

**ARQUITECTURA E INTERFAZ DE SIMULACIÓN PARA  
DIGITALIZACIÓN DE OBJETOS A PARTIR DE IMÁGENES Y TÉCNICAS  
DE MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD**



**CRISTHIAN DAVID RUALES MORA  
JOHANA ELIZABETH VELA ROJAS**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2019**

**ARQUITECTURA E INTERFAZ DE SIMULACIÓN PARA  
DIGITALIZACIÓN DE OBJETOS A PARTIR DE IMÁGENES Y TÉCNICAS  
DE MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD**

**CRISTHIAN DAVID RUALES MORA  
JOHANA ELIZABETH VELA ROJAS**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingenieros Electrónicos**

**ASESOR  
PhD. DIEGO HERNÁN PELUFFO ORDÓÑEZ  
INGENIERO ELECTRONICO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2019**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor.”

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**San Juan de Pasto, 29 de Marzo de 2019**

## **AGRADECIMIENTOS**

*“Agradezco a mi madre Dora Ladis Adelfa Mora Jurado, por todo su amor, cariño y comprensión, pese a las adversidades nunca dejo de creer en mí, a mi padre Atalivar Colon Ruales Narváez, por cada palabra de cariño y comprensión, este logro pertenece a ellos. Gracias a mis amigos y compañeros por los buenos momentos y a mis maestros gracias por todo. Especial gratitud a mi asesor el profesor Diego Peluffo por su apoyo en este arduo proceso y al profesor Javier Revelo por todo el apoyo y conocimiento que me ha brindado”*

Cristhian David Ruales Mora

*“Agradezco principalmente a mis padres Marlene Rojas y Franklin Vela porque esto es solo el reflejo de su esfuerzo constante, a toda mi familia por ser apoyo incondicional en este proceso académico. A mi asesor el profesor Diego Peluffo que siempre me ha mostrado amabilidad y apoyo en el desarrollo de esta tesis, a todos mis profesores que han entregado lo mejor de sí para forjar no solo mi ser profesional, sino mi ser humano, en especial al profesor Javier Revelo. Y finalmente, a mis compañeros que entre momentos alegres y tristes recorrimos este camino juntos”*

Johana Elizabeth Vela Rojas

## DEDICATORIA

*“A mis padres, por su apoyo incondicional en cada tramo del camino, su amor es un faro de esperanzas frente a cualquier tormenta”*

Cristhian David Ruales Mora

*“Con todo mi amor y cariño a mis abuelos maternos Ligia Posso y Anibal Rojas que dieron lo mejor de sí por mantener solida mi familia, a mi hermano Sebastian Vela que desde el momento que llego a nuestras vidas ha sido lazo familiar y el principal motor de mi vida; y a mis padres Marlene Rojas y Franklin Vela que siempre me han entregado su confianza y amor incondicional. A todos ellos porque siempre me han inspirado para ser mi mejor versión”*

Johana Elizabeth Vela Rojas

## RESUMEN

La digitalización de objetos es el proceso mediante el cual se representa un objeto real en un entorno computacional, mediante métodos de adquisición de información que, capturan, analizan y reconstruyen las características físicas de los objetos originales. Las reproducciones digitales ayudan al desarrollo de la ciencia, la tecnología y el entretenimiento, fomentan la globalización de la información, y permiten a los seres humanos tener fácil acceso a objetos y lugares; gracias a la digitalización los científicos pueden realizar experimentos en mundos virtuales complejos y completos, los animadores pueden crear entornos realistas y maravillosos basados en el mundo real y los creadores de videojuegos, pueden reproducir paisajes detallados.

En la actualidad, aunque existen sistemas comerciales para la digitalización de objetos, su costo y demanda de alto rendimiento computacional limitan su calidad y detalle visual. Esto se atribuye al hecho de que la mayoría de los sistemas existentes priorizan uno de los dos aspectos: obtener un buen resultado o reducir los costos. En este sentido, el objetivo de este proyecto fue desarrollar una arquitectura experimental para la digitalización de objetos mediante el acople de imágenes y mediciones de profundidad que alcancen un buen equilibrio entre la calidad de la reconstrucción y el detalle visual.

## **ABSTRACT**

The digitization of objects is the process by which a real object is represented in a computational environment, through various methods of information acquisition that capture, analyze and reconstruct the physical characteristics of the original objects. Digital reproductions help the development of science, technology and entertainment, promote the globalization of information and allow human beings to have easy access to objects and places; Thanks to digitalization, researchers can perform experiments in virtual complex worlds, animators can create realistic and wonderful environments and video game creators can reproduce detailed landscapes.

At present, although there are commercial systems for the digitalization of objects, its cost and its demand for high computational performance can limit its quality and visual detail. This can be attributed to the fact that most of the existing systems prioritize one of the two aspects: either obtaining a good result or reducing costs. In this sense the aim of this project is to develop an architecture for object digitalization through the coupling of imaging methods and depth measurements that reaches a good trade-off between the quality of the reconstruction, and the visual detail.



## CONTENIDO

	pág
Introducción.....	18
Planteamiento del problema.....	20
Justificación.....	20
Contribuciones de esta tesis .....	21
Objetivo general .....	22
Objetivos específicos .....	22
Organización del documento.....	22
Geometría computacional .....	24
Distancia Euclidiana .....	25
Diagramas de Voronoi .....	26
Triangulaciones de Delaunay .....	27
Medidas de posición estadísticas.....	28
Media aritmética .....	28
Valor central.....	28
Valor modal.....	29
Cuartiles y percentiles .....	29
Medidas de dispersión estadísticas.....	30
Varianza.....	30
Desviación estándar .....	31
Rango Intercuartílico.....	31
Imágenes digitales .....	31
Imagen RGB .....	32
Imagen en Escala de Grises.....	33
Imagen Binaria.....	33
Procesamiento de imágenes digitales .....	34
1.    METODOLOGÍA.....	35

1.1.	TECNICAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	35
1.1.1.	Adquisición de medidas de profundidad.....	35
1.1.2.	Adquisición de imágenes .....	37
1.2.	PROTOCOLO DE USO DE ESPACIO DE CONDICIONES CONTROLADAS.....	37
1.2.1.	Clave de color .....	38
1.2.2.	Plataforma.....	39
1.2.3.	Factores de incidencia lumínica .....	40
1.3.	ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS .....	41
1.4.	PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS.....	42
1.4.1.	Extracción de la información del objeto de la escena.....	42
1.4.2.	Eliminar puntos atípicos a partir del rango intercuartílico .....	43
1.4.3.	Eliminar Fondo de una imagen .....	45
1.5.	ALGORITMO PARA TRIANGULACIONES DE DELAUNAY .....	46
1.5.1.	Algoritmo básico para la construcción de la triangulación de Delaunay 47	
1.5.2.	Algoritmo Incremental para construir triangulaciones de Delaunay....	48
1.6.	CREACIÓN DE TEXTURAS CON IMÁGENES .....	50
1.7.	ARQUITECTURA EXPERIMENTAL DE ACOUPLE DE MÉTODOS .....	52
1.8.	INTERFAZ GRAFICA .....	54
2.	RESULTADOS.....	57
2.1.	EVALUACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS	57
2.1.1.	Experimento 1: Validación Escáner Láser.....	57
2.1.2.	Experimento 2: Evaluación de robustez del escáner laser Sweep .....	61
2.1.3.	Experimento 3: Evaluación robustez de la cámara digital .....	64
2.2.	VALIDACIÓN DEL PROTOCOLO MEDIANTE LA ADQUISICIÓN DE LA BASE DE DATOS .....	68
2.2.1.	Base de datos .....	69
2.3.	DESEMPEÑO DE LA ARQUITECTURA EXPERIMENTAL.....	72
2.3.1.	Prueba de Desempeño sobre el algoritmo de generación de mallas .	73

2.3.2. Prueba de la arquitectura experimental.....	75
2.4. GUIDE MATLAB PARA LA VISUALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y LA BASE DE DATOS.....	77
3. CONCLUSIONES .....	79
4. RECOMENDACIONES.....	81
BIBLIOGRAFIA.....	83
ANEXOS.....	86

## LISTAS DE FIGURAS

pág

<b>Figura 1.</b> Digitalización de un cráneo real de <i>Canis lupus familiaris</i> . A) Cráneo real utilizado para la digitalización. B) mismo cráneo, detallando la malla de puntos obtenida mediante la técnica de medición de profundidad. C) reconstrucción digital tridimensional final del cráneo.....	19
<b>Figura 2.</b> Ilustración de un objeto real y su réplica virtual que contiene toda la información del sistema físico. ....	23
<b>Figura 3.</b> En A) se observa la trama de la función sinc y en B) su nube de puntos. . .....	24
<b>Figura 4.</b> Representación gráfica de la distancia euclidiana en 2D.....	25
<b>Figura 5.</b> Un diagrama de Voronoi (líneas continuas) y teselación de Delaunay (líneas discontinuas). ....	26
<b>Figura 6.</b> Triangulación de Delaunay aplicada a una nube de puntos que describe un cubo. ....	27
<b>Figura 7.</b> Distribución normal. ....	31
<b>Figura 8.</b> En A) se puede observar una imagen 'Lena' de tres canales (imagen RGB). Donde B) representa el nivel de intensidad del color rojo (canal 1), C) el nivel de intensidad del color verde (canal 2) y por último D) representa el número los valores de intensidad del color azul (canal 3). ....	32
<b>Figura 9.</b> Transformación de la imagen de 'Lena' a escala de grises. ....	33
<b>Figura 10.</b> Transformación de la imagen de 'Lena' a imagen binaria. ....	33
<b>Figura 11.</b> Scanse Sweep, sensor de escaneo laser. ....	35
<b>Figura 12.</b> Diagrama de los componentes internos del Scanse Sweep. ....	36
<b>Figura 13.</b> Aplicación web escáner 3D.....	36
<b>Figura 14.</b> Diagrama de adquisición de imágenes digitales. ....	37
<b>Figura 15.</b> Ilustración de la técnica Croma sobre la imagen 'Jarron000' de la base de datos. ....	39
<b>Figura 16.</b> Esquema de la plataforma de la adquisición de datos. ....	39
<b>Figura 17.</b> Plataforma de adquisición de datos. ....	40
<b>Figura 18.</b> Esquema de iluminación con respecto a la plataforma de adquisición. ... .....	41

<b>Figura 19.</b> Escena a 0 grados del objeto 'cube' .	43
<b>Figura 20.</b> Diagrama de cajas para los datos de la cara del objeto 'cube' a 0 grados.	44
<b>Figura 21.</b> Cara del objeto 'cube' a 0 grados donde los puntos azules son los valores atípicos.	44
<b>Figura 22.</b> Histogramas de los canales R, G y B de la imagen "Jarron000"	45
<b>Figura 23.</b> En A) Imagen binaria de la "Jarron000" y en B) Imagen despues de la eliminación de cuerpos extraños.	46
<b>Figura 24.</b> Intercambio de diagonales.	47
<b>Figura 25.</b> Criterios de inserción de $p$ en A) si $p$ esta dentro de $to$ y B) si $p$ esta sobre una arista de $to$ .	49
<b>Figura 26.</b> Tomas del objeto 'Cube' cada 90 grados, en A) fue la Imagen a 0 grados, B) fue la Imagen a 90 grados, C) fue la Imagen a 180 grados y D) fue la Imagen a 270 grados.	51
<b>Figura 27.</b> En A) imagen de recorte de selección de objeto y en B) expansión del objeto.	52
<b>Figura 28.</b> Textura general del objeto 'Cube'.	52
<b>Figura 29.</b> Se ilustra la información obtenida del objeto 'cube' a 0 grados A) representación en nube de puntos y en B) su correspondiente imagen digital.	53
<b>Figura 30.</b> Diagrama del procedimiento para la generación de copias digitales.	54
<b>Figura 31.</b> Interfaz gráfica diseñada en el GUIDE de MATLAB.	56
<b>Figura 32.</b> Página de escaneo sensor Scanse Sweep.	59
<b>Figura 33.</b> Extracción del Objeto 'cube' de las escenas tomadas a una frecuencia de muestreo de 500Hz y velocidades del motor: en A) de 1Hz y en B) de 2Hz.	60
<b>Figura 34.</b> Vista de $X$ vs. $Y$ del objeto 'cube' tomado con la velocidad del motor a 1Hz y frecuencias de muestreo: en A) de 500Hz, en B) de 750Hz y en C) de 1000Hz.	61
<b>Figura 35.</b> Diagrama ilustrativo del Experimento 2 cuando el Observador se encuentra en movimiento con respecto al escáner laser Sweep.	62
<b>Figura 36.</b> Diagrama ilustrativo del Experimento 2 cuando el escáner laser Sweep se encuentra en movimiento.	63
<b>Figura 37.</b> Escaneo objeto transparente con el Scanse Sweep.	63
<b>Figura 38.</b> Escaneo objeto reflejante con el Scanse Sweep.	64

<b>Figura 39.</b> Diagrama ilustrativo del Experimento 3 cuando el objeto de interés se encuentra en movimiento con respecto a la cámara digital. ....	65
<b>Figura 40.</b> Diagrama ilustrativo del Experimento 3 cuando la cámara digital se encuentra en movimiento con respecto al objeto de interés. ....	65
<b>Figura 41.</b> Evaluación de fondos, en A) fondo blanco, en B) fondo negro y en C) fondo verde. ....	66
<b>Figura 42.</b> Evaluación de fondos con imágenes binarias, en A) fondo blanco, en B) fondo negro y en C) fondo verde. ....	67
<b>Figura 43.</b> Representación gráfica de la evaluación de iluminación. ....	67
<b>Figura 44.</b> Diagrama del procedimiento de adquisición de datos. ....	69
<b>Figura 45.</b> Imágenes del objeto 'Reindeer' cada 10 grados. ....	70
<b>Figura 46.</b> Nube de puntos del cubo generado en computadora. ....	73
<b>Figura 47.</b> Cubo creado en Autodesk Maya. ....	74
<b>Figura 48.</b> Aplicación algoritmo de Delaunay A) a los datos adquiridos y en B) a los datos artificiales. ....	74
<b>Figura 49.</b> Datos artificiales de una esfera, en A) nube de puntos, en B) aplicación Delaunay y en C) objeto creado en Autodesk Maya. ....	75
<b>Figura 50.</b> Esfera texturizada sobre datos A) aplicados Delaunay y en B) objeto Autodesk Maya. ....	76
<b>Figura 51.</b> Interfaz gráfica en funcionamiento. ....	77
<b>Figura 52.</b> Mensaje de error. ....	77
<b>Figura 53.</b> Diseño de la Página Web. ....	87

## LISTA DE TABLAS

	pág
<b>Tabla 1.</b> Resolución y Duración del escaneo para varias configuraciones.....	58
<b>Tabla 2.</b> Conteo de puntos de la escena y objeto del escaneo para varias configuraciones.....	60
<b>Tabla 3.</b> Estructuración de la Base de Datos. ....	71

## LISTA DE ANEXOS

	pág
ANEXO 1. LISTA DE ACRÓNIMOS .....	86
ANEXO 2. BASE DE DATOS.....	86
ANEXO 3. PÁGINA WEB.....	87



## GLOSARIO

**ADQUISICIÓN DE DATOS** también llamada adquisición de señales consiste en la toma de muestras del mundo real para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador.

**ARQUITECTURA EXPERIMENTAL** es el conjunto de técnicas que permite diseñar, proyectar y construir de forma experimental un conjunto de etapas que llevan al cumplimiento de una meta específica.

**DIMENSIÓN** en términos generales, es la dimensión de una base de datos es definida como la cantidad de mediciones, características o atributos que tiene cada objeto o muestra.

**VISIÓN ARTIFICIAL** la visión artificial es una disciplina científica que incluye métodos para adquirir, procesar, analizar y comprender las imágenes del mundo real con el fin de producir datos que pueden ser tratados por el ordenador.

**VALOR ATÍPICO** si la posición de un valor a considerar difiere con respecto a los valores característicos de un conjunto de datos, este se considera valor atípico.

**DIAGRAMA DE DISPERSIÓN** un diagrama de dispersión o gráfica de dispersión o gráfico de dispersión es un tipo de diagrama matemático que utiliza las coordenadas cartesianas para mostrar los valores de dos o tres variables para un conjunto de datos.

**TENDENCIA CENTRAL** si un parámetro describe un conjunto de observaciones y se sitúa en el centro de la distribución de los datos, se denomina parámetro de tendencia central.

**SIMETRÍA** una distribución es simétrica, si existen el mismo número de valores a la derecha e izquierda de la media.

**ASIMETRÍA** una distribución es asimétrica, si carece de simetría.

**PIXEL** puede definirse como la más pequeña de las unidades homogéneas en color que componen una imagen de tipo digital.

