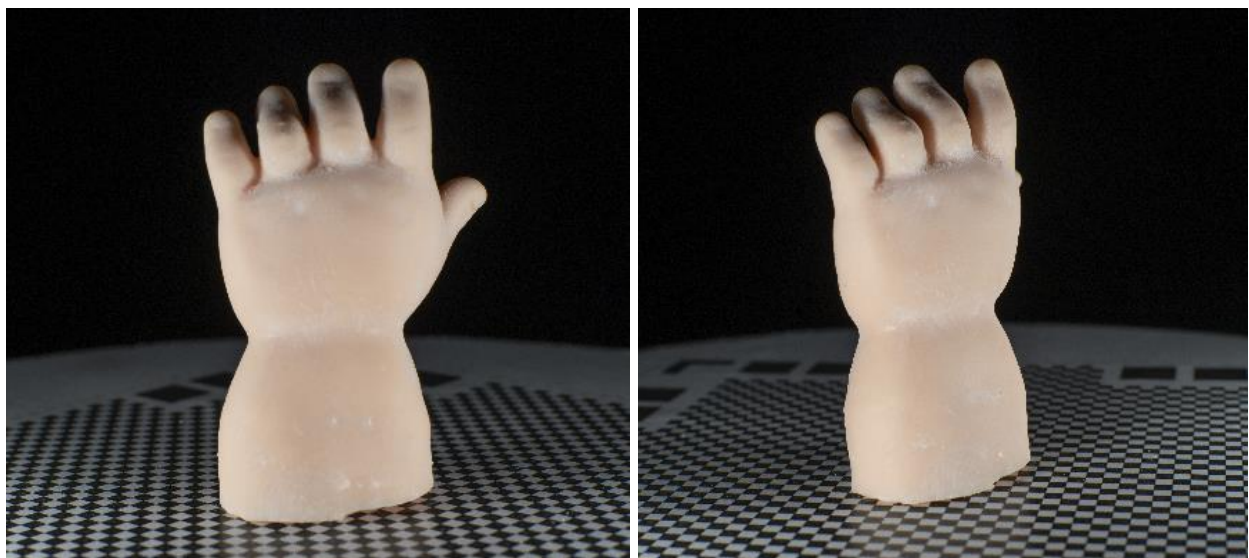


Figura 21.*Reconstrucción corregida.***Tabla 17.***Retroalimentación de las actividades.*

Errores cometidos	Solución	Resultado
Dejar Zonas subexpuestas debido a que la luz natural es una fuente de luz dura que produce sombras marcadas sobre el objeto.	Utilizar un esquema de iluminación controlado para lograr una luz envolvente que elimine las zonas subexpuestas.	Superficie del objeto totalmente iluminado si sombras y expuesto correctamente.
Utilizar un croma de color verde causa que el software lo identifique como parte del objeto.	Eliminar el fondo o reemplazarlo por un croma negro.	El software no tiene puntos de referencia en el fondo por lo que asume que el objeto está girando y genera la reconstrucción perfectamente.

No colocar un patrón de referencia para la superficie donde se coloca el objeto.	Imprimir patrón geométrico para colocar el objeto.	El patrón geométrico ayuda al software a ubicar espacialmente el objeto por lo que se reduce el tiempo de reconstrucción 3d
Hacer el proceso de fotogrametría a objetos brillantes.	Recubrir la superficie del objeto con alguna sustancia que elimine el brillo (talco, pintura mate).	Superficie del objeto mate que permite, realizar las capturas sin obtener reflejos no deseados.
Aplicar la corrección de lente durante el postprocesado de las imágenes.	Durante el postprocesado solo editar los parámetros de iluminación, aplicarlos a todas las imágenes por igual y no afectar la proporción o tamaño de la imagen.	Evitar la deformación de las proporciones de la imagen y los posibles inconvenientes en la reconstrucción 3D.

7.1.3.3. Métodos de macrofotografía

A continuación, se define las alternativas de macrofotografía con un brainstorming de todas las técnicas que posiblemente se pueden usar para la captura de imágenes del proyecto, teniendo en cuenta el número de fotografías, lente u objetivo fotográfico, aumentos, profundidad de campo y tiempo de exposición.

Figura 22.

Alternativa 1 Macrofotografía.



Esta alternativa consiste en aumentar la distancia focal entre el objeto y el plano focal de tal manera se logra un mayor acercamiento y se reduce la distancia mínima de enfoque.

Figura 23.

Alternativa 2 Macrofotografía.



La segunda alternativa se basa en un objetivo o lente macro, que gracias a su configuración de cristales permite realizar fotografías con rangos de aumento de 0.5x a 1.5x, sin necesidad de accesorios extra.

Figura 24.

Alternativa 3 Macrofotografía.



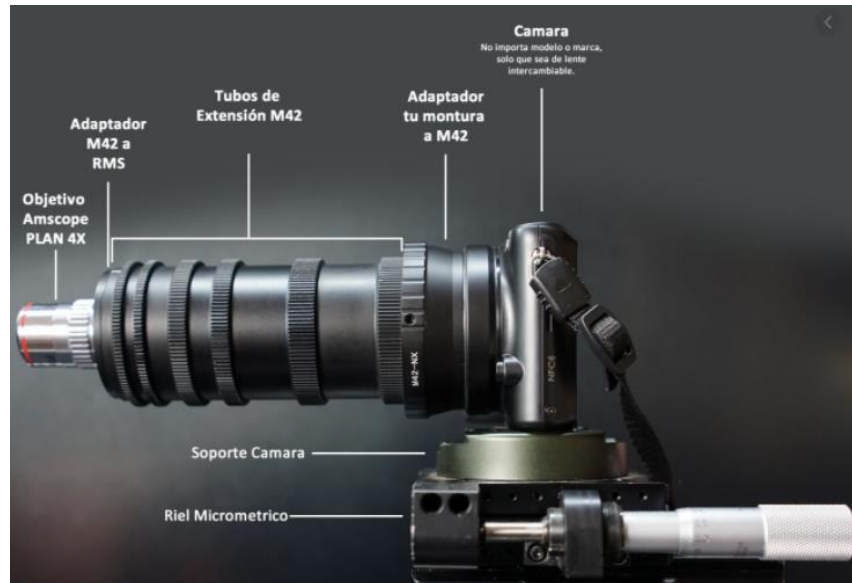
La tercera alternativa es el anillo inversor que consiste en un accesorio de doble rosca que se acopla a cualquier objetivo para invertirlo y de esta forma conseguir un acercamiento de aproximadamente 1x.

Figura 25.

Alternativa 4 Macrofotografía.



La alternativa 4 consiste en hacer acople que permita conectar un objetivo de microscopio a la cámara de tal manera que el sensor de esta pueda capturar imágenes con aumentos de hasta 10x.

Figura 26.*Alternativa 5 Macrofotografía.*

La quinta alternativa es una combinación de las alternativas 1 y 4 y consiste en utilizar los tubos de extensión para aumentar la distancia focal del lente de microscopia de esta forma se consiguen aumentos mayores a los 12x consideradas como macro extremo.

7.1.4. Evaluación de Conceptos

Se desarrolló la matriz comparativa de conceptos, que relaciona todas las alternativas entre sí con relación a características respectivas a los requerimientos del proyecto. Estos resultados fueron recogidos en la siguiente tabla.