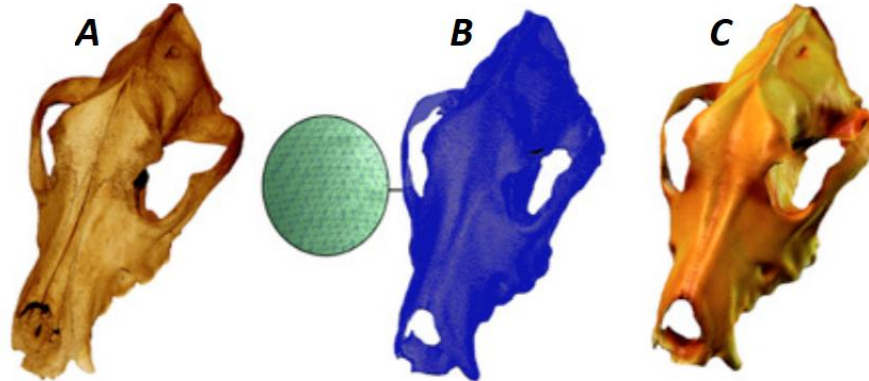
**PROTOCOLO DE USO DE ESPACIO** conjunto de reglas que rigen el proceso de adquisición de datos.

## Introducción

La creación, diseño e implementación de una arquitectura experimental para la digitalización de objetos, nos permitió capturar formas, dimensiones y colores de objetos físicos, para la creación de una réplica digital, con el propósito de almacenarla, modificarla o duplicarla. Para este proceso se hizo uso de técnicas basadas en imágenes, que procesan la información visual bidimensional para interpretarla en modelos virtuales tridimensionales y en conjunto con técnicas de medición de profundidad, nos permitieron añadir precisión y exactitud a las reconstrucciones digitales. La creación de un ambiente computacional, permitió un acceso amplio a la información de objetos y espacios, sin importar sus condiciones o estado original, como su difícil acceso, su estado precario, su tamaño o simplemente a su acceso limitado por tratarse de piezas de valor incalculable de arte y arqueología, entre otros.

Los escáneres laser son comúnmente usados para la reconstrucción 3D por muestrear los datos rápidamente y con precisión, en relación a otros sistemas, siendo el medio predilecto para complementar los modelos adquiridos por imágenes, dado que en la última década el costo y tamaño de estos dispositivos se ha minimizado drásticamente. No obstante, los sistemas comerciales generan muchos datos erróneos que necesitan de intensivos procesamientos, principalmente basados en ajuste de superficie (Barhak, y otros, 2001), otro tipo de falencias se presentan al no proporcionar ciertas características propias de los objetos, como el color. Trabajos como el de Bendaanane, M., et al (Bendaanane, y otros, 2015) presentan como trabajo a futuro, el desarrollo de una metodología que integre, a su sistema de escaneo laser, imágenes y así poder evaluar la cooperación entre dos técnicas de reconstrucción de objetos, ver **Figura 1**.

**Figura 1.** Digitalización de un cráneo real de *Canis lupus familiaris*. A) Cráneo real utilizado para la digitalización. B) mismo cráneo, detallando la malla de puntos obtenida mediante la técnica de medición de profundidad. C) reconstrucción digital tridimensional final del cráneo.



Fuente (López Mendoza, y otros, 2013).

Para el acople de técnicas se propusieron una serie de experimentos que permitieron llevar a cabo la adquisición de la información de forma regulada, los experimentos propuestos determinaron la capacidad de los dispositivos de adquisición. Las imágenes fueron una fuente importante de información, representan el método más simple para digitalizar objetos, a pesar de ser una representación bidimensional, la información archivada en la imagen permitió determinar gran cantidad de características; pese a requerir sistemas robustos para el procesamiento de la información; la popularidad del uso de este método, es gracias al fácil acceso a sus dispositivos de adquisición, por el desarrollo de la tecnología de fotografía digital en los teléfonos inteligentes.

El proceso experimental desembocó en la consideración de que, si bien los sistemas láser comerciales tienen buena atención al detalle, carecen de calidad visual, la integración de estas técnicas, permitió aumentar la robustez de los sistemas y obtener reconstrucciones tridimensionales detalladas y con calidad visual.

Es por tanto que, en este trabajo, se propuso crear una arquitectura e interfaz de simulación para la digitalización de objetos, que acoplara métodos medición de profundidad e imágenes para sopesar las falencias que presentan por separado. Buscando la eficiencia en la reconstrucción y la fidelidad en los detalles de los objetos, con el fin de obtener copias digitales de alta calidad que conserven los detalles visuales de origen.

**Modalidad: investigación.**

**Línea de investigación: procesamiento de señales.**

### **Planteamiento del problema**

El análisis de imágenes conlleva problemas en términos de la demanda de recursos computacionales altos y largos tiempos de ejecución para producir estructuras tridimensionales, a pesar de ser visualmente atractivos generalmente carecen de precisión (Ortiz Coder, y otros, 2013). Las técnicas de reconstrucción más precisas como el llamado escaneo láser, presentan mejores detalles en la reproducción digital, pero, generalmente no proporciona información visual como el color y texturas (López Escogido, 2016), y a menudo ha requerido el uso de equipos costosos para alcanzar resultados óptimos; tiene limitaciones con respecto al tamaño de los objetos que se deben reconstruir; Los dispositivos económicos pierden calidad y detalle en su reconstrucción final (Barhak, y otros, 2001).

Pese a que la aparición de las tarjetas de desarrollo tipo Arduino y Raspberry minimizan enormemente el costo de fabricación de las herramientas de adquisición (Álvarez Meneses, y otros, 2017), estos sistemas no alcanzan la calidad de las herramientas más robustas. No obstante, el desarrollo del software permitió aumentar su eficiencia y alcanzar resultados óptimos en relación a la calidad y el detalle de la reconstrucción digital, pese a que los algoritmos eficientes suelen presentar largos tiempos de ejecución y requerir máquinas robustas para su procesamiento.

El mundo digital se encuentra en constante expansión, los sistemas de digitalización contribuyen a que este proceso se acelere y sea preciso cuando se requiere reproducir objetos reales, pero, no es suficiente con adquirir los datos, es necesario procesarlos, darles sentido y forma. En base a esto, se crearon algoritmos que integran de manera óptima diferentes técnicas de digitalización, que permitieron minimizar los errores, reducir los tiempos de ejecución y mejorar el detalle visual y la precisión de las reproducciones digitales.

### **Justificación**

El uso de reproducciones digitales facilitó la comprensión del espacio y permitió la extracción o manipulación de características en entornos controlables, lo que conlleva a buscar reproducciones con gran calidad y que conservaban la mayor cantidad de detalles de los objetos originales.

La digitalización de objetos puede emplearse en un sin número de campos como la medicina, la arquitectura, la arqueología y la biología (Torres, y otros, 2010). Es tan versátil por ser una herramienta visual que entrega una interpretación superior de los datos digitales. Las imágenes son el medio de digitalización más utilizado en estos días, siendo de fácil acceso, presentan una buena cantidad de información, sin embargo, son bidimensionales, esto provoca que se pierda información espacial importante y los algoritmos para transformarlas en estructuras tridimensionales requieren de gran capacidad de procesamiento. Los sistemas de medición de profundidad son una alternativa para la reconstrucción tridimensional, capaces de adquirir con gran calidad las estructuras de los objetos, pero en muchos casos carentes de detalle visual, esto hace que el acople de técnicas sea una gran alternativa para mantener la atención de las reproducciones al detalle visual y la calidad de la reproducción.

Una arquitectura de acople de técnicas, permite la integración de distintos métodos de digitalización en un modelo robusto con mejores resultados, la integración de métodos ayuda también en la reducción del tamaño de la tecnología y en consecuencia su costo. Por estos motivos se desarrolló en este trabajo de grado una arquitectura experimental en pro de mejorar el detalle y la calidad visual de distintas técnicas de adquisición de datos, mediante un proceso de acople.

Por otra parte, la construcción de una base de datos apoya el desarrollo científico al permitir tanto a estudiantes como a expertos apoyar en ella sus investigaciones, además de tener una interpretación previa de los datos que facilita su procesamiento.

### **Contribuciones de esta tesis**

La digitalización de objetos se encuentra en desarrollo, la demanda de mejores y más eficientes sistemas de adquisición y procesamiento de información se encuentran a la orden del día, proponer una arquitectura que permita un equilibrio entre la precisión geométrica y el detalle visual de los objetos digitales es una contribución al desarrollo de esta tecnología. También el desarrollo y aplicación de algoritmos de ajuste de superficies y creación de texturas.

Este trabajo de grado disminuyó la brecha entre sistemas de gran calidad y robustez, con sistemas de distribución accesibles, presentó un aporte al desarrollo de los gráficos 3D por computadora proponiendo una arquitectura de acople de métodos que aumente la calidad visual de las reconstrucciones en 3D.

Otro aporte importante tiene que ver con la creación de una base de datos estructurada, adquirida a través de un protocolo de condiciones controladas, que

pretende ser usada en investigaciones futuras de métodos que mejoren el procesamiento de información y la creación de estructuras en 3D más sólidas y visualmente agradables, y al final, con el objetivo de ser una herramienta accesible y comprensible se desarrolló una interfaz gráfica definida por un modelo intuitivo que permite la visualización de la base de datos y la ejecución de la arquitectura, por tanto, el usuario tendrá acceso a la información de las diferentes etapas de procesamiento.

### **Objetivo general**

Desarrollar una arquitectura experimental e interfaz de simulación para la digitalización tridimensional de objetos, a partir de imágenes y técnicas de medición de profundidad, que permita el acople de métodos de visión artificial.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar un protocolo de uso espacio de condiciones controladas con el fin de implementar el entorno de adquisición de imágenes y mediciones de profundidad.
- Construir una base de datos estructurada de imágenes y mediciones de profundidad que permita validar el protocolo de uso espacio de condiciones controladas.
- Proponer una arquitectura experimental de acople de métodos recomendados de visión artificial, mediante la integración de imágenes y métodos de medición de profundidad, que presente un buen compromiso entre la calidad y el detalle visual en la reconstrucción tridimensional.
- Implementar un simulador interactivo que permita visualizar la base de datos y ejecutar la arquitectura de reconstrucción tridimensional.

### **Organización del documento**

Se exponen los diferentes experimentos a los métodos de digitalización, así como también se ejecuta el proceso de validación del protocolo de condiciones controladas mediante la adquisición de la base de datos y las pruebas de desempeño de la arquitectura de acople propuesta. Del mismo modo, se presentan los resultados experimentales y el sistema de visualización de datos.

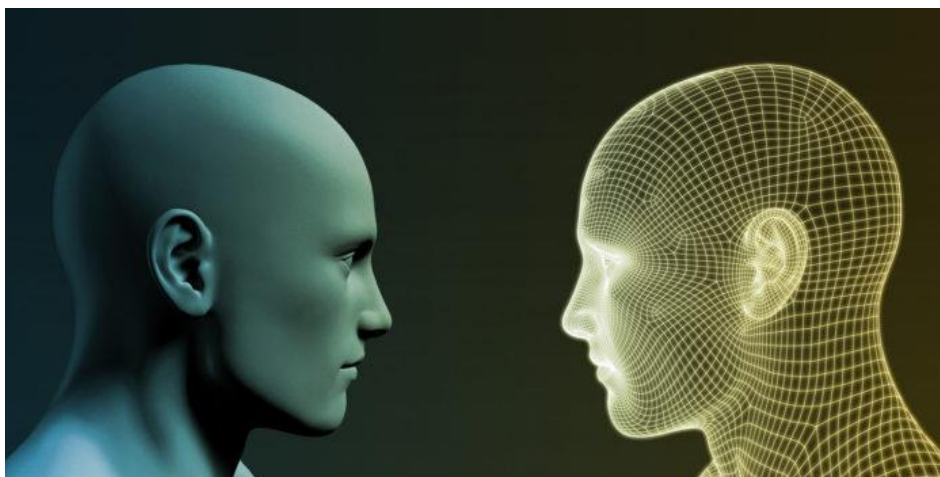
Se presentan las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron a partir de este trabajo, así como los trabajos futuros que pueden mejorar la metodología de adquisición y el procesamiento de datos.

### Marco teórico

Puede considerarse digitalización de objetos a cualquier técnica que permita transportar datos de un espacio real a un entorno computacional para que estos puedan ser interpretados, procesados, usados o almacenados. En la era digital en la que vivimos, estas técnicas se han diversificado y han llegado a las manos del público en general, creando nuevas necesidades y oportunidades para su uso (Torres, y otros, 2010), permitiendo a estas tecnologías alcanzar nuevos horizontes como la arquitectura, la medicina, el arte y más (Paez, y otros, 2016), (Parrilla, y otros, 2016), (Klenk, 2011).

La digitalización de objetos se ha convertido en una gran herramienta que evoluciona y se adapta constantemente, para dar paso a investigaciones complejas en sistemas de simulación en torno a la copia digital, como se puede apreciar en la **Figura 2**, que de otra forma serían complejos de realizar, dado la naturaleza de las estructuras ya sea por ser enormes, muy pequeñas, extremadamente frágiles, o encontrarse en zonas de difícil acceso como los fondos marinos (Manrique García, 2017).

**Figura 2.** Ilustración de un objeto real y su réplica virtual que contiene toda la información del sistema físico.



Fuente (Alfonso, 2018).

Entre las diversas técnicas de digitalización podemos mencionar las más importantes, las imágenes adquiridas por cámaras fotográficas digitales y los escáneres basados en laser. Por consiguiente, la selección de técnicas a usar

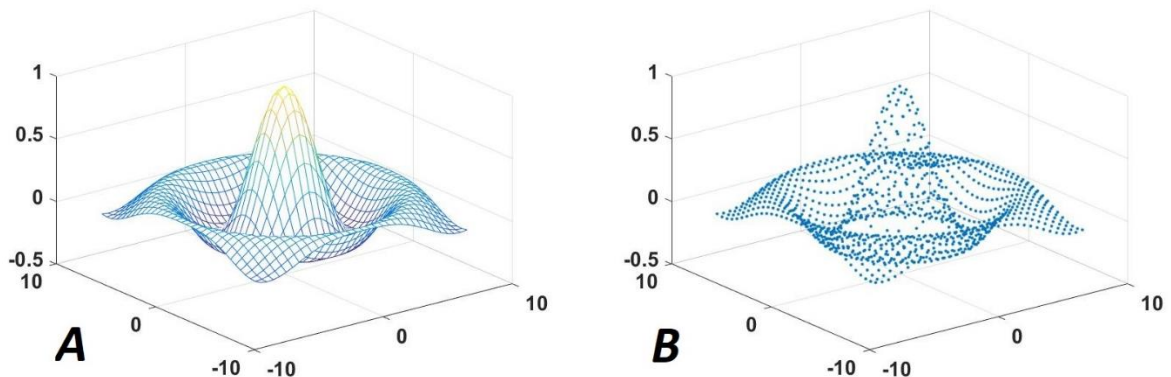
depende de los objetivos y condiciones del proyecto, si la precisión geométrica es su objetivo principal, se recomienda el uso de las tecnologías basadas en láser, si se requiere calidad visual se recomienda el uso de imágenes. Otro factor influyente es el presupuesto, debido a que ciertas técnicas de adquisición de datos pueden no ser factibles si el costo de los instrumentos base son demasiado altos y el tiempo de ejecución es demasiado largo (Ortiz, y otros, 2006).

### Geometría computacional

Se ocupa del diseño y análisis de algoritmos de computación, para generar o aproximarse a una solución del problema de tipo geométrico, puede abarcar múltiples dimensiones e integra técnicas como: la geometría clásica (Hoffmann, 1992), la teoría de grafos (Menéndez Velázquez, 1998), la teoría de conjuntos y el álgebra lineal. Con la finalidad de producir interpretaciones estructuradas de conjuntos de datos que posteriormente pueden ser procesadas, interpretadas o almacenadas.

La geometría computacional en este trabajo de grado, se abarcó desde la visión de los gráficos por computadora (de Berg, y otros, 1997), especialmente en el área de modelado de objetos por adquisición de datos. A fin de dar solución geométrica a un conjunto de puntos, para transformarlos en superficies que representan objetos reales. Estas superficies son de constitución poligonal, que pueden ser modificadas por programas de modelamiento (Olachea, 2014), la construcción de una superficie poligonal a partir de una nube de puntos puede verse en la **Figura 3**. Además de interpretar los datos de forma gráfica, tenemos la posibilidad de agregar texturas, que aportan información adicional a la constitución de los objetos digitales.

**Figura 3.** En A) se observa la trama de la función sinc y en B) su nube de puntos.



Elaboración propia.



La complejidad computacional de los algoritmos, puede desembocar en grandes tiempos de ejecución, debido a que, la geometría computacional no se preocupa de la robustez de los algoritmos, siempre que los resultados sean óptimos.

Para la constitución de estructuras poligonales existen diversos métodos como los diagramas de Voronoi y las triangulaciones de Delaunay, basados en la distancia euclidiana, para dar soluciones geométricas a las estructuras; estos métodos se explican a continuación.