Tabla 18.*Comparativa Alternativas de Macrofotografía.*

Características	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
(Objeto de 3mm)	1	2	3	4	5
Número de fotografías	17	1	33	160	1000 aprox

Lente u objetivo fotográfico	Tubos de extensión o fuelle	Nikon 105mm micronikor serie g	Nikon 35mm serie g + anillo inversor	Mitutoyo 4x	Mitutoyo 6x + tubos de extensión
Magnificación	0.9x	0.45x	1x	4x	10x
Profundidad de campo (mm)	0.21	3.33	0.11	0.018	0.0027
Tiempo de exposición(segundos) Con luz continua	1.6	1/60	1/30	+de 1	+de 1
Incremento seguro para apilamiento (20% solapamiento) (mm)	0.17	2.66	0.09	0.015	0.0022
Nueva distancia mínima de enfoque(mm)	421.1	314	-----	312	1325

Nota: Los datos de la tabla son aproximados y son tomados por un software de calculadora para macrofotografía disponible en línea: <https://www.photopills.com/es/calculadoras/pdc-macro>

Teniendo en cuenta la tabla anterior se descartó la **alternativa 5** cuya profundidad de campo es menor a 0.001, el volumen de imágenes que se necesita para realizar un esquema de fotogrametría con esta alternativa sería superior a las 25000 fotos por lo que resulta complejo lograr que el programa reconozca todas las imágenes y el equipo utilizado debe ser de nivel profesional haciendo que cualquier usuario no tenga acceso al uso del proyecto. Por otro lado, la vida útil de una cámara ronda las 500.000 obturaciones por lo que sería ilógico que con un equipo nuevo solo se logaran obtener 20 reconstrucciones.

La **alternativa 3** a pesar de tener buenas características se descartó por ser un método que presenta varios inconvenientes técnicos, en primer lugar, la perdida de la conexión electrónica entre el objetivo y la cámara, por lo que cualquier tipo de automatismo se perderá obligando al usuario a enfocar acercando o alejando la cámara del objeto (ni siquiera se puede utilizar el anillo de enfoque). En segundo lugar, el diafragma queda bloqueado en su menor apertura reduciendo

considerablemente la entrada de luz y generando aberraciones cromáticas que echarían a perder la fotogrametría, en la actualidad se ha logrado corregir este problema de manera artesanal colocando un sujetador (masilla, alambre, cuerda, etc.) en la palanquilla de enfoque **figura 25** de tal manera que esta palanquilla quede fija en una apertura aproximada a la deseada. Por esta razón no se tuvo en cuenta esta alternativa ya que en macrofotografía y fotogrametría la calidad depende de la precisión de la captura de las imágenes.

Las **alternativas 1 y 4** tienen características que se acomodan al objetivo del proyecto sin embargo ambas alternativas presentan el mismo inconveniente, durante el apilamiento de las imágenes en focus stacking el software debe interpolar el tamaño de las imágenes para poder encajarlas y generar una imagen única, como consecuencia cada una de las tomas realizadas tendrá una deformación dependiendo de cada angulación generando conflictos en la reconstrucción del mismo.

Figura 27.

Comparación proporción antes y después de realizar el focus stacking.

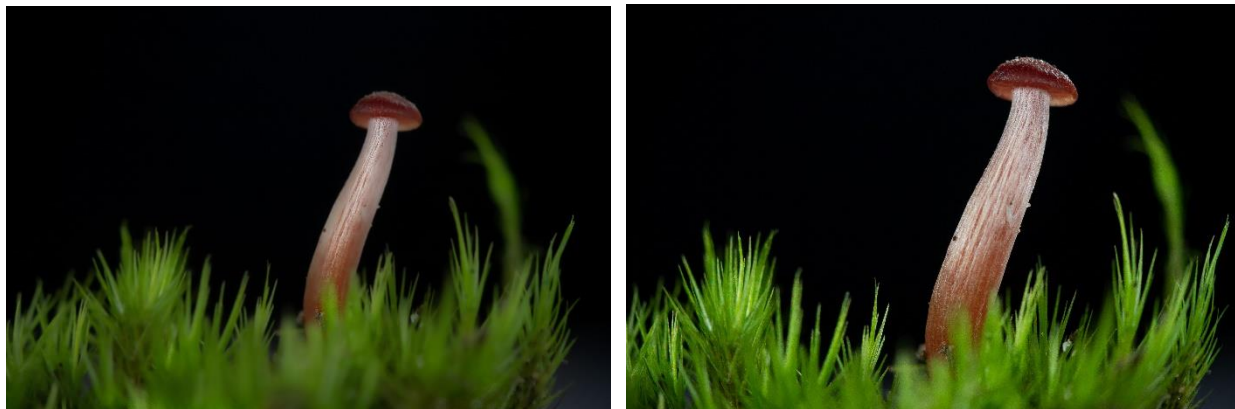


Figura 28.

Superposición de imágenes.



En la **figura 28** se evidencia el cambio de proporción al realizar un focus stacking, por esta razón no se recomienda hacer fotogrametría partiendo de fotos realizadas con esta técnica.

La **alternativa 2** resultó ser la más eficaz, teniendo el menor número de capturas, menor equipo requerido además de ser la alternativa que se adapta a todas las variables requeridas.

Figura 29.

Palanquilla de Enfoque.



7.1.4.1. Software de Apilamiento por Focus Staking

Para la selección del software se hizo una selección de tecnologías para determinar las características y requerimientos de los softwares más especializados en apilamiento de imágenes por focus staking y así poder seleccionar el más adecuado para este proyecto.

Helicon Focus y **Zerene Stacker** son los mejores programas actuales para focus stacking (más rápidos, mejores resultados, mejores herramientas de retoque). También existen otras opciones con las que se puede hacer focus stacking como Photoshop, e incluso con software gratis como Combine ZP, pero en este caso la reconstrucción depende directamente de la calidad del apilamiento por eso se usaron programas específicos y especializados solo en apilamientos.

Tabla 19.

Especificaciones del Sistema Según Software.

Helicon Focus	
Memoria RAM	DDR4-2133 o DDR3-1600, 4 GB
CPU	CPU quad-core
Tarjeta gráfica	GPU compatible con OpenGL 3.2 y 2 GB de RAM. Disco duro: SSD.
Zerene Stacker	
Memoria RAM	DDR4-2133 o DDR3-1600, 8GB
CPU	CPU quad-core
Tarjeta gráfica	GPU: Nvidia GeForce GTX 980 o GeForce GTX 1080

Dado que los dos programas propuestos tienen características similares en cuanto a la calidad de imagen se eligió Zerene Stacker por su interfaz intuitiva que permite una fácil comprensión del proceso a seguir además nos brinda un modo de pre programación en el que asigna un flujo de trabajo predeterminado que permite que un usuario sin conocimientos especializados realice un apilado solo con cargar las fotos al software. A continuación, se listan las características más importantes del software elegido.

- Imágenes de salida de la más alta calidad, especialmente en casos difíciles
- Alineación e interpolación precisas y sólidas
- Algoritmos de apilamiento avanzados
- Manejo limpio de pelos y cerdas, sin halos ni líneas de contorno
- Conserva los detalles de bajo contraste y evita la "acumulación de neblina" con apilados profundos
- El retoque rápido y flexible facilita la combinación de las mejores características de múltiples algoritmos, así como marcos originales.
- Admite archivos de entrada y salida de 8 y 16 bits
- Puede generar animaciones de balanceo estéreo y 3-D a partir de una sola pila, incluso para sujetos difíciles con superposiciones estructurales y cerdas.
- Utiliza completamente los procesadores multinúcleo y multiprocesador
- Funciona en los principales sistemas informáticos: Microsoft Windows, Macintosh, Linux.

7.2. Fase de Planificación y Diseño

Con los parámetros ya establecidos en la fase exploratoria se desarrolla el diseño de un montaje que permita capturar las imágenes para realizar los esquemas de fotogrametría.

7.2.1. Requerimientos del Montaje

- Plataforma giratoria
- Tres fuentes de luz continua y difusa que giren junto a la plataforma ubicadas cada 120°
- Controlador para la plataforma
- Interfaz intuitiva
- Patrón de referencia en la superficie donde se coloca el objeto
- Fondo negro
- Control de rotación de la plataforma grado por grado
- Riel micrométrico
- Trípode robusto
- Cámara réflex
- Objetivo Nikon macro 105 mm serie G

7.2.2. Diseño del Montaje

Es importante aclarar que el diseño se realizó en dos partes ya que el montaje requiere de una automatización, por lo que se requiere de un experto para la fabricación de las partes electrónicas y una vez programadas, se procedió con el diseño de la parte mecánica y estética. Se tomó esta decisión teniendo en cuenta que las partes electrónicas (arduino, pantalla, botones,

baterías, etc.) fueron elegidas por el ingeniero electrónico y se desconoce las dimensiones de estos elementos impidiendo tener una idea de la distribución del montaje.

7.2.2.1. Diseño Controlador Electrónico de la Plataforma de Fotogrametría

Para el diseño del controlador se contactó a un ingeniero electrónico para la construcción y programación de todo el sistema, se exigieron las siguientes acciones y características que debía tener el controlador:

- Plataforma giratoria.
- Debe tener un botón de encendido y apagado.
- En el momento de encender la plataforma regresa a su punto inicial en el ángulo 0 para iniciar con la fotogrametría.
- Cuando se encienda la plataforma automáticamente se enciende la iluminación del sistema.
- Debe tener dos modos uno semiautomático que se activa manualmente con un botón asignado y un modo automático que es para fotogrametrías avanzadas que se activa con otro botón diferente.
- Debe tener un botón para avanzar un ángulo determinado y un botón para retroceder el mismo ángulo.
- El sistema debe contar con un control de aceleración y desaceleración para lograr un movimiento fluido sin cambios de velocidad abruptos.
- Para mejorar la experiencia del usuario el sistema debe tener una pantalla LCD que muestre cuando este encendido el sistema, cuantos grados avanzara, en qué modo se encuentra y que permita ver las configuraciones de velocidad y grados a recorrer.



- Todo el circuito debe ser compacto y sin cables, todo debe estar prototipado en una placa base de baquelita.

Después de analizar los requerimientos técnicos se determinan los materiales más apropiados para la construcción del controlador.

Materiales básicos para el sistema de control de la plataforma

Tabla 20.

Materiales Básicos para el Sistema de Control de Plataforma.

Nº	Nombre	Imagen
1	Teclado Arduino Panel Botones Analógico Para Control	
2	Motor Paso A Paso 28byj-48	

3 Módulo Controlador UIn2003 De Motor Paso A Paso



4 Módulo Relevo Rele 1 Canal 5v Arduino



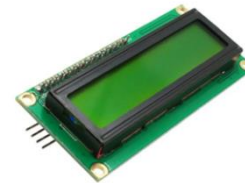
5 Tarjeta Compatible Arduino Nano Con Conversor Usb Ft232rl



6 Regulador De Voltaje Lm 2596 Dc-dc



7 Display Lcd 16x2 Módulo I2c Incluido Arduino
Pantalla 2x16



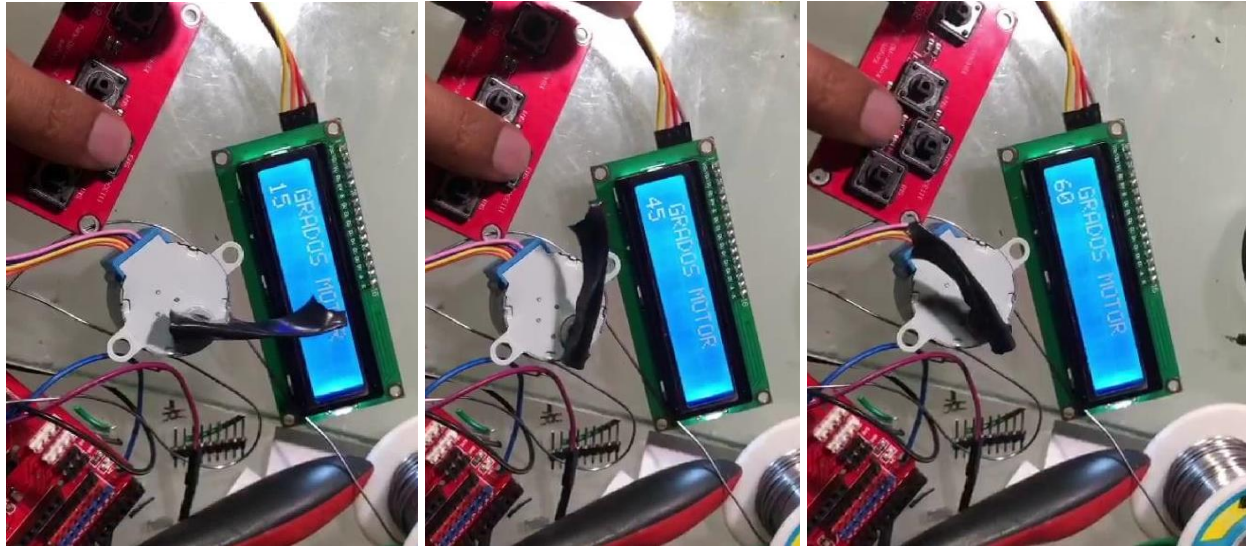
8 Baquelita Una Cara De Cobre



A continuación, se muestra la primera prueba del controlador donde se verificaron las funciones básicas para proceder con el prototipado de la placa de baquelita y cobre.

Figura 30.

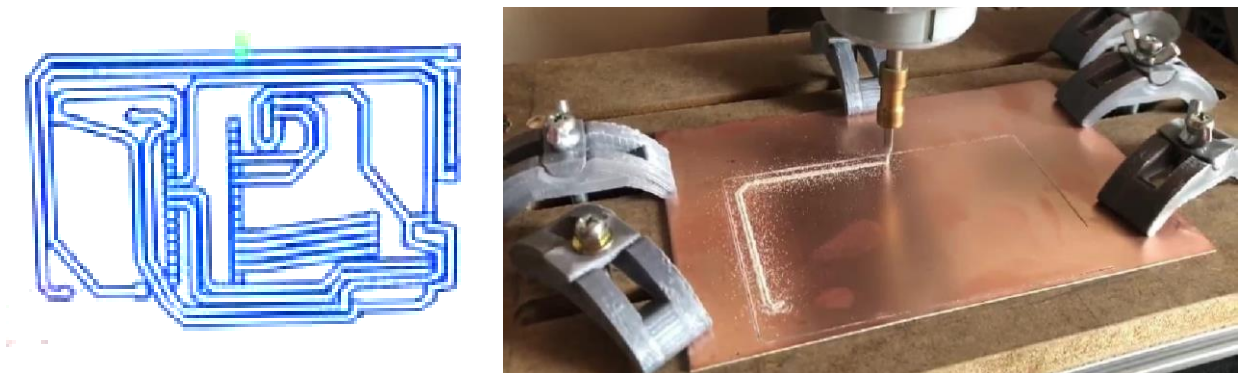
Prueba de Sistema de Control de 15, 45 y 60°.



Después de la prueba de control se procedió al diseño del circuito que posteriormente fue prototipado en la placa de baquelita.

Figura 31.

Diseño del Circuito y su Prototipado.