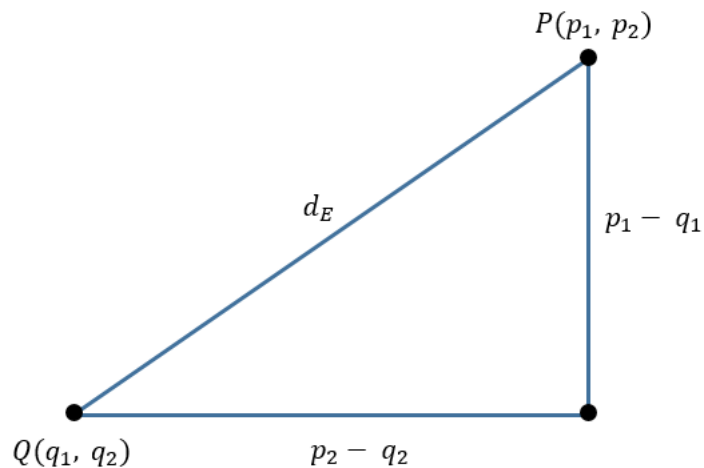
### Distancia Euclidiana

Distancia ordinaria que existe entre dos puntos en un espacio Euclideo, espacio geométrico donde se satisfacen los axiomas de Euclides de la geometría (Cuadras, 1989), el cual puede poseer n dimensiones. La distancia euclidiana entre los puntos  $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  y  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ , se define como:

$$d_E(P, Q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \quad (1)$$

En 2D, gráficamente se puede ver en la **Figura 4**.

**Figura 4.** Representación gráfica de la distancia euclidiana en 2D.



Elaboración propia.

Esta distancia se usa para calcular los diagramas de Voronoi y las triangulaciones de Delaunay, su importancia en el trabajo de grado radica no solo en el cálculo de los polígonos para generar superficies, sino también que es posible filtrar datos atípicos a la nube de puntos que no pueden ser eliminados por otros filtros. Limitar

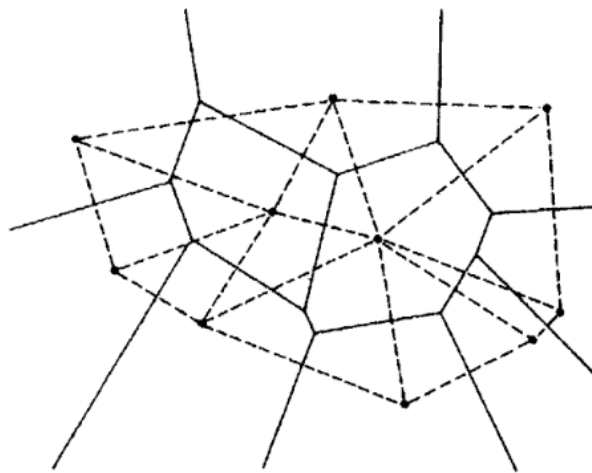
la distancia euclidiana permite remover datos que afectan la estructura de los objetos digitales, aunque esto solo es posible debido al conocimiento que se tiene de la naturaleza de los datos y su organización.

### Diagramas de Voronoi

Los diagramas de Voronoi, nombrados alternativamente Polígonos de Thiessen, son uno de los métodos de interpolación más simples, están basados en la distancia euclidiana para la construcción de polígonos irregulares alrededor de los puntos que conforman la nube. Tiene un amplio campo de aplicación, se encuentran además en los gráficos por computadora, en áreas como la epidemiología, la geofísica y la meteorología, debido a que su estructura permite observar las distribuciones de los datos, que resulta útil cuando la información se compone de puntos separados y no es posible observarla de manera sencilla. También ayuda a encontrar estructuras y patrones en los conjuntos de información.

Los diagramas de Voronoi presentan una mayor utilidad en su aplicación en 2D para determinar patrones de distribución, su aplicación en 3D y en este caso particular, en el cálculo de la malla de puntos, tiene algunos inconvenientes. Principalmente, por no generar polígonos cuyos vértices son los puntos de la nube sino polígonos en un espacio bidimensional alrededor de puntos (ver **Figura 5**), la falta de una estructura consecuente dificulta procesos posteriores para variar los modelos y aplicar texturas. No obstante, su observación fue importante, dado que, las nubes de puntos se pueden observar también en 2D, esta técnica permitió visualizar de manera rápida patrones en la superficie de los objetos y ayudar con el filtrado de puntos atípicos a las figuras.

**Figura 5.** Un diagrama de Voronoi (líneas continuas) y teselación de Delaunay (líneas discontinuas).



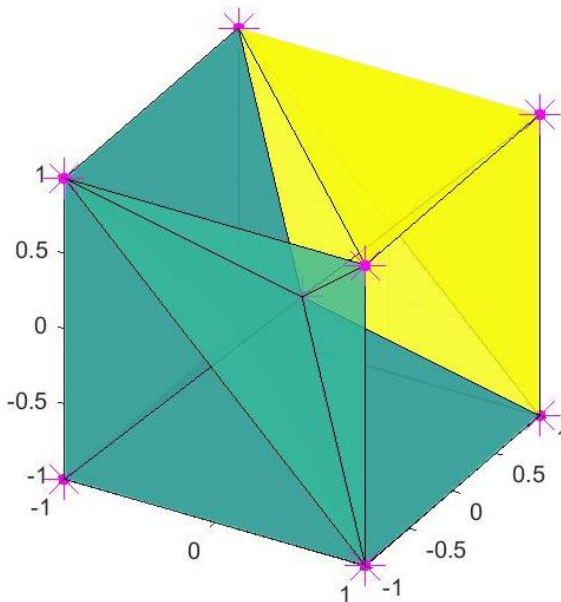
Fuente (Okabe, y otros, 2009).

### Triangulaciones de Delaunay

Uno de los métodos más populares y utilizados en la generación de mallas en 3D (Golias, y otros, 1997). Las triangulaciones de Delaunay corresponde a una serie de triángulos en 2D o tetraedros en 3D que cumplen con la condición de Delaunay, esta condición establece que la circunferencia en 2D, o la esfera en 3D, circunscrita a las estructuras triangulares, no debe contener ningún vértice que pertenezca a otra estructura triangular. Es necesario resaltar que, aunque no permite valores dentro del área de la esfera si se admiten los que estén situados sobre la circunferencia.

En los gráficos 3D por computadora se usan redes de polígonos para el modelamiento de objetos tridimensionales, estos polígonos se juntan para imitar la superficie de los objetos. En general, se usan triángulos debido a que, se trata de los polígonos más simples, además de que cuentan con propiedades favorables, como que representan una superficie coplanar. El modelamiento 3D se puede hacer bien sea de forma manual, o en el caso de este proyecto de grado recurriendo a un escáner de profundidad, que produce un relieve de la figura generando una nube de puntos, que, para poder ser manipulados se transforman en una red de triángulos que describen la superficie, a este proceso se le conoce como triangulación y se pueden observar en la **Figura 6**.

**Figura 6.** Triangulación de Delaunay aplicada a una nube de puntos que describe un cubo.



Elaboración propia.

Existen múltiples algoritmos para crear triangulaciones de Delaunay a partir de un conjunto de puntos, pero todos los algoritmos inspeccionan si un punto se encuentra dentro de la circunferencia circunscrita, este proceso puede ser robusto y lento computacionalmente, pero es necesario que sea muy eficiente para minimizar errores. Los algoritmos más utilizados son: la construcción incremental, divide y vencerás, y recorrer la línea (Gallardo Palacios, 2012).

## Medidas de posición estadísticas

Estas medidas nos permiten la descripción de un hecho o un conjunto de observaciones, si las medidas son aplicadas a las características de una población se las conoce como *parámetros*. Dependiendo de la naturaleza de los datos, el objetivo que se tiene y las características que representan, requieren de la aplicación de un promedio estadístico especial, a continuación, se describen algunos promedios estadísticos, también deben tenerse en cuenta algunas reglas para la selección de la herramienta de descripción (Ciro).

### Media aritmética

Es la medida de posición o promedio más entendida, por su estabilidad es utilizada en el muestreo, otra de ventaja es, que se puede obtener cuando no es posible calcular otros tipos de medidas de posición. Su desventaja principal, es ser muy sensible al cambio en sus observaciones, también, cuando existen valores atípicos (Ciro).

Debe tenerse en cuenta que cuando la distribución es asimétrica, de tal forma que la *media*, *mediana* y la *moda* difieran en forma apreciable, debe considerarse que el promedio aritmético pueda no ser el valor único representativo de la serie.

Se define como “*la suma de todos los valores observados, divididos por el número total de observaciones*”. La media aritmética de  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , se define como:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

### Valor central

El valor central o también conocido como mediana, es considerado también, como una medida de tendencia central, sus fórmulas son rígidas ya que no admiten tratamiento algébrico, tiene como ventaja que, los valores atípicos no tienen ninguna incidencia en su cálculo. Cuando los valores extremos de una distribución de

variable continua no están definidos, la mediana es la única medida de tendencia central que puede utilizarse (Ciro).

Como desventaja, esta medida no se adapta a cálculos posteriores, por cuanto, si obtenemos las medianas de diferentes subconjuntos, no se podrá calcular la mediana para el conjunto.

Se define como, “*aquel valor de la variable que supera a no más de la mitad de las observaciones, al mismo tiempo, es superado por no más de la mitad de las observaciones*”.

Para calcular la mediana, en un conjunto de datos con  $n$  observaciones, lo primero que se debe hacer, es ordenar los datos de mayor a menor o viceversa, para proseguir consideramos dos casos:

**Caso1:** Si  $n$  es *impar*, la media será igual al valor central.

**Caso2:** Si  $n$  es *par*, en este caso encontramos dos valores en el medio de la serie, por tal razón la mediana es el promedio de ellos.

### **Valor modal**

El valor modal o moda se define como, “*el valor de la variable que presenta mayor número de observaciones*”, puede que una distribución tenga más de una moda, se dice que es *multimodal*, es la única medida de dispersión que puede ser aplicada en atributos, es decir, variables cualitativas. Al igual que la mediana no puede ser utilizada en procesos algebraicos posteriores (Ciro).

### **Cuartiles y percentiles**

Cuando la distribución está constituida por un número grande de intervalos, se hace necesario calcular un promedio sobre una parte de ella, en estos casos la distribución puede ser dividida en cuatro o cien partes. En el primer caso nos referimos a *Cuartiles* y en el segundo a *Percentiles* (Ciro).

En los Cuartiles se podrá obtener:  $Q_1$  como *primer cuartil*,  $Q_2$  *segundo cuartil* y  $Q_3$  corresponde al *tercer cuartil*.

El primer cuartil, es aquel valor de la variable que supera al 25% de los datos y a la vez es superado por el 75%.

El segundo cuartil o *percentil cincuenta*, es aquel valor de la variable que supera al 50% de los datos y a la vez es superado por el 50%. Es decir, corresponde a la mediana.

En los Percentiles, el *percentil cuarenta*, es aquel valor de la variable que supera al 40% de los datos y a la vez es superado por el 60%.

El cálculo de los Cuartiles y Percentiles es bastante parecido al procedimiento para calcular la Mediana, salvo una variación, al establecer la posición donde se debe ubicar la respectiva medida. Para un conjunto de datos con  $n$  observaciones, primero se ordenan los datos de mayor a menor o viceversa.

**Cuartiles:** Para el  $Q_c$ , donde  $c \in \{1, 2, 3, 4\}$ :

$$Q_c = \frac{c(n+1)}{4} \quad (3)$$

**Percentiles:** Para el  $Q_p$ , donde  $p \in \{1, 2, \dots, 100\}$ :

$$Q_p = \frac{p(n+1)}{100} \quad (4)$$

### Medidas de dispersión estadísticas

Son parámetros estadísticos que indican cómo se alejan los datos respecto de la media aritmética, sirven como indicador de la variabilidad de los datos. Por ejemplo, si calculamos la media, no sabemos hasta donde se da la representatividad para ese conjunto de datos, sin embargo, es posible determinar si hay concentración de los datos alrededor del promedio, el cual nos indicaría una buena aplicación, por el contrario, si hay una gran dispersión estaría indicando poca representatividad, por lo tanto, no sería confiable para el conjunto. Entre las medidas de dispersión tenemos (Ciro).

#### Varianza

La Varianza se define como, “la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones entre los valores que toma la variable y su media aritmética”. La varianza de  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , si su Media es  $\bar{x}$ , se define como:

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \bar{x}) + (x_2 - \bar{x}) + \dots + (x_n - \bar{x})}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{n} \quad (5)$$

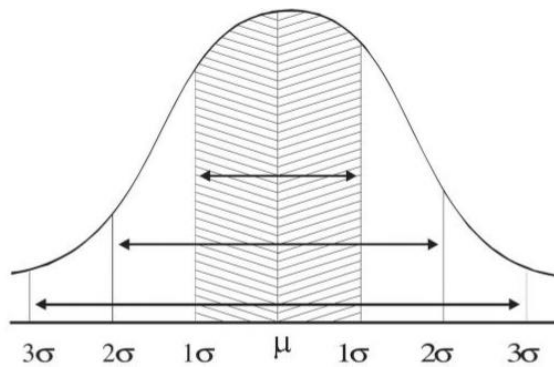
### Desviación estándar

La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza, considerada siempre con signo positivo:

$$\sigma = +\sqrt{\sigma^2} \quad (6)$$

Gráficamente para una distribución normal teniendo en cuenta la Media, la Mediana y la Moda son iguales, corresponderá al valor central de la distribución  $\mu = \bar{x}$  como se observa en la **Figura 7**.

**Figura 7.** Distribución normal.



Fuente (Ciro).

### Rango Intercuartílico

El Rango Intercuartílico, se define como, “la diferencia entre el tercer cuartil y el primero” tal que:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (7)$$

### Imágenes digitales

Las imágenes digitales son representaciones bidimensionales de una imagen a partir de una matriz numérica, estas pueden ser de 2 tipos, las imágenes vectoriales que están compuestas por entidades geométricas simples, y las imágenes de mapa de bits, que se usaron para el desarrollo de este proyecto, compuestas por una gran cantidad de píxeles, donde cada píxel se encuentra relleno de un color uniforme.

Las imágenes son una de las principales herramientas de la visión artificial, permiten la obtención de características del entorno, que posteriormente se almacenan, procesan e interpretan con un objetivo, que puede ser procesos de automatización,

control, robótica, diagnóstico médico o como en el caso de este proyecto, a la reconstrucción 3D. La visión artificial busca emular la capacidad de algunos seres vivos de interpretar su entorno por medio de escenas tomadas desde un mundo 3D a partir de imágenes en 2D que, con un compendio de técnicas como la óptica, la electrónica, la geometría, la física de los colores, los algoritmos y los sistemas de computación, permiten dotar a las máquinas de un sistema de visión logrando automatizar los procesos (García S., y otros, 2015).

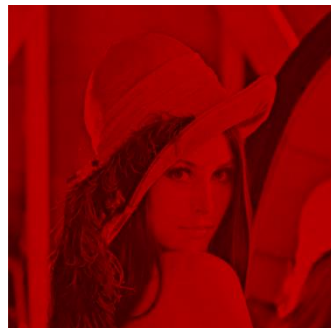
### Imagen RGB

Existen múltiples formas de representar la luz reflejada por un objeto, la más común es la forma de descomposición en colores primarios computacionales, rojo, verde y azul, representados por sus siglas en inglés RGB (Red-Green-Blue), cada uno representa un canal de la imagen (ver **Figura 8**). La descomposición es asociada con los valores de intensidad de los canales, los cuales están entre 0 y 255, de modo que un valor de 0 indica la completa ausencia de color (color negro) y el valor 255 es relacionado con el máximo valor de intensidad (color blanco).

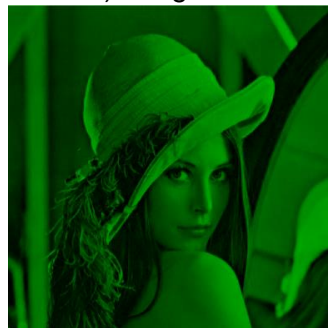
**Figura 8.** En A) se puede observar una imagen 'Lena' de tres canales (imagen RGB). Donde B) representa el nivel de intensidad del color rojo (canal 1), C) el nivel de intensidad del color verde (canal 2) y por último D) representa el número los valores de intensidad del color azul (canal 3).



A) Imagen RGB



B) Canal Rojo



C) Canal Verde



D) Canal Azul

Elaboración propia.



### Imagen en Escala de Grises

En computación una escala de grises, es una escala empleada en la imagen digital en la que, el valor de cada píxel posee un valor equivalente a una graduación de gris, este valor se encuentra entre 0 y 255. Se puede convertir una imagen RGB a escala de grises, al realizar sobre esta una suma ponderada de sus canales R, G y B como se observa en la **Figura 9**.

**Figura 9.** Transformación de la imagen de 'Lena' a escala de grises.



Elaboración propia.

### Imagen Binaria

Una imagen binaria es una imagen digital que tiene únicamente dos valores posibles para cada píxel, generalmente 1 y 0. Normalmente, los colores utilizados para su representación son negro y blanco, aunque puede usarse cualquier pareja de colores. Uno de los colores se emplea como fondo y el otro para los objetos que aparecen en la imagen. La binarización de una imagen es un proceso en el que se selecciona un umbral discriminante entre 0 y 255, y se reasignan valores de 1 y 0 a cada píxel de la imagen con respecto a este umbral como se ilustra en la **Figura 10**.

**Figura 10.** Transformación de la imagen de 'Lena' a imagen binaria.



Elaboración propia.

### **Procesamiento de imágenes digitales**

El procesamiento de imágenes hace referencia al conjunto de técnicas que se aplican a imágenes digitales, en busca de mejorar su calidad o facilitar la búsqueda de información, las imágenes pueden representarse por matrices numéricas de 2D. En el desarrollo de este trabajo de grado se propuso el uso del procesamiento de imágenes, que permitieron obtener información relevante sobre los atributos visuales del objeto a digitalizar, para la elaboración de copias en 3D, haciendo uso del proceso de texturizado, detección de bordes, reconocimiento de patrones, entre otros (Domínguez Torres, 1996).

El procesamiento de imágenes digitales permitió observar patrones y formas en las figuras, que, posteriormente fueron representadas en un espacio de 3D para mejor la definición de los modelos digitales. En los gráficos 3D por computadora el procesamiento de las imágenes permite añadir detalles a los modelos, se convirtió también en una herramienta importante en el filtrado de datos, obtenidos por sensores de medición de profundidad, el agregar imágenes al proceso logró acelerarlo de manera significativa, mejorando la exactitud de los modelos y principalmente el detalle visual.

## 1. METODOLOGÍA

### 1.1. TÉCNICAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la medición de características físicas de objetos se seleccionaron las siguientes técnicas de adquisición de datos.

#### 1.1.1. Adquisición de medidas de profundidad

La adquisición de mediciones de profundidad se realizó mediante un dispositivo de medición basado en láser. El uso de los sensores láser mejoró el detalle en la digitalización de objetos 3D, los sistemas se han simplificado, ahora son más accesibles y fáciles de utilizar. El avance de las tarjetas de desarrollo tipo Raspberry o Arduino, han contribuido a que los dispositivos de muestreo láser sean herramientas de bolsillo, de bajo costo y eficientes, aunque esto no anula todos los problemas que tienen estos dispositivos, como una alta sensibilidad al movimiento, los errores que generan las superficies reflejantes, o el problema para detectar objetos transparentes.

Aunque los sistemas han mejorado, la reducción del tamaño y robustez de los dispositivos se logró sacrificando otros aspectos, como la resolución de los datos. Los sistemas simples tienen resoluciones a nivel de centímetros mientras que escáneres especializados tienen resoluciones capaces de capturar detalles de proporciones nanométricas sin problemas. No obstante, se tiene en consideración el costo beneficio y la capacidad computacional; se consideró que el escáner laser Scanse Sweep representado en la **Figura 11**, usado en este trabajo de grado, aun siendo simple, fue suficiente para las pruebas realizadas, la creación de una base de datos y el diseño de un acople experimental de técnicas de digitalización.

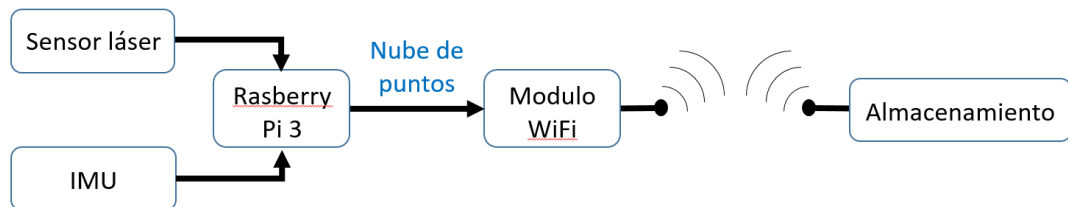
**Figura 11.** Scanse Sweep, sensor de escaneo laser.



Elaboración propia.

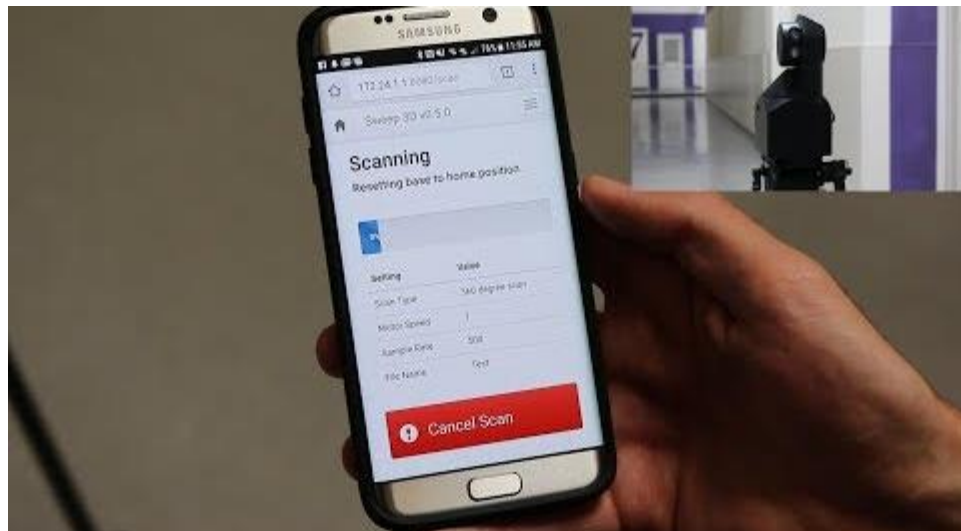
El sensor Scanse Sweep fue facilitado por el departamento de Electrónica de la Universidad de Nariño, el sensor Scanse hace uso de un láser giratorio capaz de rotar 360 grados, obteniendo datos de las superficies y pre-procesándolas a través de una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 que se encuentra integrada en el dispositivo, en la **Figura 12** se puede observar el diagrama interno del dispositivo. Las especificaciones técnicas del sensor laser pueden ser consultadas en su hoja de datos (Scanse). La tarjeta Raspberry Pi 3 permite transmitir los datos vía wifi a un dispositivo conectado a la red, la tarjeta crea una red wifi llamada Pi3-AP, la conexión a esta red está protegida por la contraseña 'Raspberry'. El acceso del dispositivo conectado, a la aplicación de configuración, se realiza por medio de la dirección IP <http://172.24.1.1:8080/> en cualquier navegador (Scanse, 2017) (ver **Figura 13**) y las pruebas realizadas para validar su uso pueden ser revisadas en la sección de resultados de este trabajo de grado.

**Figura 12.** Diagrama de los componentes internos del Scanse Sweep.



Elaboración propia.

**Figura 13.** Aplicación web escáner 3D.



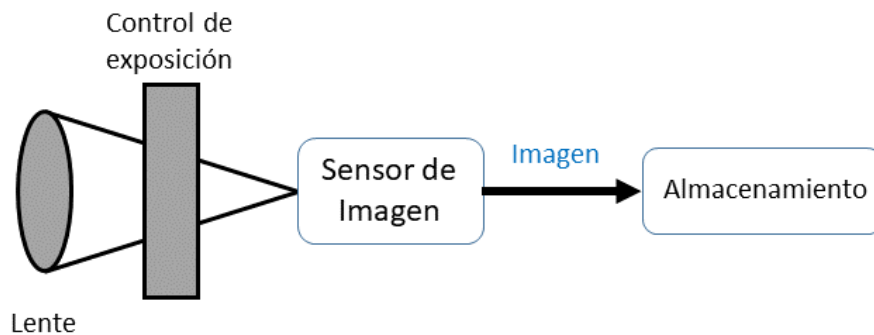
Fuente (Scanse, 2017).

### 1.1.2. Adquisición de imágenes

La digitalización por imágenes o fotografía digital, es uno de los métodos más populares en la actualidad debido a su fácil acceso, la aparición de los teléfonos inteligentes, permitió que este método se emplee en múltiples ámbitos de la vida diaria. Las imágenes son una fuente increíble de información y una manera simple de obtener replicas digitales de objetos, si bien estas replicas se encuentran en 2D y no presentan mayor información sobre los objetos, como su tamaño, material, altura y profundidad, existen métodos para determinar algunas de estas características a partir de múltiples imágenes de un objeto.

En el desarrollo de este trabajo de grado se usó un teléfono inteligente de gama media con una cámara posterior de 13 megapíxeles de resolución máxima, que adquiere múltiples imágenes de los objetos, las imágenes se tomaron con una resolución de 3264X1836 píxeles, no se usó la resolución máxima para evitar largos tiempos de procesamiento y gran espacio de almacenamiento de los datos. Se usó como herramienta de adquisición un teléfono inteligente de gama media, debido a que solo cumple con la función de adquisición de imágenes, como se muestra en la **Figura 14**; el procesamiento se realizó en un sistema computacional robusto. Además, son teléfonos con características aceptables en sus cámaras y muy accesibles, el teléfono cuenta con un sistema de activación de la cámara por comandos de voz que evito interferencias durante la adquisición de los datos, logrando reducir los errores y posibles vibraciones en la plataforma.

**Figura 14.** Diagrama de adquisición de imágenes digitales.



Elaboración propia.

## 1.2. PROTOCOLO DE USO DE ESPACIO DE CONDICIONES CONTROLADAS

El protocolo de uso del espacio de forma constante y controlada, definió las normas específicas en la adquisición de datos, en pro de reducir los errores en las medidas, manteniendo al mínimo el número de variables desconocidas del proceso experimental. El haber definido un protocolo, es fundamental para poder formar una

base de datos estructurada, con la finalidad de que, esta no esté sujeta a variaciones de posición o iluminación que pudieran interferir parcial o totalmente con el desarrollo de los experimentos posteriores y que permitió ejecutar algoritmos generales para procesar los datos con resultados óptimos en función del sistema de adquisición.

El protocolo para el sistema de adquisición laser y fotográfico se estableció de tal forma que afecte en menor medida la toma de muestras, los sistemas laser pueden ser sensibles al movimiento, no solo de vibraciones, sino también a presencias en movimiento en las tomas realizadas, que pueden generar lecturas erróneas, también afecto en menor medida la incidencia lumínica en el área de trabajo, y principalmente las superficies reflejantes, que generaron datos duplicados o erróneos que afectaban directamente la calidad de la reconstrucción.

Para las imágenes se condicionó la iluminación, buscando limitar la calidad de las imágenes, y evitar mayor cambio en la gama de colores entre tomas, que afectarían el proceso de filtrado de datos. Las vibraciones se presentaron también como un problema, dificultaron el enfoque de la cámara, difuminaron la imagen, o agregaron demasiado ruido, lo más prudente que se realizó, fue asegurar un fondo que facilitó el proceso de filtrado, la construcción de una plataforma mecánica permitió mantener un radio específico entre las tomas de datos, conocer el desplazamiento de los sensores, se mantuvo estáticos los objetos y los sensores durante el proceso de adquisición.

### **1.2.1. Clave de color**

La clave de color o croma consiste en eliminar un color en una imagen y reemplazarla por otro color o imagen, principalmente se usa con los colores azul y verde como en la **Figura 15**. En el protocolo de uso de espacios fue útil para diferenciar un objeto único en una escena y permitió filtrar el fondo de manera rápida y sin complicaciones, siempre que, el objeto no tuviera una fuerte presencia de este color. La clave del color fue eficiente y fácil de aplicar, lo que permitió reducir el costo computacional del procesado de imágenes, y ofreció constancia durante la adquisición de datos, esta adición al protocolo facilitó la extracción del objeto en cada toma.

**Figura 15.** Ilustración de la técnica Croma sobre la imagen 'Jarron000' de la base de datos.

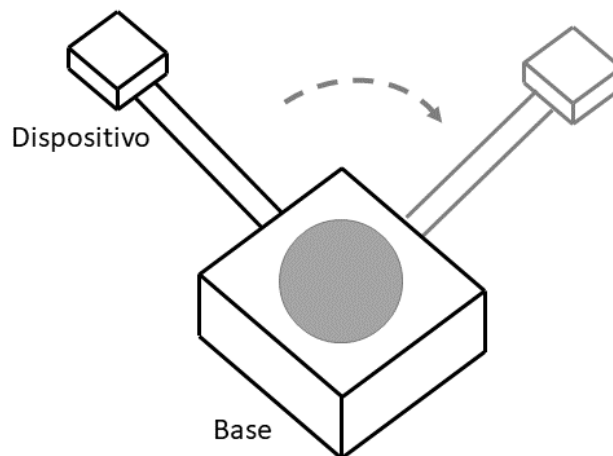


Elaboración propia.

### 1.2.2. Plataforma

El diseño de una plataforma de soporte para los objetos a ser digitalizados y los sensores fue fundamental en el protocolo de adquisición de datos, concedió que los objetos permanezcan estáticos sobre una superficie sin perturbaciones, durante la adquisición de datos, la plataforma facilitó el desplazamiento circular de los sensores, con un brazo adherido a un sistema de rodamiento que le permitió rotar 360 grados alrededor del objeto, manteniendo la posición del sensor siempre estable en torno al punto central de la plataforma como se muestra en la **Figura 16**.

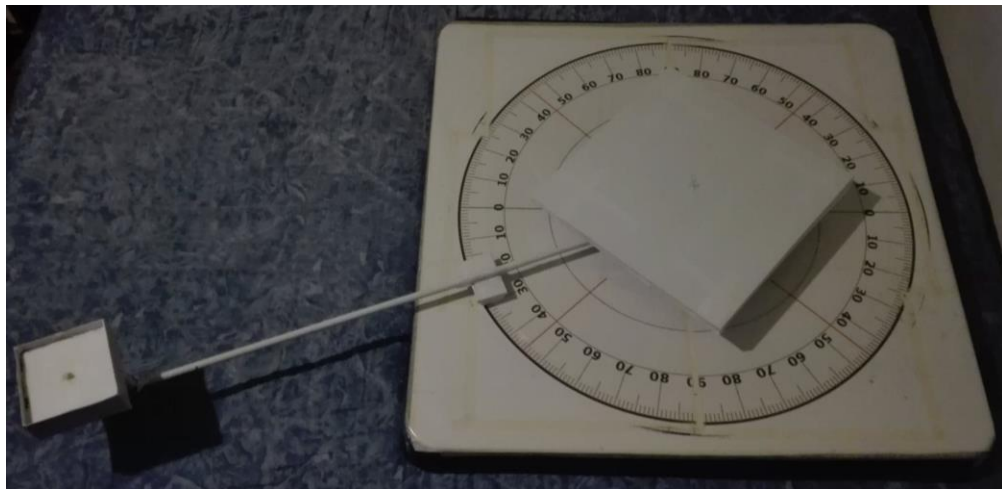
**Figura 16.** Esquema de la plataforma de la adquisición de datos.



Elaboración propia.

Se lograron tomas con constancia en la variación del ángulo, permitiendo un modelo consecutivo de tomas, que ayudo durante la experimentación para el diseño de filtros; además la plataforma otorgó parámetros de calibración como la distancia entre el objeto y los dispositivos de adquisición, distancia que fue calculada con el proceso de prueba y error, separando el dispositivo del objeto gradualmente hasta que se obtuvo una distancia óptima que redujera los errores para la adquisición de datos; y el ángulo entre tomas que fue utilizado como parámetro para la reconstrucción en 3D. Este parámetro de desfase permitió unificar las tomas. En la **Figura 17** se muestra una fotografía de la plataforma.

**Figura 17.** Plataforma de adquisición de datos.



Elaboración propia.

### **1.2.3. Factores de incidencia lumínica**

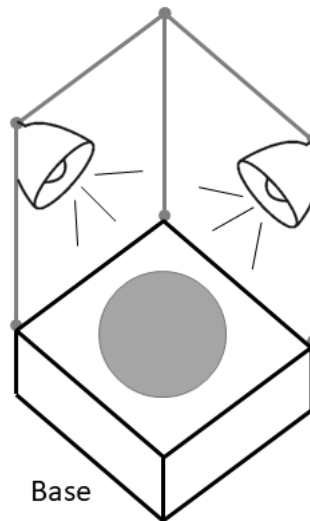
Una iluminación que se mantuvo invariante, en el tiempo y con respecto a la visión de toma, fue fundamental para mantener el nivel de saturación de luz en las imágenes y prevenir la variación de los colores. Una buena iluminación ayudo a reducir el sombreado de los objetos, facilitando el proceso de filtrado en las imágenes, mientras que para el sistema laser las fuentes de luz de alta intensidad produjeron errores y falsas respuestas, puntos aleatorios en el entramado que afectaron el proceso de reconstrucción.

Los objetos reflectantes presentaron problemas en la adquisición de datos, las cámaras sensibles a la sobreexposición lumínica perdieron el enfoque de la imagen y entregaron resultados no satisfactorios, creando la necesidad de repetir el proceso de adquisición, procedimiento no óptimo. Una iluminación generalizada que afectara en menor medida a la adquisición de imágenes y laser, proveyó al sistema la capacidad de tomar datos concluyentes, evitando la repetitividad en el proceso y resultados ilógicos durante la experimentación.



La incidencia lumínica afecto directamente la creación de sombras en la escena, estas generaron una pérdida de información durante el filtrado de las imágenes digitales, por ser consideradas como parte del objeto, la eliminación del sombreado se logró con un correcto posicionamiento de las fuentes de iluminación, este posicionamiento se muestra en la **Figura 18**. Para este propósito, se añadieron 2 fuentes de luz artificial, colocadas sobre la estructura, se probaron diferentes configuraciones en la posición de las fuentes de iluminación, un proceso de ensayo y error, nos permitió determinar una posición óptima.

**Figura 18.** Esquema de iluminación con respecto a la plataforma de adquisición.



Elaboración propia.

### 1.3. ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS

En el desarrollo de este trabajo de grado, se construyó una base de datos de imágenes y técnicas de medición de profundidad, por medio del protocolo de uso de espacio de condiciones controladas, que estableció patrones controlables en la información, la base de datos está constituida por información relevante sobre los objetos digitalizados y necesaria para ser reconstruidos en el espacio de 3D.