Diseño del Dispositivo

Requerimientos de diseño:

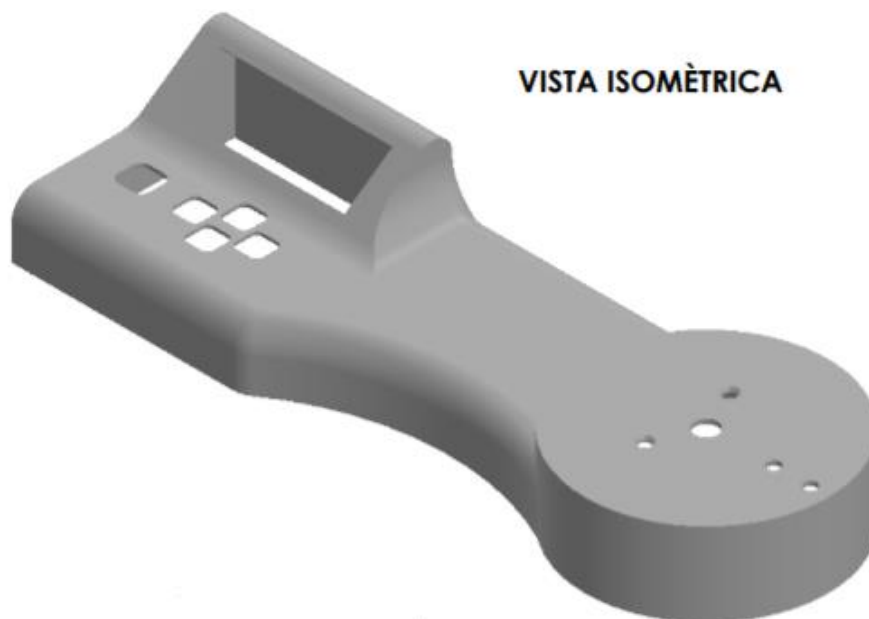
1. Plataforma giratoria (360°).

2. Esquema de iluminación envolvente (3 luces cada 120°).
3. Paneles de luz LED (1500 LM / Blanco frio / 12V / 6500°k)
4. Patrón geométrico de referencia para fotogrametría (Cuadrícula blanco y negro de 1,3mm de lado)
5. Interfaz o botonera.
6. La superficie de los componentes debe ser negros para evitar cualquier reflejo no deseado en la iluminación.
7. Pantalla para retroalimentación.

A partir de los requerimientos de diseño y las dimensiones de los componentes electrónicos se diseñó una carcasa pensada para ser prototipada en 3D.

Figura 32.

Carcasa del dispositivo.



El sistema de iluminación se compone de brazos articulados con conductos que ocultan el sistema eléctrico y permiten ajustar la inclinación, elevación y distancia de cada panel de forma independiente.

Figura 33.

Brazos articulados.



La plataforma requirió de un sistema de transmisión de corriente por contacto de escobillas permitiendo la rotación de la plataforma con respecto a la carcasa sin necesidad de cables y así esta gire libremente en ambas direcciones indefinidamente.

Figura 34.

Detalle sistema de transmisión de corriente.

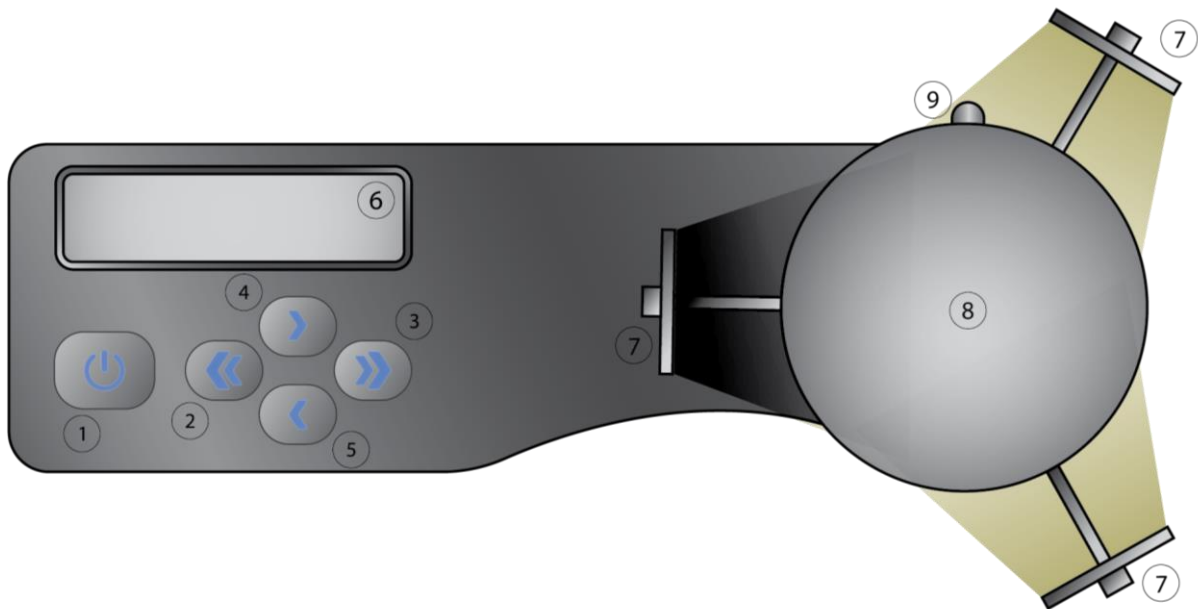


En la pantalla se puede visualizar la retroalimentación de cada una de las acciones, tanto de avanzar como retroceder y el número de grados al que se quiere realizar el movimiento.

Figura 35.

Modulo LCD.



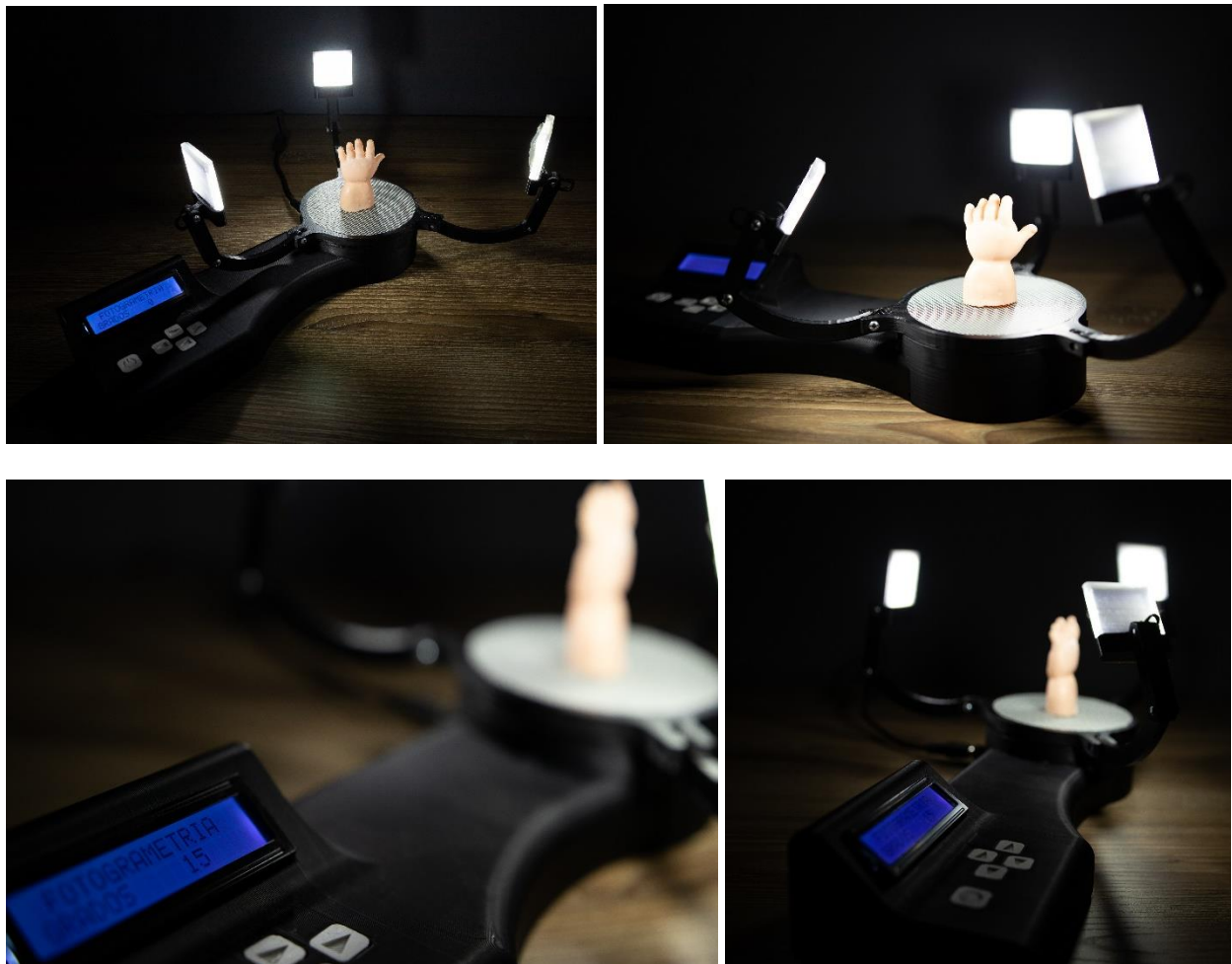
Figura 36.*Esquema de Interfaz de la Plataforma.***Tabla 21.***Funcionamiento del Esquema de Interfaz de la Plataforma.*