La base de datos se compone de documentos CSV que contienen matrices de las nubes de puntos entregada por el sensor laser, que fueron adquiridas desde una posición fija y que representan al objeto en los 360 grados, la información de la plataforma y el entorno que permitió el procesado y filtrado. La nube de puntos que representa únicamente al objeto para cada una de sus escenas, los datos filtrados y la nube de puntos que unifica todas las escenas. Las imágenes de forma similar a la nube de puntos, se presentan en múltiples etapas, la imagen en bruto,

proporcionada por el sensor, las imágenes de las etapas de pre-procesamiento y la textura generada por el procesamiento del conjunto de imágenes.

La base de datos estructurada cuenta también con un documento, para cada objeto, que describe sus características físicas, esto con la finalidad de que los datos se puedan operar en futuras investigaciones y aportar al desarrollo de técnicas científicas de reconstrucción 3D u otros campos.

#### **1.4. PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS**

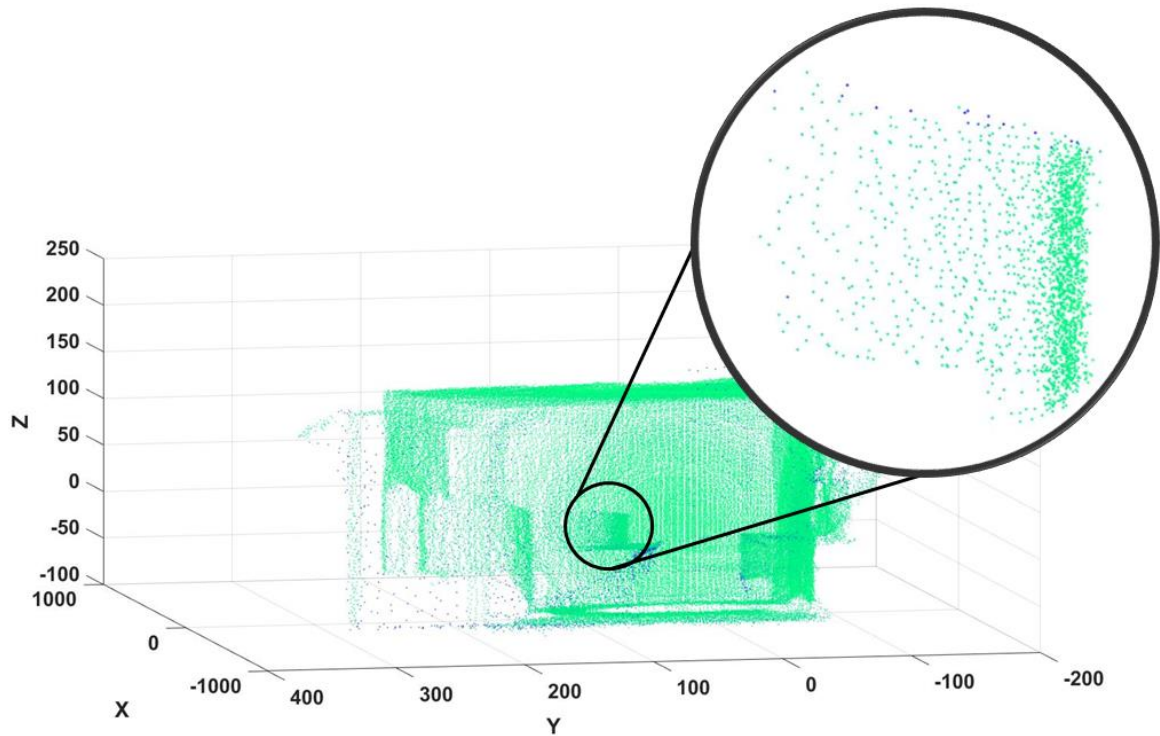
Antes de usar la información, fue necesario someter los datos adquiridos a múltiples etapas de pre-procesamiento que adaptaron la cantidad de los datos, eliminaron datos erróneos, que redujeron el tiempo de ejecución y mejoraron el desempeño de los algoritmos de reconstrucción.

##### **1.4.1. Extracción de la información del objeto de la escena**

Para extraer la información que representa al objeto de interés de la escena general, que es una nube de puntos proporcionada por el sensor laser, fue limitado el espacio en sus coordenadas cartesianas, estos límites son constantes al estar determinados por el tamaño de la plataforma, la distancia entre el sensor y el objeto; y el tamaño máximo de los objetos. Este límite se determinó como una esfera de radio  $60\text{cm}$  y centro en  $(0, 77, 0)$ , donde  $77$  en el *eje Y* representa la distancia en centímetros entre el centro de la plataforma y el sensor; y un corte transversal en el *eje Z* en  $-18$ , que determino la ubicación de la base en la plataforma donde se ubica el objeto.

En la **Figura 19** se muestra la escena tomada a  $0$  grados del objeto 'cube', especificando cual es la información de interés correspondiente al objeto, que se busca extraer.

**Figura 19.** Escena a 0 grados del objeto 'cube'.



Elaboración propia.

#### 1.4.2. Eliminar puntos atípicos a partir del rango Intercuartílico

Este algoritmo se basó en determinar del primer  $Q_1$  y tercer  $Q_3$  cuartil, del conjunto de datos. Fue eficiente por que la presencia de valores extremos no tuvo mayor influencia, como se explicó en el marco teórico. Se determinó los límites a partir de los cuales se identifican que valores son atípicos.

$$p < Q_1 - Cv * IQR$$

(8)

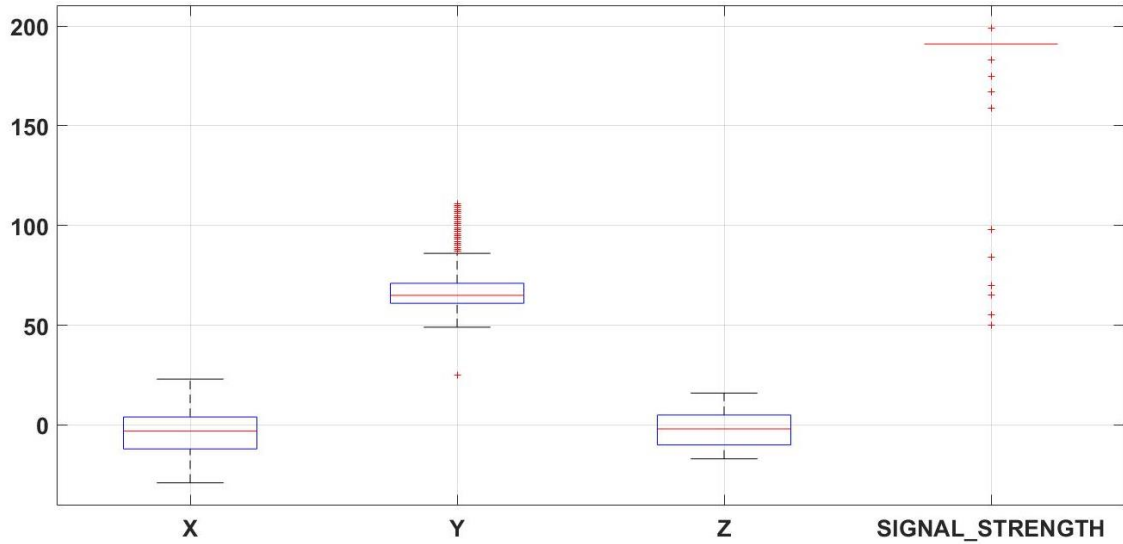
$$p > Q_3 + Cv * IQR$$

La **ecuación 8** representa matemáticamente los límites inferior y superior, debe superarse los límites para que un punto  $p$  se considere como valor atípico.  $IQR$  es el rango intercuartílico y  $Cv$  es una constante que permitió ajustar la proporción de registro a datos como valores atípicos.

En la **Figura 20** se muestra el diagrama de cajas para la cara del objeto 'cube' a 0 grados donde los puntos en rojo son los valores a típicos que se busca filtrar de los datos y en la **Figura 21** se muestra la representación en nube de puntos donde los

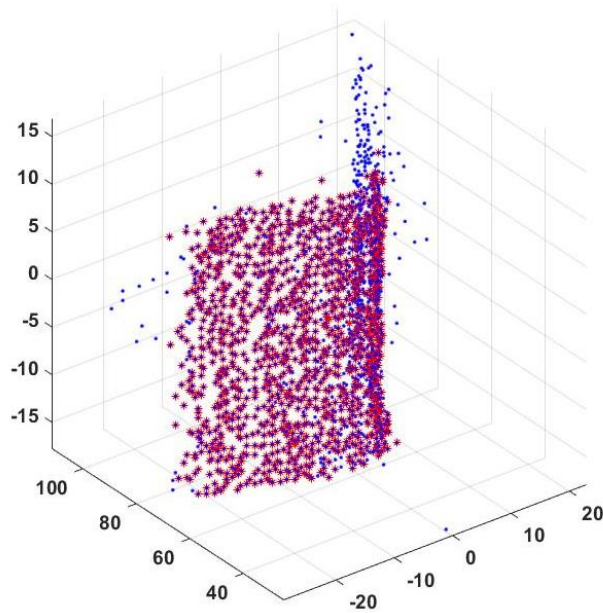
puntos en rojo son aquellos que se conservaron, mientras que los puntos azules son los valores atípicos.

**Figura 20.** Diagrama de cajas para los datos de la cara del objeto 'cube' a 0 grados.



Elaboración propia.

**Figura 21.** Cara del objeto 'cube' a 0 grados donde los puntos azules son los valores atípicos.

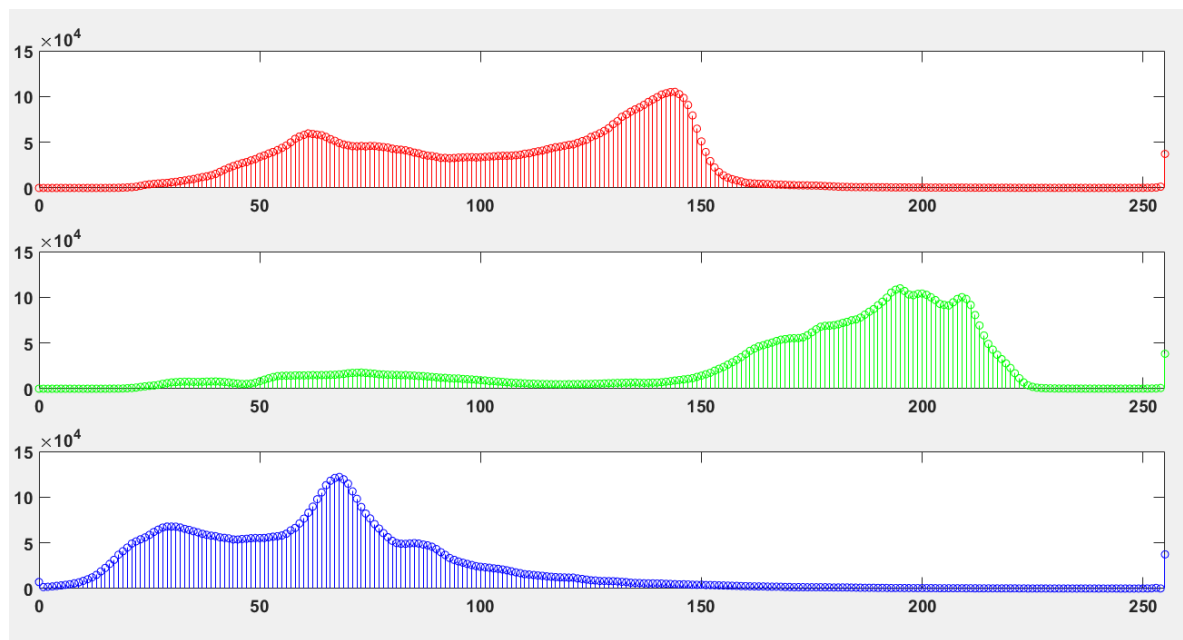


Elaboración propia.

### 1.4.3. Eliminar Fondo de una imagen

Al tener la imagen RGB se realizó una observación directa a su patrón de colores, en el histograma de la imagen en la **Figura 22**. Gracias al haber seleccionado un fondo de color constante y haber evitado que los objetos de la base de datos tengan una gran composición de este color, fue posible discriminar el objeto del fondo.

**Figura 22.** Histogramas de los canales R, G y B de la imagen “Jarron000”.

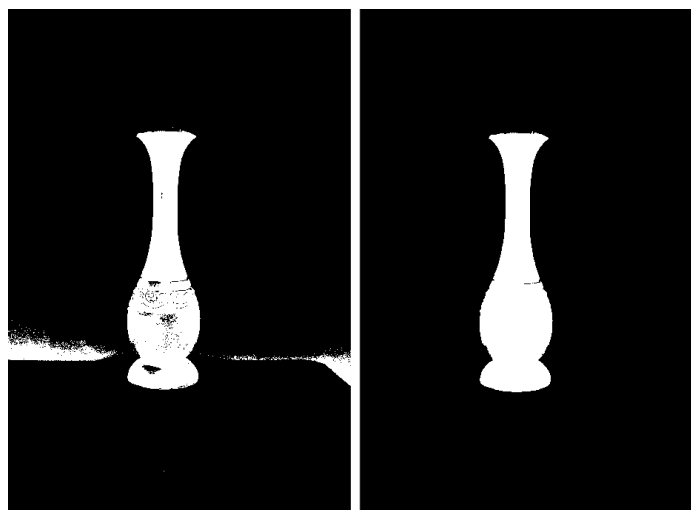


Elaboración propia.

Para la eliminación del fondo, a partir del histograma, se transformó la imagen a escala de grises y se realizó el proceso de binarización, donde el umbral fue determinado por el histograma en busca de eliminar el fondo.

Es posible que en la imagen binaria se presentaran cuerpos extraños esto debido a que pueden existir zonas de la imagen que cuenten con valores atípicos, para la eliminación de estos cuerpos, se determinó que el objeto es el cuerpo con mayor número de píxeles y se eliminan los cuerpos restantes, esta imagen binaria se puede observar en la **Figura 23** fue usada como máscara en la imagen original para recortar el fondo y extraer el objeto.

**Figura 23.** En A) Imagen binaria de la “Jarron000” y en B) Imagen despues de la eliminación de cuerpos extraños.



A) Imagen Binaria

B) Mascara de Objeto

Elaboración propia.

### 1.5. ALGORITMO PARA TRIANGULACIONES DE DELAUNAY

Dentro de la Triangulación de Delaunay descrita anteriormente en el marco teórico, se hace mención a diferentes algoritmos para su aplicación, sin embargo, la cantidad de datos obtenidos pertenecientes a los objetos hace que algunos sean inviables dado su elevado consumo de recursos computacionales. Debido a que, la Condición de Delaunay requiere comprobar que, en el interior de las circunferencias circunscritas a cada triangulación, no existen más puntos de los que conforman sus vértices, lo cual es una acción repetitiva que consume una gran capacidad computacional (Gallardo Palacios, 2012). Las Triangulaciones de Delaunay pueden ser refinadas para generar algoritmos más precisos y disminuir la influencia de datos erróneos que puedan producir formas no deseadas, este refinamiento se lleva a cabo mediante el proceso como la limitación de la distancia euclidiana entre los puntos.

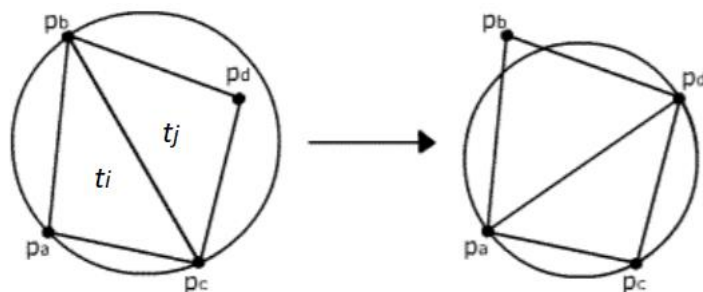
La naturaleza de los datos entregados por el sensor laser nos muestra una dispersión uniforme, que hace posible y coherente limitar la distancia euclidiana para evitar que se generen triangulaciones demasiado grandes y generar una superficie acorde a la forma del objeto a digitalizar, la distribución ordenada de los datos permite también limitar los ángulos interiores de las triangulaciones con un umbral deseado, esto genera estructuras más consistentes y regulares.

**1.5.1. Algoritmo básico para la construcción de la triangulación de Delaunay**  
 Consiste en encontrar una triangulación válida para el conjunto de puntos, ya obtenida una triangulación se aplica un test del círculo circunscrito, para un triángulo  $t_i$ . Se verifica que la circunferencia circunscrita  $C_i$  de  $t_i$  no posea un vértice de otro triángulo en su interior y se válida la condición de Delaunay para  $t_i$ . De fallar el test sobre  $C_i$  se requiere realizar un intercambio de diagonales, si  $C_i$  contiene en su interior un vértice de otro triángulo  $t_j$ , la arista que comparten  $t_i$  y  $t_j$  es ilegal y se debe reemplazar por otra diagonal del cuadrilátero formado por ambos triángulos como se ilustra en la **Figura 24**. El procedimiento se repite hasta que  $C_i$  no posea aristas de otros triángulos en su interior, pero este proceso es muy tardado para conjunto de datos muy grandes (Gallardo Palacios, 2012).