Parte	Función	Descripción
1.	Encender / Apagar	Presione una vez para encender. Presione una vez para apagar.
2.	Retroceder	Presione una vez para rotar la plataforma 15° en el sentido antihorario.
3.	Avanzar	Presione una vez para rotar la plataforma 15° en el sentido horario.
4.	Aumentar número de grados	Presione una vez para rotar la plataforma 5° en el sentido antihorario.
5.	Disminuir número de grados	Presione una vez para rotar la plataforma 5° en el sentido horario.
6.	Pantalla	Muestra el número de grados avanzados en el dispositivo.

7.	Led	Iluminar la plataforma y girar con ella para que esta no varíe en el modelo.
8.	Plataforma	Soporte giratorio donde se ubica el modelo a escanear.
9.	Fuente de alimentación	Plug de conexión y alimentación eléctrica.

Figura 37.

Fotografías montaje del dispositivo terminado.



7.3. Fase de Análisis y Evaluación

7.3.1. Secuencia de Trabajo

Tabla 22.

Secuencia de Trabajo.

	Proceso	Procedimiento	Instrucciones o Recomendaciones
1	Preparar el montaje para fotogrametría	1.1 Conectar el dispositivo 1.2 Encender la iluminación del dispositivo 1.3 Eliminar toda iluminación externa. 1.4 Ubicar el objeto o modelo en el centro de la plataforma. 1.5 Ubicar la cámara y trípode a nivel del objeto/modelo y a una distancia de 30cm desde el objetivo hasta el centro de la plataforma. 1.6 Encender la cámara 1.7 Conectar el disparador remoto y verificar su funcionamiento, para evitar el movimiento de la cámara a la hora de disparar.	1.1 El dispositivo se debe conectar a 110v 1.2 El botón de encendido de las luces se encuentra en tal sitio (poner foto) y se activa pulsando una sola vez 1.3 se recomienda que el montaje esté en una habitación o sala oscura de tal manera que el objeto únicamente esté iluminado por el esquema del dispositivo 1.4 La plataforma tiene un icono que indica el centro de la plataforma donde se debe ubicar y fijar el objeto/modelo. 1.5 El trípode debe ser robusto y estable, usar uno con cabezal ajustable para poder graduar la toma a picado, nivel y contrapicado. 1.6 En el momento de encender la cámara revisar la carga de la batería 1.7 Desactivar el modo de enfoque automático del disparador para mantener el enfoque manual de la cámara.
2	Configurar cámara	2.1 Utilizar los siguientes parámetros en modo manual: f:16 ISO:100	La cámara utilizada en el proyecto Usar los diales respectivos.

s:1/60 a 1/100 (Dependiendo de la medición de luz y el tipo de superficie a escanear)

Formato de captura: RAW.

Enfocar en modo manual el centro del objeto.



Desactivar la opción de autoenfoque en la cámara.

3	Captura de las imágenes	<p>3.1 Tomar la foto.</p> <p>3.2 Rectificar la correcta exposición y enfoque de la foto, de ser necesario repetir la toma y corregir.</p> <p>3.3 Girar la plataforma 15° (Pulsando una vez el botón siguiente).</p> <p>3.4 Repetir el paso 10, 11 y 12 hasta completar los 360 de recorrido.</p> <p>3.5 Ubicar la cámara hasta obtener un encuadre en picado a 45°.</p> <p>3.6 Repetir el paso 13.</p> <p>3.7 Ubicar la cámara hasta obtener un encuadre en contrapicado a 10°.</p> <p>3.8 Repetir el paso 13.</p> <p>3.9 Ubicar la cámara para obtener una foto cenital.</p>	<p>Durante la captura de imágenes evitar el contacto con el trípode y el dispositivo para evitar cualquier movimiento del objeto, además es importante revisar cada captura y si es necesario repetir la toma cuando terminen las capturas no se debe retirar el objeto de la plataforma hasta asegurarse que todas las imágenes están bien enfocadas y encuadradas. si el objeto tiene geometrías ocultas se puede cambiar el ángulo del encuadre contrapicado y picado hasta lograr capturar los detalles ocultos. Tener en cuenta que la interfaz permite regresar cada rotación en caso de una toma errónea.</p>
4	Tratamiento de imágenes	<p>4.1 Pasar los archivos a una carpeta designada</p>	<p>Se debe tener en cuenta que postprocesado de las imágenes influye en la calidad de la reconstrucción, por lo tanto, se pueden</p>

	4.2	Procesar las imágenes en Adobe Lightroom	aplicar cambios de contraste enfoque etc, para mejorar la calidad de las fotografías, sin
	4.3	Ajustar los parámetros en automático	embargo, no se deben mover los parámetros que afectan las dimensiones de las imágenes
	4.4	Ajustar el balance de blancos seleccionando con el gotero una zona blanca del patrón de la plataforma.	como por ejemplo (encuadre, recorte, corrección de lente, perspectiva etc.) ya que el software elimina los fotografías que tengan estos parámetros alterados.
	4.5	Desmarcar la opción de corrección de lente.	
	4.6	Exportar en formato .TIF todas las fotos.	

5	Procesado y reconstrucción 3D	5.1	Abrir el software Agisoft Metashape.	5.1	Verificar que el equipo de cómputo cumpla los requerimientos básicos de hardware para soportar el software seleccionado (Metashape).
		5.2	Ir al menú flujo de trabajo	5.2	Verificar al comienzo de cada proceso, si el anterior ha culminado satisfactoriamente, de lo contrario repetirlo.
		5.3	Añadir carpeta.	5.3	Guardar el proyecto antes de exportar el archivo final en caso de posibles correcciones.
		5.4	Seleccionar la carpeta con las fotos del paso 24.	5.4	Al momento de postprocesar el archivo, determinar cuál es el software idóneo según las correcciones que necesite.
		5.5	Seguir el orden del flujo de trabajo que ofrece el software: Orientar fotos - Crear nube de puntos densa - Crear malla - Crea textura - Crear modelo de Teselas - Crear modelo digital de elevaciones.	5.4.1	Tapar agujeros y cortar elementos sobrantes. (Meshmixer)
		5.6	Ir al menú archivo y exportar en formato .STL y .Obj	5.4.2	Corregir texturas y superficies (ZBrush o Blender).
		5.7	Postprocesar el archivo .STL u .Obj para corregir defectos de la reconstrucción.	5.4.3	Aumentar o disminuir el número de

	5.8 Guardar y exportar en formato .STL	poligonos (Malla o ZBrush)
6 Prototipar	6.1 Importar el archivo .stl a un software de laminado para obtener el archivo tipo gcode para su prototipado respectivo ya sea en una tecnología fdm o tal.	Se recomienda prototipar con la mayor calidad posible (boquilla 0.1 y altura de capa de 0.8 en FDM, o pantalla de 4k para impresoras de resina) para no perder todos los detalles obtenidos en el modelo digital.

Figura 38.

Fotografías ubicación y montaje para realizar la fotogrametría.



Teniendo todos los parámetros, configuraciones y secuencia de trabajo establecidas, se procedió a seleccionar 3 objetos para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo de captura.




7.3.2. Tabla de los Objetos Seleccionados y sus Características

7.3.2.1. Lista de Chequeo Características

- Dimensiones menores a 3mm x 3mm x 3mm
- No translucidos
- Que no sea perfectamente simétrico
- Que no sea completamente blanco ni completamente negro sin superficies reflectivas

Tabla 23.

Objetos Seleccionados y sus Características.

Características	Objeto 1: Pereiópodo (pata ambulatoria de cangrejo de río)	Objeto 2: hongo	Objeto 3: pata de un escarabajo
Foto			
Dimensiones (mm)	3x2.5x1.5	3x1.6x1.7	3x0.8x1
Material	Quitina	Quitina	Quitina
Descripción de geometría	Orgánica irregular	Orgánica irregular mate	Orgánica irregular
Descripción de la superficie	Superficie rugosa, semi mate	Superficie rugosa, mate	Superficie lisa, brillante, con pequeños filamentos

7.3.2.2. Modelos Digitales

A continuación, se presentan los modelos digitales realizados mediante fotogrametría utilizando el software Autodesk Meshmixer, con el que se realizó la corrección y limpieza de la malla poligonal obtenida por fotogrametría del software Agisoft Metashape.

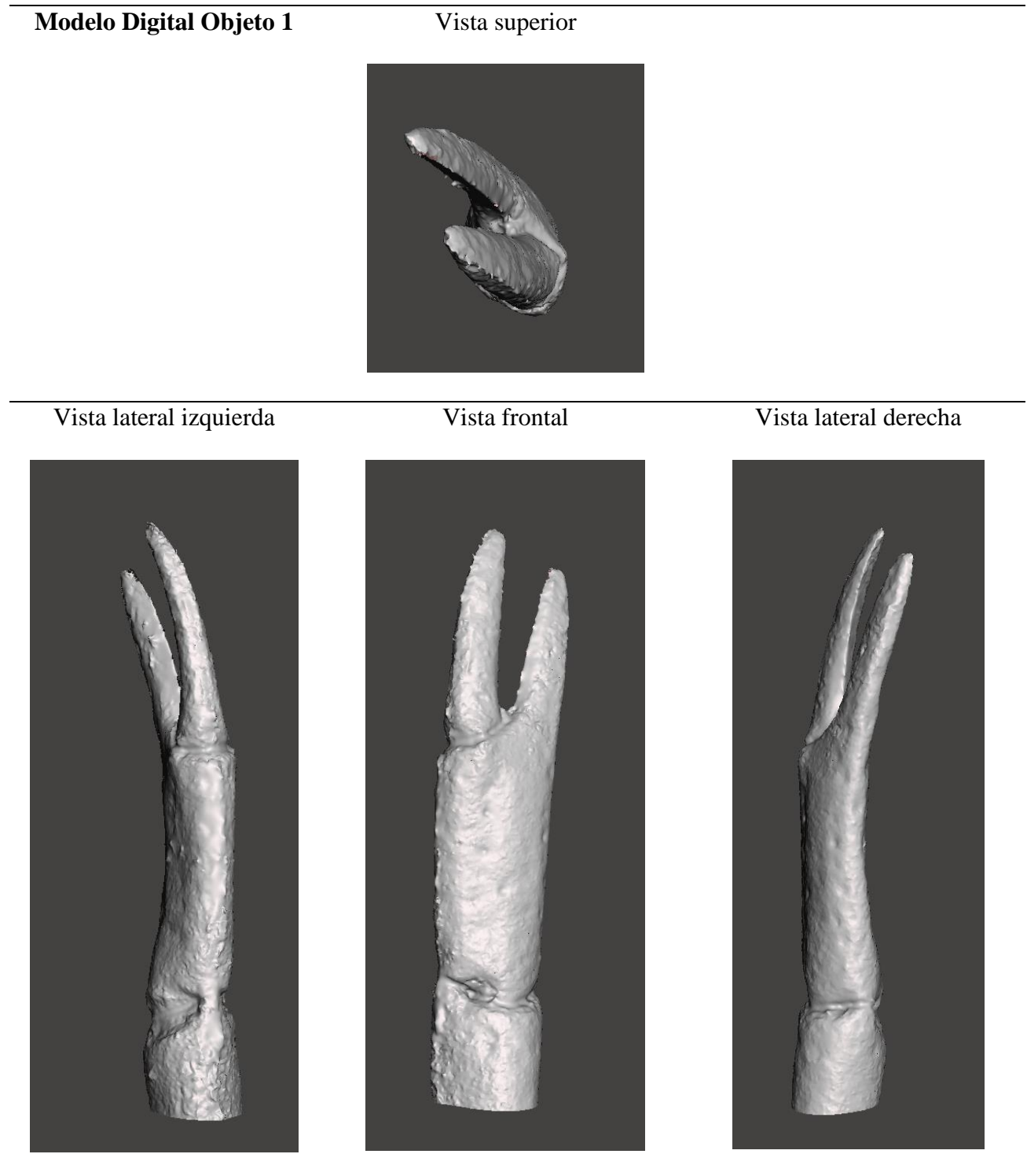
Tabla 24.*Modelo Digital de la Reconstrucción 3D del Objeto 1.*