### Pseudocódigo Condición de Delaunay

- 
1. Función *EvaluarCondiciónDelaunay*( $t_p, L$ ), donde  $L$  es la lista de triángulos
  2. Encontrar  $C_i = \text{CirculoCircunscrito}(t_i)$
  3. Para,  $q_j \in P$  donde  $P$  es el conjunto de datos y  $j = [1, 2, \dots, n] - i$
  4. Si,  $q_j$  esta dentro de  $C_i$
  5. Encontramos  $AC = \text{AristaCompartida}(t_p, q_j)$
  6.  $(t_1, t_2) = \text{IntercambioDiagonales}(AC)$
  7. *EvaluarCondiciónDelaunay*( $t_p, [t_1, t_2]$ )
  8. Retornar  $T'$  que es el conjunto de triángulos modificados
- 

**Figura 24.** Intercambio de diagonales.



Fuente (Gallardo Palacios, 2012).

Por esto se usó uno de los algoritmos para calcular triangulaciones de Delaunay más populares y recomendados, se trata del algoritmo divide y vencerás, que tiene un tiempo de ejecución menor y realiza la construcción de la malla de triángulos de forma incremental. Este algoritmo divide la nube de puntos en dos conjuntos de igual tamaño, calcula la triangulación de Delaunay para cada conjunto de forma incremental y luego reúne las dos triangulaciones corrigiendo errores (Gallardo Palacios, 2012). Para ser aplicado a este proyecto se generalizó el algoritmo para  $n_c$ , donde  $n_c$  es el número de sub-conjuntos, que representa el número de tomas del dispositivo laser utilizadas para la reconstrucción.

### 1.5.2. Algoritmo Incremental para construir triangulaciones de Delaunay

En este algoritmo para la triangulación de Delaunay se creó inicialmente un triángulo  $t_o$  que contenga todos los puntos, este triángulo se conoce como triangulación inicial de Delaunay, posteriormente se realizó el siguiente procedimiento hasta obtener una maya de triángulos que cumplan el criterio de Delaunay y describan la superficie (Gallardo Palacios, 2012).

- 1- Se seleccionó aleatoriamente un punto  $p$  que se encuentra dentro del conjunto de datos y no pertenezca a los vértices de  $t_o$ .
- 2- Mediante un algoritmo conocido como Inserción de Delaunay por Intercambio de Diagonales se realizó la inserción de dicho punto dentro de la malla. El algoritmo de Inserción por Intercambio de Diagonales consiste en encontrar el triángulo  $t_p$  de la malla que contiene al punto  $p$  que se desea insertar, una vez se encuentra esa malla se tienen en cuenta los siguientes criterios para realizar la inserción de  $p$ .

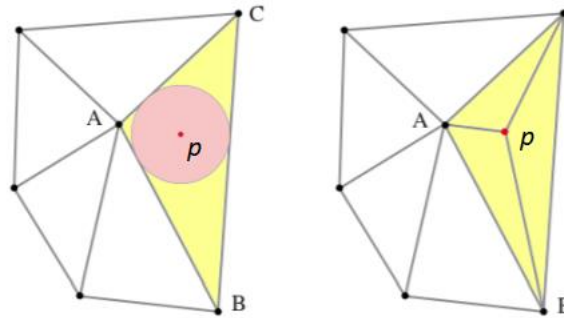
**Criterio 1:** si  $p$  se encuentra dentro  $t_o$ , se une cada vértice del triángulo a  $p$  creando 3 nuevos triángulos como se ilustra en la **Figura 25A**.

**Criterio 2:** si  $p$  se encuentra sobre una arista de  $t_o$ , se considera que  $t_p$  comparte una arista con  $t_o$  y se unen los vértices de los dos triángulos a  $p$  formando 4 nuevos triángulos como se ilustra en la **Figura 25B**.

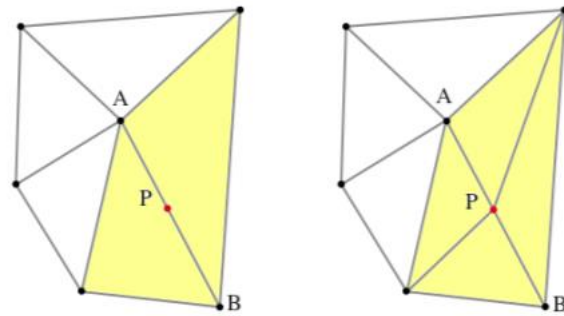
**Criterio 3:** si el punto  $p$  está en un vértice de  $t_p$ , este punto se ignora.



**Figura 25.** Criterios de inserción de  $p$  en A) si  $p$  esta dentro de  $t_o$  y B) si  $p$  esta sobre una arista de  $t_o$ .



A) Inserción de  $p$  según el **Criterio 1**



B) Inserción de  $p$  según el **Criterio 2**

Fuente (Gallardo Palacios, 2012).

- 3- La triangulación obtenida tras la inserción del punto  $p$ , puede no ser una triangulación de Delaunay por este motivo es necesario realizar la comprobación con la condición de Delaunay, de no cumplir la condición se realizan cambios de diagonales.

### Pseudocódigo Inserción de Delaunay

- 
1. Función *Inserción de Delaunay* ( $T, p_i$ )
  2. Encontrar  $t_p = \text{triangulo}(t_o, p_i)$
  3. Si,  $p_i$  es igual  $v_1, v_2$  o  $v_3$
  4. Si,  $p_i$  esta dentro de  $t_o$
  5. Determinar  $(t_1, t_2, t_3) = \text{GenerarNuevosTriangulos}(t_o, p_i)$

6.  $T = \text{EvaluarCondiciónDelaunay}(t_p, [t_1, t_2, t_3 ])$
  7. o Si,  $p_i$  esta sobre alguna arista de  $t_o$
  8. Determinar  $(t_1, t_2, t_3, t_4) = \text{GenerarNuevosTriangulos}(t_o, p_i)$
  9.  $T = \text{EvaluarCondiciónDelaunay}(t_p, [t_1, t_2, t_3, t_4 ])$
  10. Retornar  $T$
- 

Posterior a la obtención de la triangulación de Delaunay, es posible trabajar sobre los datos de los triángulos que lo componen, para restringir su tamaño y apoyar al filtro de datos para obtener mejores resultados en la estructura, al aplicar el algoritmo divide y vencerás, y el algoritmo incremental se obtiene una superficie de polígonos regulares que describe un objeto en 3D.

### **Pseudocódigo Triangulación Incremental de Delaunay**

---

1. Definir  $t_o = \text{triangulo}(v_1, v_2, v_3 )$
  2. Definir  $T = t_o$  que es el conjunto de triangulaciones
  3. Para,  $p_i \in P$ , donde  $P$  es el conjunto de datos,  $i = [1, 2, \dots, n]$  y  $n$  es el tamaño de  $P$ .
  4.  $T = \text{Inserción de Delaunay}(T, p_i)$
- 

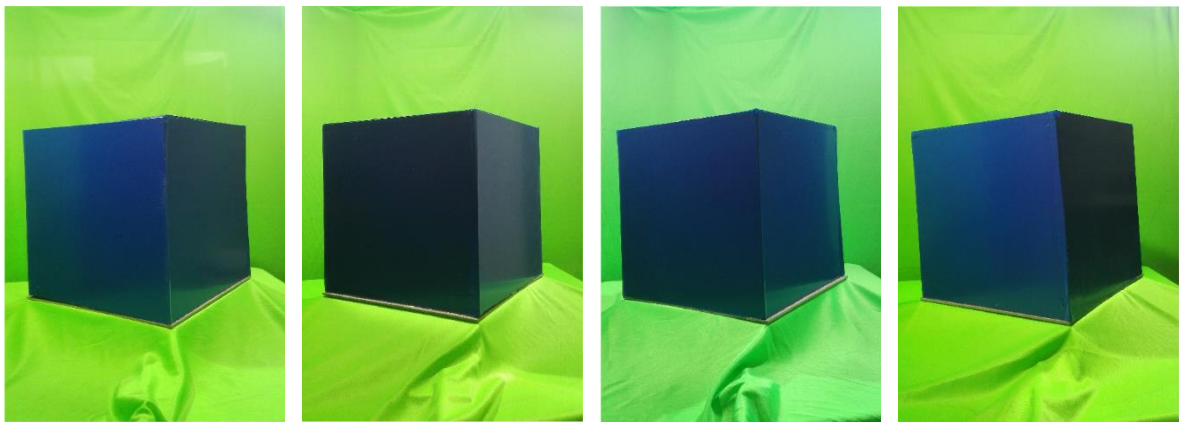
## **1.6. CREACIÓN DE TEXTURAS CON IMÁGENES**

Las texturas son imágenes bidimensionales que se aplican a superficies, constituidas por polígonos, en un espacio de 3D para dar apariencia y detalle. En este proyecto de grado fueron creadas texturas para los objetos digitalizados, partiendo de las imágenes estructuradas que fueron adquiridas en conjunto con las mediciones de profundidad. A partir de las imágenes pre-procesadas, que cuentan con el objeto discriminado del fondo, fue posible crear una textura rectangular que posteriormente fue añadida a la superficie poligonal, aumentando el nivel de calidad visual de la estructura.

Para la generación de texturas a partir de imágenes, fueron tomadas algunas consideraciones al momento de construir las texturas, esto fue posible gracias al protocolo de uso de espacio. El corrimiento entre las imágenes fue definido por el proceso de adquisición, para este caso fueron adquiridos los datos cada 10 grados,

es decir que las imágenes presentan un desfase posicional de 10 grados entre imágenes, aunque no fue necesario utilizar todas las imágenes en el proceso; esto dependió de la complejidad de la estructura y el nivel de detalle que se buscaba obtener. Para la ejecución de este algoritmo fue tomada una figura regular, se ejecutó sobre los datos correspondientes al objeto de la base de datos nombrado como 'Cube', y fue realizada sobre 4 imágenes, con una variación entre ellas de 90 grados como se ilustra en la **Figura 26**.

**Figura 26.** Tomas del objeto 'Cube' cada 90 grados, en A) fue la Imagen a 0 grados, B) fue la Imagen a 90 grados, C) fue la Imagen a 180 grados y D) fue la Imagen a 270 grados.



A) Cubo000

B) Cubo090

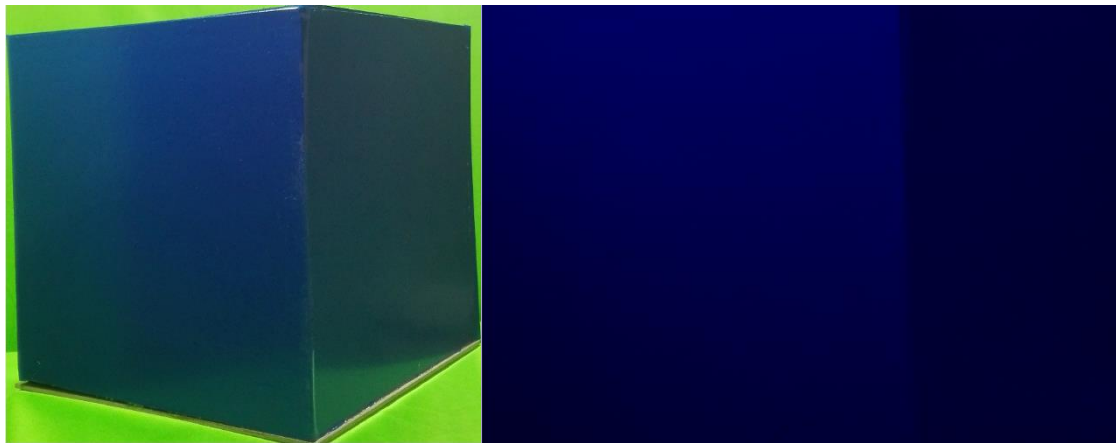
C) Cubo180

D) Cubo 270

Elaboración propia.

La imagen fue recortada, hasta que ajusto el tamaño del espacio del objeto, de forma que describió un rectángulo, este proceso fue realizado al buscar puntos críticos en la imagen, concretamente los extremos en los ejes como se observa en la **Figura 27A**. Posteriormente fue reestructura la figura, fue expandido el objeto para cubrir toda la superficie del rectángulo **Figura 27B**, entre las 4 vistas del objeto fue realizada una búsqueda de coincidencias, una vez finalizado este proceso se realizó el acople de las imágenes, basados en las coincidencias y en el corrimiento de posición de 90 grados, generando una textura plana de un recorrido de 360 grados al objeto en 3D como se puede observar en la **Figura 28**.

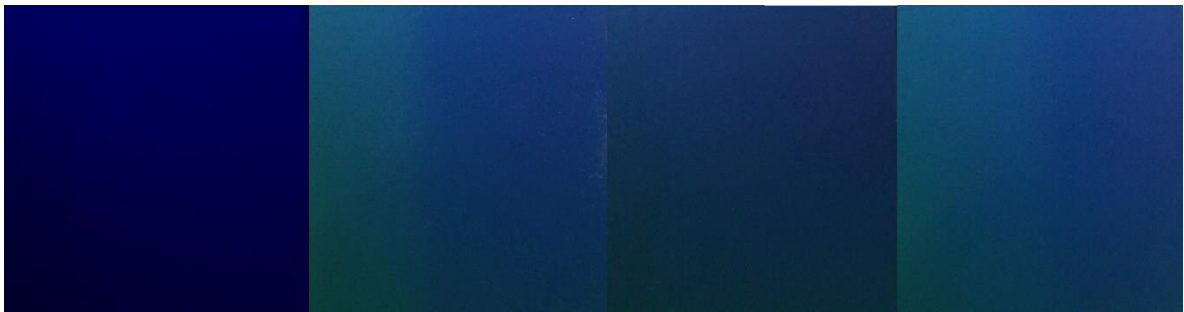
**Figura 27.** En A) imagen de recorte de selección de objeto y en B) expansión del objeto.



A) Imagen de recorte objeto  
Elaboración propia.

B) Expansión del objeto.

**Figura 28.** Textura general del objeto 'Cube'.



Elaboración propia.

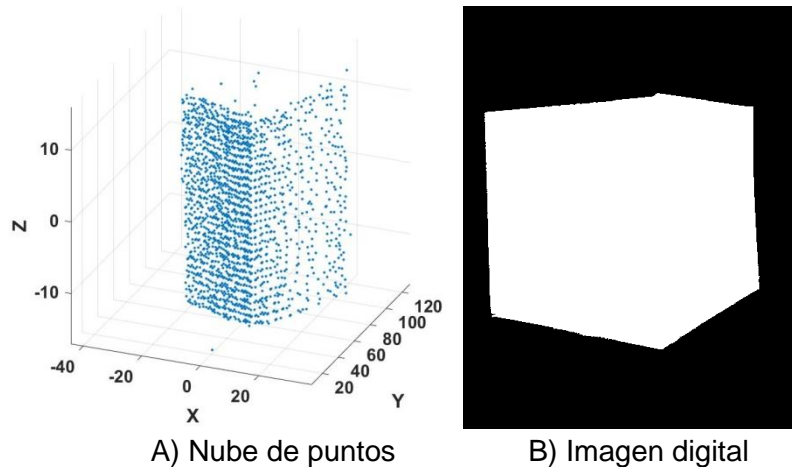
## 1.7. ARQUITECTURA EXPERIMENTAL DE ACOUPLE DE MÉTODOS

En esta sección se explica la arquitectura propuesta a manera de experimento, para el acople de métodos de visión artificial. En las etapas previas de este documento fue abarcado el problema desde perspectivas diferentes, fueron observados los datos de imágenes y nubes de puntos como elementos aislados que generaban resultados individuales, en esta etapa fueron acoplados los procesos buscando mejorar los resultados. Para esto fueron propuestas diferentes técnicas que entregaron buenos resultados tanto en el filtrado de datos como en mejorar la calidad de la reconstrucción 3D.

Se propuso usar la información de manera conjunta, el uso de imágenes como filtro digital para los datos de las nubes de puntos obtenidas con el sensor laser, esto requirió de un proceso de reconocimiento de patrones y el escalado de los datos.

Fue establece una relación comparativa entre el tamaño de las imágenes y la distribución de puntos, fue posible usar la máscara obtenida durante el filtrado de imágenes, para eliminar datos erróneos en la nube de puntos como se observa en la **Figura 29**, encontrando la perspectiva de la nube de puntos que pertenece a la imagen, con respecto al objeto, sin embargo, este proceso fue sensible a errores provenientes del escalamiento.

**Figura 29.** Se ilustra la información obtenida del objeto 'cube' a 0 grados A) representación en nube de puntos y en B) su correspondiente imagen digital.