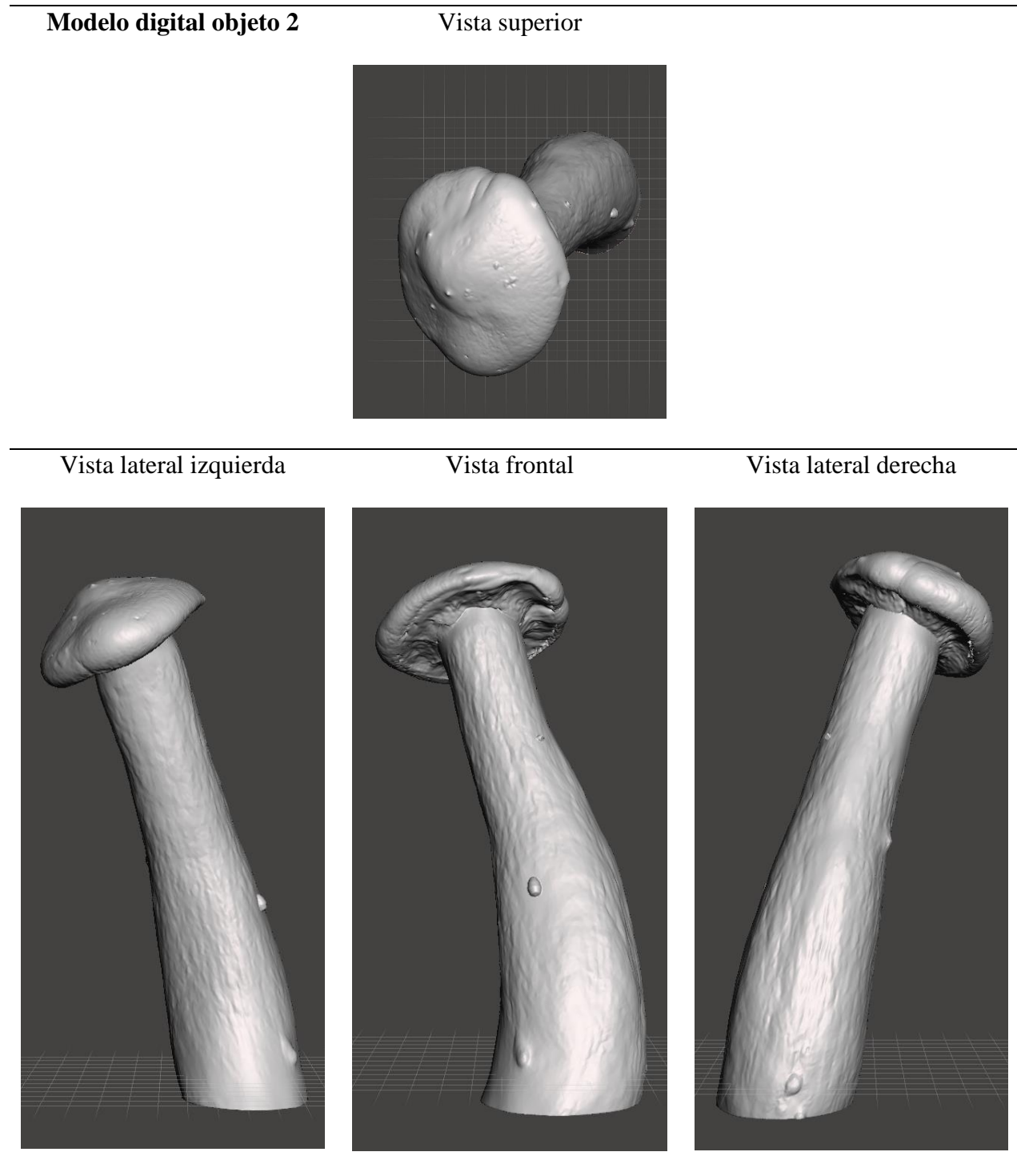
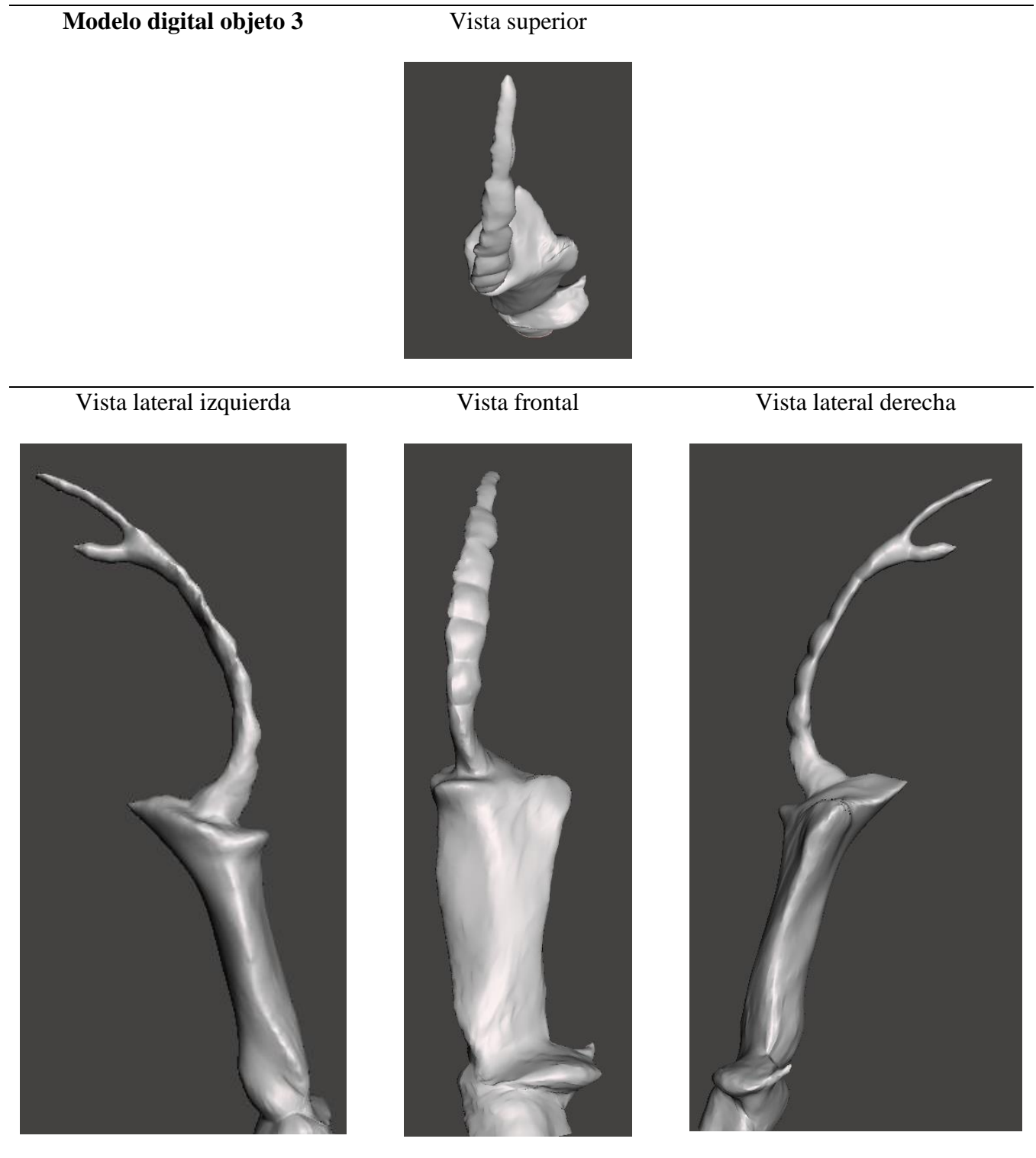
Tabla 25.*Modelo Digital de la Reconstrucción 3D del Objeto 2.*

Tabla 26.*Modelo Digital de la Reconstrucción 3D del Objeto 3.*

7.3.2.3. Modelos prototipados

Figura 39.

Fotografías Modelos Prototipados Escala 100:1.



7.3.2.4 Tabla Comparativa con los Atributos del Objeto Real, el Modelo Digital y el Modelo Prototipado

Tabla 27.

Comparativa 1: Atributos del Objeto Real, Modelo Digital, Modelo Prototipado.


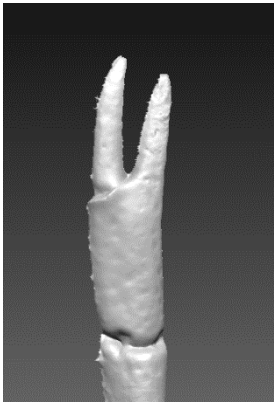

Objeto 1	Modelo Real	Modelo Digital	Modelo Prototipado
Foto			
Detalles de la reconstrucción	Se tomaron 48 fotos de las cuales el software utilizó 42		
Observaciones	Con la reconstrucción 3d del objeto 1 se identificó un cambio en las proporciones en su reconstrucción 3d debido a que el software no permite visualizar el modelo digital en perspectiva real, se presenta los modelos en vista isométrica por lo que la mejor manera de comparar el con el modelo prototipado.		

Tabla 28.

Comparativa 2: Atributos del Objeto Real, Modelo Digital, Modelo Prototipado.