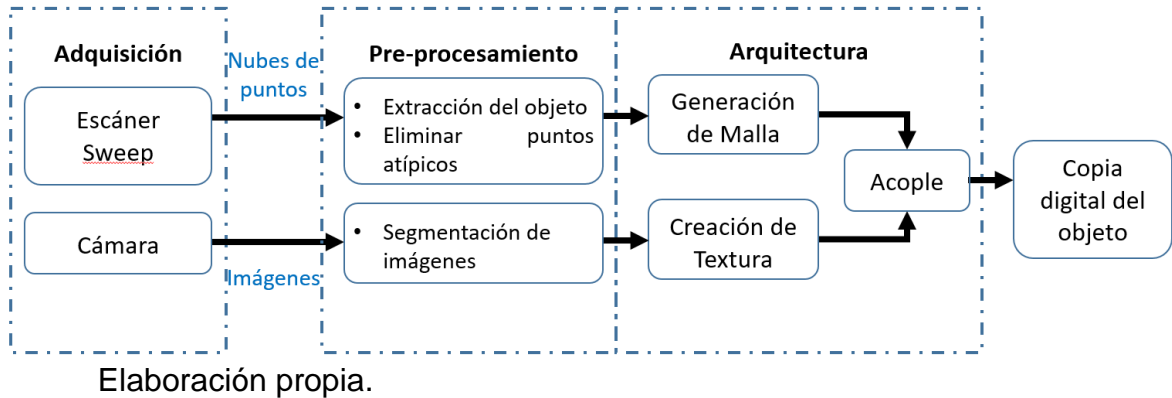


A) Nube de puntos  
Elaboración propia.

B) Imagen digital

Una alternativa que mejoró el detalle de las reconstrucciones y fue una opción más simple para acoplar los métodos, fue transformar las imágenes en una textura que se adhiere a la superficie, de este modo se utilizaron los datos volumétricos de las mediciones de profundidad para dar forma a una imagen. Esto permitió que, por medio de las triangulaciones de Delaunay se estructure una malla en 3D formada por polígonos, para posteriormente agregar una textura fabricada a partir de las imágenes del objeto, el esquema de la arquitectura propuesta puede observarse en la **Figura 30**.

**Figura 30.** Diagrama del procedimiento para la generación de copias digitales.



Gracias a la reconstrucción poligonal de las triangulaciones de Delaunay es posible generar un mapa de texturas en la superficie del objeto permitiendo que sea fácil colocar la textura generada, creando una reconstrucción con mayor nivel de detalle visual y precisión estructural

## 1.8. INTERFAZ GRAFICA

Se estructuró una Interfaz Gráfica, conocida también como GUI (del inglés Graphical-User-Interface), que permite al usuario visualizar los archivos de la base de datos y ejecutar los diferentes procedimientos de forma interactiva, sin ser necesario poseer conocimiento profundo de la reconstrucción 3D. La interfaz cuenta con las siguientes características básicas (Albornoz, y otros, 2017, septiembre).

- Facilidad de comprensión, aprendizaje y uso.
- Amigable con el Usuario.
- Diseño ergonómico mediante el establecimiento de barras de acción e iconos de fácil acceso.
- Las interacciones se basan en acciones físicas sobre elementos visuales como: botones, imágenes, mensajes de texto y barras de desplazamiento.
- Las acciones son incrementales o reversibles, generando efectos secuenciales.
- Existencia de herramientas de Ayuda y Consulta.
- Tratamiento del error bien cuidado y adecuado al nivel de usuario.

La tipografía y el tratamiento del color son dos aspectos a los que hay que prestar atención a la hora de establecer una interfaz, poniendo especial cuidado en el diseño de las formas y la coherencia interna entre ellas.

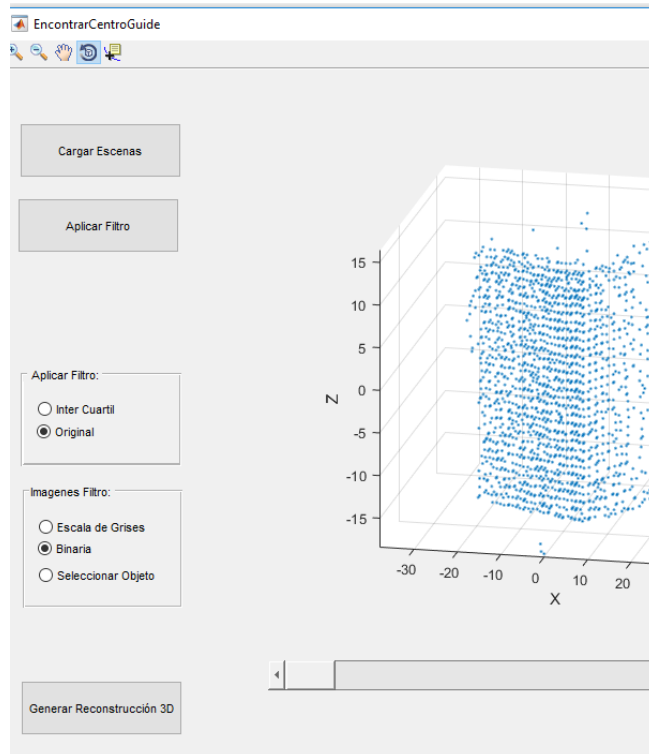
La interfaz gráfica busca entregar información y ser una solución a las necesidades del usuario a la hora de consultarlo. También es clave determinar el contenido y la funcionalidad, especificar una estructura organizada, la navegación, las selecciones y los sistemas de búsqueda. Hay que tener en cuenta que cada usuario puede tener diferentes necesidades y un buen sistema cuenta con diferentes funciones.

Una buena interfaz suministra herramientas de uso sencillo y fácil para el usuario, conozca en todo momento en donde se encuentra y hacia donde puede ir, algunas herramientas útiles en una interfaz son:

- Herramientas que posibiliten almacenar información para ser usada en otros espacios.
- Herramientas que permitan que el usuario participe de la creación del conocimiento.

En este proyecto la elaboración de la interfaz gráfica se apoyó en el entorno GUIDE (entorno de desarrollo de GUI) de MATLAB (MathWorks), el editor de diseño de GUIDE proporciona herramientas para diseñar interfaces personalizadas y se apoya del código de MATLAB para construir la interfaz, el cual se puede modificar para definir las propiedades y el comportamiento de todos los componentes de la interfaz. Cabe la posibilidad de agregar cuadros de dialogo, controles de interfaz, como botones y controles deslizantes, y contenedores, como paneles y grupos de botones (ver **Figura 31**).

**Figura 31.** Interfaz gráfica diseñada en el GUIDE de MATLAB.



Elaboración propia.



## 2. RESULTADOS

Los experimentos expuestos a continuación se diseñaron en primer lugar para probar la robustez de los diferentes componentes, donde la evaluación de los dispositivos de adquisición se llevó a cabo aplicando perturbaciones a los procesos de ejecución para determinar qué acciones generaban complicaciones. Segundo, para validar el protocolo de uso de espacios de condiciones controladas, mediante la obtención de la base de datos verificando que el procedimiento llevado a cabo sea eficiente y disminuya los errores propios de los dispositivos. Y, por último, para verificar el desempeño de la arquitectura experimental, con pruebas que permitan valorar su funcionamiento y observar resultados del acople de métodos.

### 2.1. EVALUACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para evaluar el funcionamiento y robustez de los sensores de adquisición se diseñaron múltiples experimentos, mencionados a continuación. Por ende, para la ejecución de las siguientes pruebas se condicionó que a la escena no entraran más perturbaciones que las impuestas por los experimentos.

#### 2.1.1. Experimento 1: Validación Escáner Láser

El primer experimento se diseñó para probar la calidad del escáner y determinar las frecuencias óptimas para la adquisición de datos, el escáner está descrito en la **Sección 1.1.1**. Este puede ser configurado para diferentes velocidades de rotación, de ahí que, se tengan distintos tiempos de adquisición de datos, estos son presentados por el fabricante (Scanse, 2017) y se muestran en la **Tabla 1**.

En el desarrollo de este experimento se validó la información presentada por el fabricante, enfocada en la información que se obtiene del objeto 'vase'. De manera que, se realizó la captura de datos con cada una de las configuraciones.

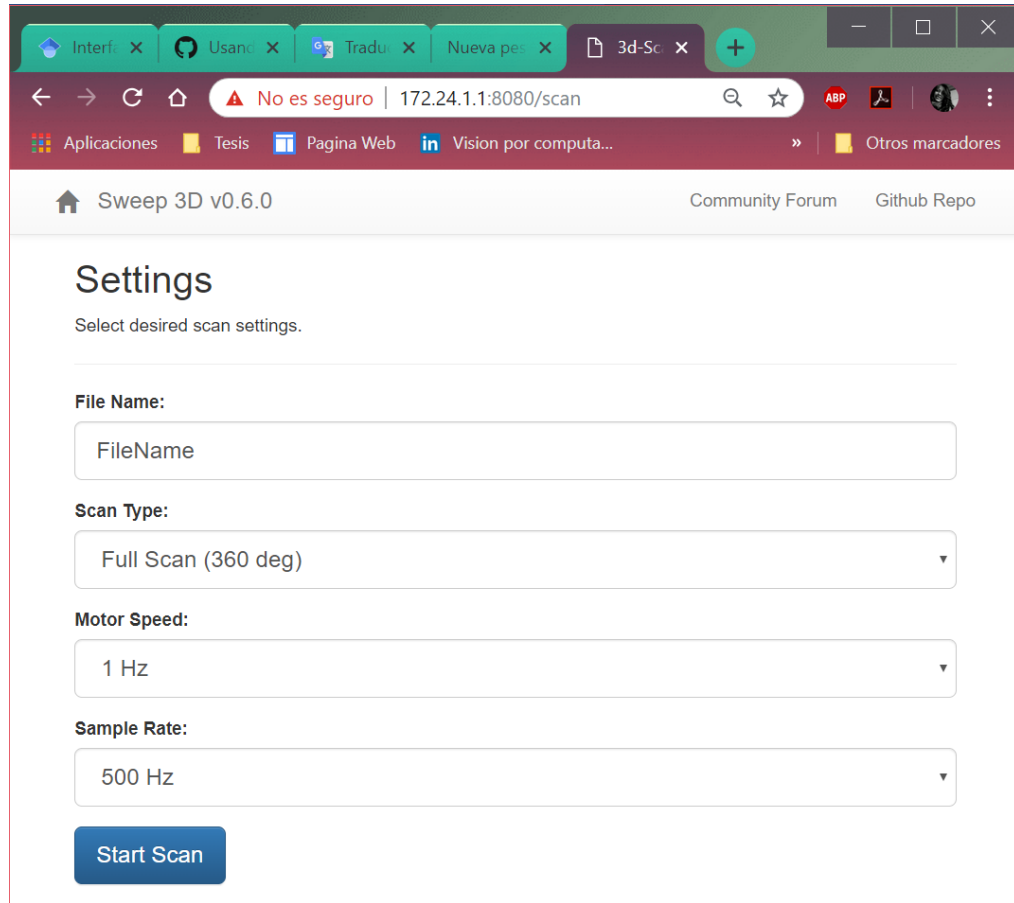
**Tabla 1.** Resolución y Duración del escaneo para varias configuraciones.

Rango de Escaneo	Velocidad del Motor (Hz)	Frecuencia de Muestreo (Hz)	Resolución (muestras /grados)	Duración de Escaneo (segundos)
360 grados	1	500	1,39	268
360 grados	1	750	2,08	402
360 grados	1	1000	2,78	535
360 grados	2	500	0,69	63
360 grados	2	750	1,04	90
360 grados	2	1000	1,39	134

3D Scanner Node Web Application (Scanse, 2017)

La aplicación web del sensor permite configurar el rango de escaneo (Scan Type), la velocidad de rotación del sensor (Motor Speed) y la frecuencia de muestreo (Sample Rate), como se muestra en la **Figura 32**. Aunque, se mantuvo invariante el rango de escaneo en *Full Scan (360 deg)* que corresponde a una rotación de 360 grados en el eje Z, y se realizaron pruebas variando la velocidad del motor y la frecuencia de muestreo.

**Figura 32.** Página de escaneo sensor Scanse Sweep.



Elaboración propia.

Posteriormente, a la realización del experimento se constituyó la **Tabla2**. Con los siguientes parámetros: la cantidad de puntos pertenecientes a la escena completa, la cantidad de puntos pertenecientes al objeto y la duración del escaneo. Además, se evaluó visualmente el estado de la nube de puntos, lo anterior permitió la selección del modelo de parámetros más conveniente para los objetivos de este proyecto.

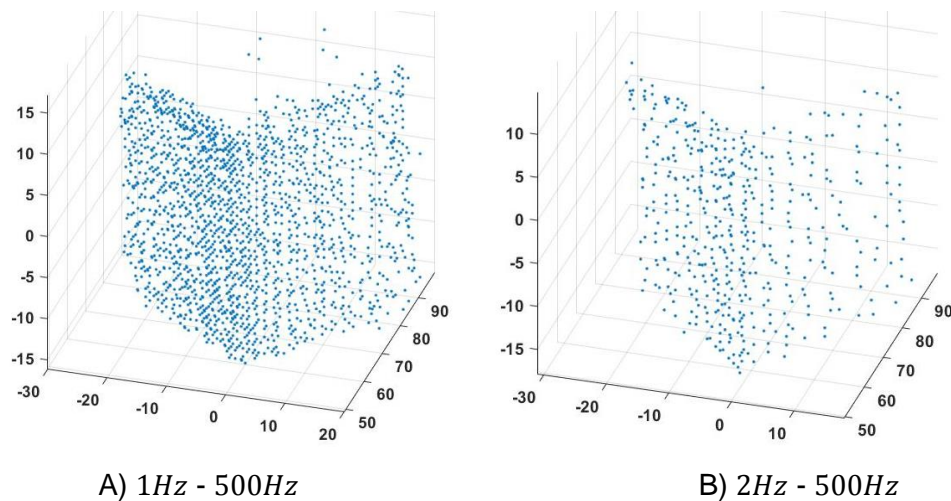
**Tabla 2.** Conteo de puntos de la escena y objeto del escaneo para varias configuraciones.

Velocidad del Motor (Hz)	Frecuencia de Muestreo (Hz)	Conteo de Puntos para la Escena Completa	Conteo de Puntos para el Objeto	Duración del Escaneo (Segundos)
1	500	148.062	2.092	324
1	750	253.107	3.894	435
1	1.000	425.649	6.806	564
2	500	32.456	488	90
2	750	56.121	881	125
2	1.000	105.653	1.725	189

Elaboración propia.

Una inspección detallada de la información computada en la **Tabla 2**, demostró que la configuración óptima, se da al mantener la **velocidad del motor en 1Hz**, esta frecuencia nos entrega una cantidad de datos del objeto óptimos, contrario a la frecuencia de 2Hz que pierde información como se puede observar en la **Figura 33**.

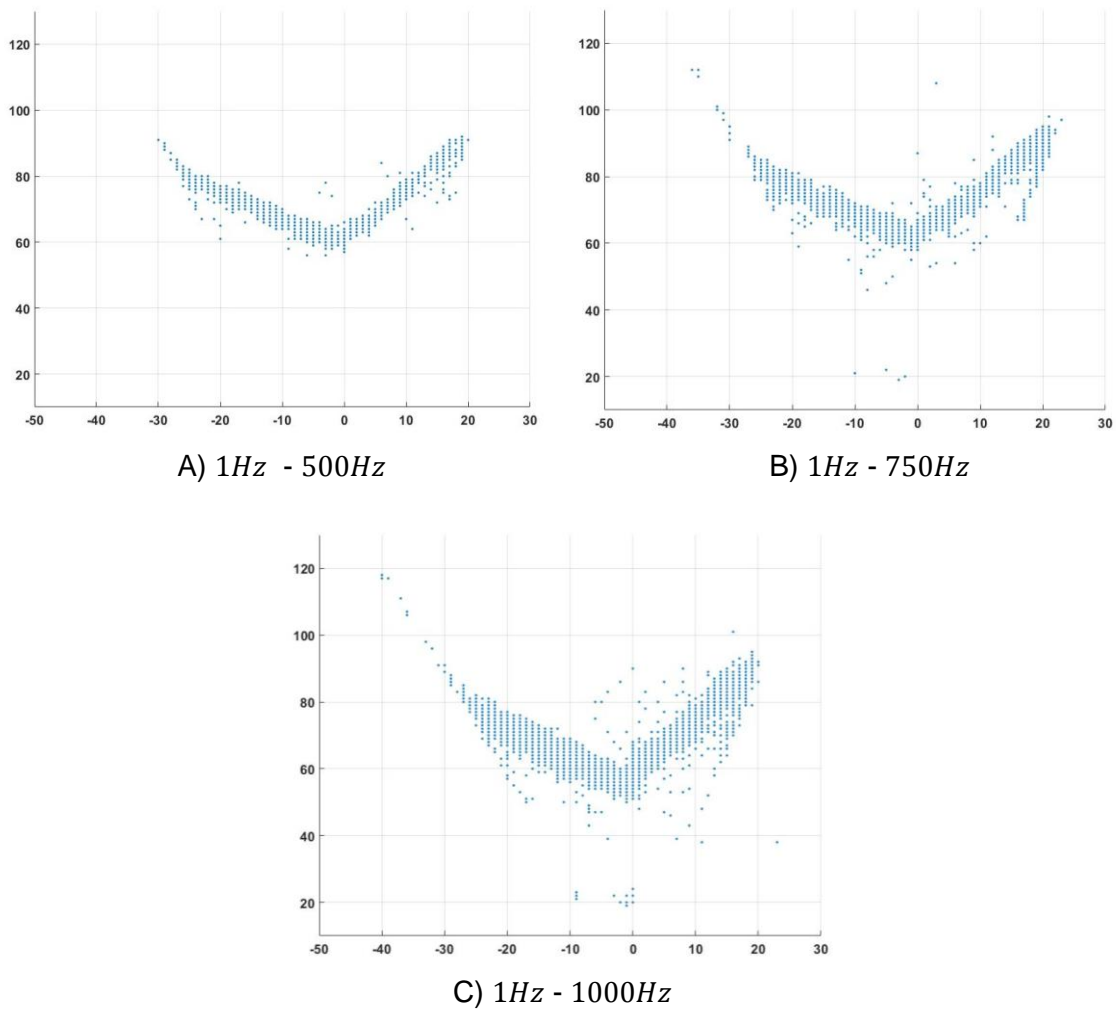
**Figura 33.** Extracción del Objeto 'cube' de las escenas tomadas a una frecuencia de muestreo de 500Hz y velocidades del motor: en A) de 1Hz y en B) de 2Hz.