Objeto 2	Modelo Real	Modelo Digital	Modelo Prototipado
----------	-------------	----------------	--------------------

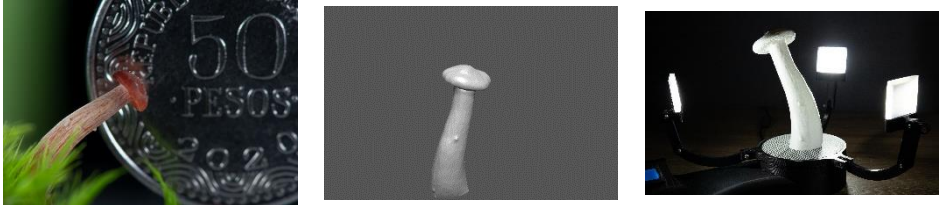

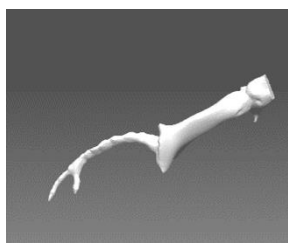

<p>Foto</p>	
<p>Detalles de la reconstrucción</p>	<p>Se tomaron 48 fotos de las cuales el software utilizó 36</p>
<p>Observaciones</p>	<p>En la reconstrucción 3D del Objeto 2 fue necesario eliminar en edición digital el musgo ya que interfería en el modelo digital, y era imposible quitarlo manualmente ya que el hongo es extremadamente delicado.</p>

Tabla 29.

Comparativa 3: Atributos del Objeto Real, Modelo Digital, Modelo Prototipado.

Objeto 3	Modelo Real	Modelo Digital	Modelo Prototipado
<p>Foto</p>			

Detalles de la reconstrucción	Se tomaron 48 fotos de las cuales el software utilizó 40 sin embargo para lograr los detalles de las falanges de la pata se recurrió a un focus staking de 5 fotos desde 3 perspectivas diferentes.
Observaciones	Para lograr la reconstrucción 3D del Objeto 3, fue necesario pintarlo con un color gris mate para eliminar el brillo de la superficie, no fue posible captar los pelos de la pata puesto que el software los interpretaba como superficies adimensionales.

8. Conclusiones

A partir de la metodología planteada se pudo abordar ordenadamente cada aspecto del proyecto y de manera específica cubrir los puntos clave para el desarrollo del dispositivo. Con el desarrollo del proyecto se logró identificar las variables, parámetros y condiciones ideales para capturar y reconstruir digitalmente un objeto.

Cuando se realizaron las pruebas a la escala requerida por el proyecto (3mm x3mm x3mm), se hizo evidente que, aunque el focus-stacking produce imágenes con una mayor profundidad de campo y detalle, en este caso presentó problemas en el procesamiento y digitalizado. Las imágenes generadas por el apilamiento sufren una leve distorsión para poder encajar cada toma una con otra, y como consecuencia se evidenció conflictos en la reconstrucción, ya que los puntos en común que el software usó de referencia se vieron afectados.

Después de identificada la técnica adecuada para el proceso, se analizaron los errores de reconstrucción y sus posibles causas. Dichas reconstrucciones no se completaron, y se encontraron dos razones:

1. Características intrínsecas del objeto:

- Este tipo de geometrías generan conflicto dentro del software por pérdida de información o formas demasiado similares.
- Superficies translucidas.
- Geometrías perfectamente simétricas (cilindros esferas etc.) de color uniforme en toda su superficie.
- Objetos brillantes (metálicos, barnizados etc.).
- Filamentos o cabellos tan pequeños que el software no reconoce (pelos, fibras filamentos etc.).

2. Procesado de información:

Como se mencionó anteriormente, se prescindió del uso del focus-stacking para evitar pequeñas distorsiones que afecten la integridad de la reconstrucción. Así mismo ocurre al momento de procesar las imágenes, por lo que resulta fundamental evitar el uso de la corrección de lente para terminar con éxito el proceso.

Estas características ponen como candidatos para modelos de reconstrucción objetos con formas y superficies orgánicas, sumado a las restricciones anteriormente mencionadas.

Durante la estandarización del proceso, es necesario garantizar una iluminación constante, invariable y que forme parte del modelo, es decir, que rotase junto con él. Este fue un factor importante a nivel técnico en la captura de la información como de desarrollo del escáner.

A partir de la **Tabla 20** es posible indicar que durante el proceso de reconstrucción 3D y prototipado se pierden detalles del modelo original, que se pueden corregir utilizando equipos más precisos. Cabe resaltar que se logró realizar el proceso de reconstrucción 3D con objetos de dimensiones inferiores a 3mmx3mmx3mm y también con objetos de dimensiones inferiores a

5cmx5cmx5cm, como lo fue la mano de las pruebas de control, donde incluso escáneres de triangulación láser bastante precisos no pueden alcanzar un buen resultado.

Los resultados obtenidos con el modelo y secuencia de trabajo final permitieron obtener reconstrucciones 3D de un objeto de dimensiones inferiores a 3mm x3mm x3mm por medio de la macrofotografía y la fotogrametría, cumpliéndose así nuestro objetivo general.

Referencias Bibliográficas

- ALL3DP.pro. (2020). Los mejores programas de animación 3D de 2020 | All3DP Pro. Retrieved February 4, 2021, from <https://all3dp.com/es/1/mejores-20-programas-animacion-3d/#blender>
- Arriola Valverde, S., Ferencz Appel, A., & Rimolo-Donadio, R. (2018). Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados. *Investiga.TEC*; Núm. 31 (2018); 4. Retrieved from <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1599587>
- Brecko, J., Mathys, A., Dekoninck, W., Leponce, M., VandenSpiegel, D., & Semal, P. (2014). Focus stacking: Comparing commercial top-end set-ups with a semi-automatic low budget approach. A possible solution for mass digitization of type specimens. *ZooKeys*, (464), 1–23. <https://doi.org/10.3897/zookeys.464.8615>
- Guerrero G., J. s.f. Cartografía, geodesía, fotogrametría y topografía. Disponible en: <http://jguerrerogam.com/mi-informacion/fotogrametria-y-modelos-3d>
- Gracia Pérez, L. (2015). ¿Qué es y para qué sirve un escáner 3d? ¡Sal de dudas! Retrieved February 4, 2021, recuperado de <https://www.digitalizacion-3d.com/que-es-y-para-que-sirve-un-escaner-3d/>
- Inzunza, O., Caro, I., Mondragón, G., Baeza, F., Burdiles, Á., & Salgado, G. (2015). Impresiones 3D, Nueva Tecnología que Apoya la Docencia Anatómica. *International Journal of Morphology*, 33(3), 1176–1182. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022015000300059>
- Niven, L., Steele, T. E., Finke, H., Gernat, T., & Hublin, J. J. (2009). Virtual skeletons: using a structured light scanner to create a 3D faunal comparative collection. *Journal of Archaeological Science*, 36(9), 2018–2023. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.05.021>

- Técnicas De Registro 3d Para Documentación De Objetos Patrimoniales. (2015). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/305765889_Tecnicas_De_Registro_3d_Para_Documentacion_De_Objeto_Patrimoniales
- Torreblanca Díaz, D. (n.d.). Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos - Dialnet. Retrieved February 4, 2021, from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6302021>
- Torres, J. C., Cano, P., Melero, J., España, M., & Moreno, J. (2010). Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio. *Virtual Archaeology Review*, 1(1), 51. <https://doi.org/10.4995/var.2010.4768>
- What is the size limitation for a structured-light 3D scanner? - Polyga. (n.d.). Retrieved July 15, 2019, from <https://www.polyga.com/3d-scanning-101/what-size-of-objects-can-you-scan-with-a-structured-light-3d-scanner/>