Elaboración propia.

La frecuencia de muestreo óptima se estableció en **500 Hz**, esta selección se realizó por dos motivos, primero la duración del escaneo es de 5,4 minutos, que es menor a los tiempos de las frecuencias de 750Hz y 1000Hz, y segundo la frecuencia de muestreo de 500Hz presenta una menor cantidad de puntos atípicos, por ejemplo, si consideramos una cara del cubo vista en  $X$  vs.  $Y$ , como se puede apreciar en la **Figura 34**, esta frecuencia presenta una mayor concentración de los puntos.

**Figura 34.** Vista de  $X$  vs.  $Y$  del objeto 'cubo' tomado con la velocidad del motor a 1Hz y frecuencias de muestreo: en A) de 500Hz, en B) de 750Hz y en C) de 1000Hz.



Elaboración propia.

### 2.1.2. Experimento 2: Evaluación de robustez del escáner laser Sweep

Este experimento se ejecutó para evaluar la robustez del escáner Sweep a distintas condiciones, la finalidad de este proceso fue crear las condiciones ideales para la adquisición de la base de datos, para este experimento se mantuvieron constantes

la velocidad de rotación y la frecuencia de muestreo del sensor, se ejecutó la siguiente serie de pruebas:

- **Observador en movimiento:** una persona se mantuvo en movimiento en la habitación durante el proceso de adquisición de datos, como se ilustra en la **Figura 35**, se obtuvo como resultado que los datos presentan una gran cantidad de información que no pertenece a ningún objeto de la escena, estos errores dificultan el filtrado de datos y aumentan el tiempo de procesamiento. En conclusión, el escáner tiene bajo rendimiento con objetos en movimiento, por este motivo se recomienda mantener el escáner en un ambiente libre de perturbación de movimiento, con el propósito de reducir los datos erróneos en las escenas y los objetos.

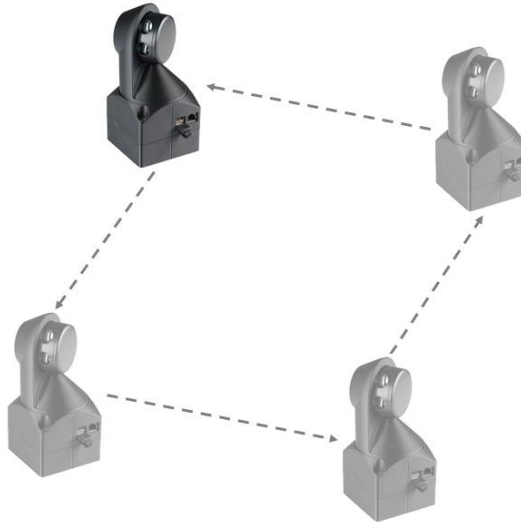
**Figura 35.** Diagrama ilustrativo del Experimento 2 cuando el Observador se encuentra en movimiento con respecto al escáner laser Sweep.



Elaboración propia.

- **Perturbaciones de movimiento directo:** el dispositivo se mantuvo en movimiento durante la adquisición, como se ilustra en la **Figura 36**. Gracias a este procedimiento fue posible determinar que el dispositivo presenta poca tolerancia al movimiento, generando gran cantidad de puntos erróneos que dificultan el procesamiento de los datos. Para mayor comprensión en el desarrollo de este experimento se realizaron 2 tipos de movimientos, el primero lento y pausado, que nos permitió observar la respuesta del sensor al movimiento y el segundo movimiento rápido y violento, que ocasionó que se pausara la adquisición.

**Figura 36.** Diagrama ilustrativo del Experimento 2 cuando el escáner laser Sweep se encuentra en movimiento.



Elaboración propia.

- **Objeto transparente:** se ubicó un objeto transparente frente al escáner, como se muestra en la **Figura 37**. El anterior procedimiento tuvo el propósito de observar su comportamiento al adquirir datos de objetos transparentes, de lo anterior se concluyó que el escáner no logra reconocer la superficie de objetos transparentes.

**Figura 37.** Escaneo objeto transparente con el Scanse Sweep.



Elaboración propia.

- **Objeto reflectante:** se ubicó el escáner frente a un espejo, como se ilustra en la **Figura 38**, que permitió observar su comportamiento al adquirir datos a superficies reflectantes. Concluyendo que el escáner genera falsas respuestas sobre las superficies reflejantes, entregando valores atípicos que no pudieron ser interpretados correctamente.

**Figura 38.** Escaneo objeto reflejante con el Scanse Sweep.



Elaboración propia.

Gracias al análisis experimental de las capacidades del escáner laser, fue posible determinar una serie de parámetros óptimos para la construcción de la base de datos, como evitar la presencia de superficies reflectantes durante la adquisición y condicionar los objetos a digitalizar para que no sean, ni tengan superficies transparentes. Estos resultados también nos permitieron establecer condiciones ideales para el escáner laser en el protocolo de uso de espacios de condiciones controladas, el dispositivo se debe mantener en una posición fija durante la adquisición de información y el ambiente debe evitar la incidencia de objetos en movimiento para minimizar errores.

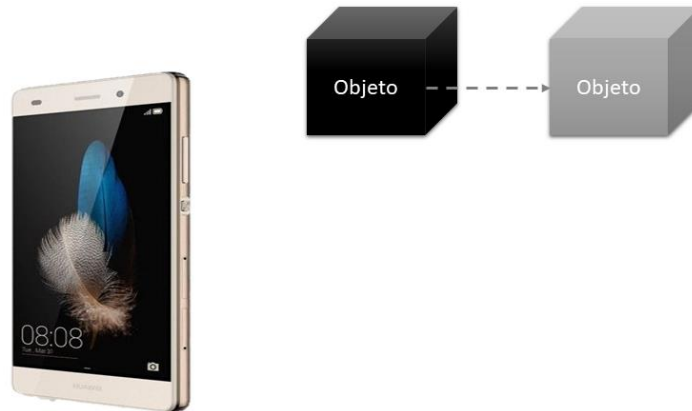
### **2.1.3. Experimento 3: Evaluación robustez de la cámara digital**

Se ejecutó la siguiente serie de pruebas para verificar la calidad de la cámara digital, donde las pruebas sirvieron para encontrar las condiciones óptimas para la adquisición de las imágenes, que componen la base de datos. Para la validación de las pruebas, las imágenes no fueron solo adquiridas sino también pre-procesadas con el protocolo para discriminar el objeto del fondo presentado en la **Sección 1.4.3**, el dispositivo móvil de adquisición es un teléfono inteligente modelo Huawei P8 Lite descrito en la **Sección 1.1.2**, las pruebas son:



- **Objeto en movimiento:** un objeto se mantuvo en movimiento frente a la cámara durante la toma de los datos, lo anterior se ilustra en la **Figura 39**, este proceso mostro que las imágenes adquiridas presentaban distorsión, falta de definición y detalle.

**Figura 39.** Diagrama ilustrativo del Experimento 3 cuando el objeto de interés se encuentra en movimiento con respecto a la cámara digital.



Elaboración propia.

- **Perturbación de movimiento directo:** se mantiene la cámara en movimiento para la adquisición de las imágenes, lo anterior se ilustra en la **Figura 40**. Esta prueba permitió concluir que el sistema es robusto en este aspecto, ya que ante perturbaciones grandes la cámara espera que el sistema se estabilice para capturar la imagen y las perturbaciones pequeñas, no parecen presentar ningún efecto adverso en las imágenes adquiridas.

**Figura 40.** Diagrama ilustrativo del Experimento 3 cuando la cámara digital se encuentra en movimiento con respecto al objeto de interés.



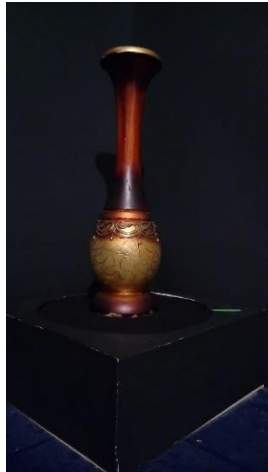
Elaboración propia.

- **Objeto transparente:** se ubicó un objeto transparente frente a la cámara con el propósito de adquirir una imagen de él, fue posible diferenciar el objeto transparente en las imágenes sin mayor complicación de forma visual, sin embargo, es complicado revisar patrones debido a que el objeto adquiere como datos propios la información que tiene en su parte posterior.
- **Cambio del color de fondo:** se adquirieron imágenes de un objeto con fondos de diferente color, en cuanto al sistema de adquisición probó ser robusto en este aspecto, no requiere parámetros especiales de configuración de fondo, para obtener imágenes con buena definición como en la **Figura 41**. No obstante definir un fondo que no entre en conflicto con los objetos, facilita y mejora el proceso de extracción de información como se observa en las imágenes binarias de la **Figura 42**.

**Figura 41.** Evaluación de fondos, en A) fondo blanco, en B) fondo negro y en C) fondo verde.



A) Fondo blanco  
Elaboración propia.

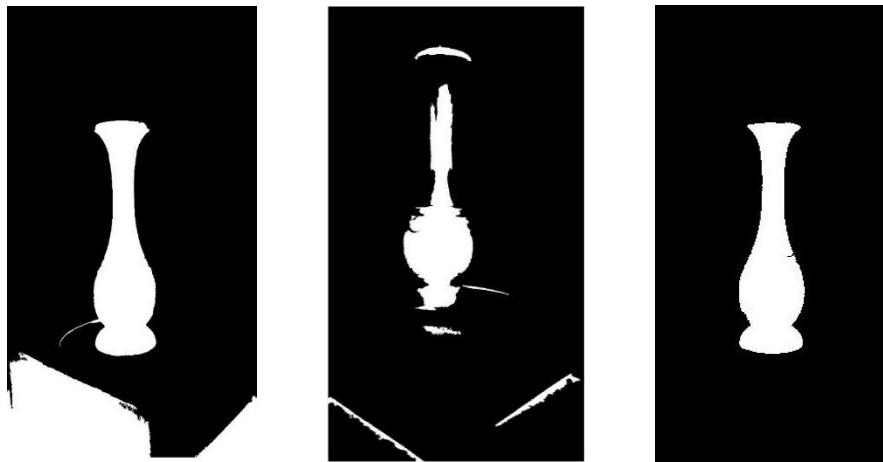


B) Fondo negro



C) Fondo verde

**Figura 42.** Evaluación de fondos con imágenes binarias, en A) fondo blanco, en B) fondo negro y en C) fondo verde.



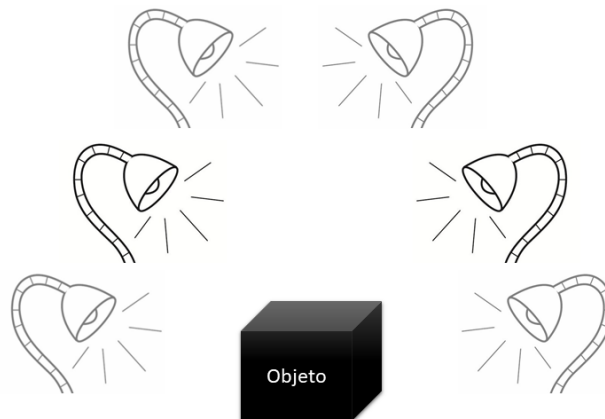
A) Fondo blanco  
Elaboración propia.

B) Fondo negro

C) Fondo verde

- **Cambio en los factores de iluminación:** se adquirieron diferentes imágenes de un objeto cambiando los niveles de incidencia lumínica, la incidencia lumínica se varió desde la sobreexposición a la luz, que está representada por un gran número de lámparas y a su máxima capacidad, hasta la ausencia de fuentes lumínicas no naturales, ver **Figura 43**. Para el desarrollo de este experimento se usaron fuentes de luz artificiales, la posición se variaba con cada toma para provocar diferentes efectos lumínicos en el objeto. Se concluye que la cámara presenta problemas en este aspecto, ya que el nivel de incidencia lumínica afecta directamente la calidad de las imágenes, una sobreexposición a la luz afecto los colores de la imagen y dificulta la extracción de información.

**Figura 43.** Representación gráfica de la evaluación de iluminación.



Elaboración propia.

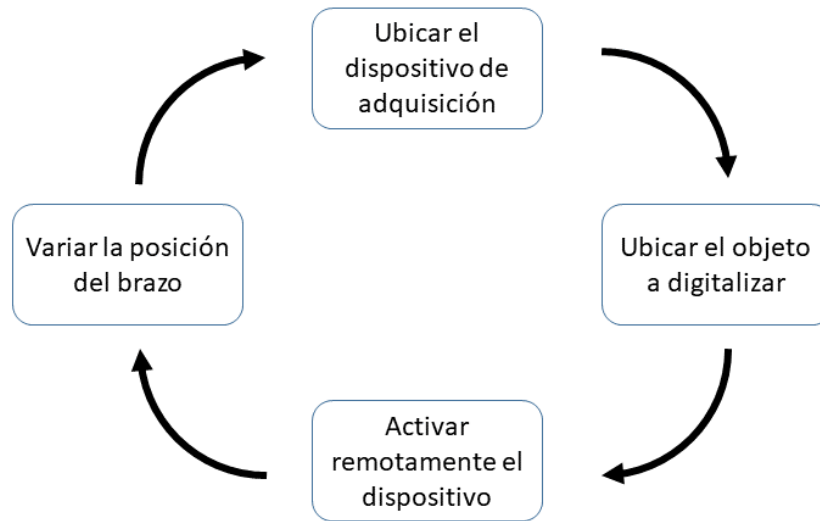
Los resultados obtenidos fueron de gran ayuda en la construcción del **protocolo de uso de espacio de condiciones controladas**, permitieron agregar parámetros en función de obtener imágenes de gran calidad y fáciles de procesar, donde el control de la iluminación y el uso de una técnica de clave de color mejoran la estructura de los datos, en otras palabras, la información obtenida es coherente y sigue un patrón específico que facilita el análisis.

## **2.2. VALIDACIÓN DEL PROTOCOLO MEDIANTE LA ADQUISICIÓN DE LA BASE DE DATOS**

Se evaluó experimentalmente el protocolo de uso de espacio de condiciones controladas presentado en la **Sección 1.2**, mediante la adquisición de una base de datos estructurada, para este proceso se realizó la adquisición de la información mediante el escáner laser Sweep y la cámara digital del teléfono inteligente. Además, fue establecido un procedimiento para la adquisición de los datos para validar la funcionalidad del protocolo, se debe tener en consideración que el protocolo no está exento de la intervención humana. A continuación, se explica el procedimiento de adquisición de los datos ilustrado en el diagrama de la **Figura 44**, procedimiento que se realizan individualmente para los datos del escáner y las imágenes.

- 1- **Se ubica el dispositivo de adquisición**, sobre el brazo de la plataforma y se fija mediante un sistema de rosca y tornillo, el brazo giratorio de la plataforma se ubica sobre el punto cero marcado en la plataforma.
- 2- **Se ubica el objeto a digitalizar**, sobre la base de la plataforma de adquisición de datos.
- 3- Se realiza la **activación remota del dispositivo**, para que no exista presencia del observador en la escena.
- 4- Cuando el sensor indica la terminación del proceso de adquisición, el observador **vario la posición del brazo**, este movimiento se hace cambiando el ángulo con respecto a la posición cero a favor de las manecillas del reloj, la variación del ángulo se establece en 10 grados por toma.
- 5- Se realiza una nueva activación del sensor para adquirir la nueva información, se repite los pasos 3, 4 y 5 para las 36 tomas que se requieren para rodear el objeto completamente.
- 6- Una vez adquiridos los datos del dispositivo sensor láser se procede a reemplazarlo por el teléfono inteligente para repetir el procedimiento, o viceversa.

**Figura 44.** Diagrama del procedimiento de adquisición de datos.



Elaboración propia.

Este procedimiento es el mismo para todos los objetos que componen la **base de datos**, hasta completar su virtualización, además fue necesario añadir una estructura móvil que soporta el fondo con la clave de color y las fuentes lumínicas, cuando se realizó la adquisición de imágenes. Se estableció así para poder agregar el fondo solo durante la adquisición de las imágenes, puesto que el sensor laser no se ve afectado por el color del fondo y por el contrario puede producir datos erróneos al encontrarse tan cerca del objeto a digitalizar.

### 2.2.1. Base de datos

Los experimentos se llevaron a cabo para establecer parámetros óptimos para el protocolo de uso de espacio de condiciones controladas, con la finalidad de adquirir una base de datos estructurada que se compone de la información básica de los objetos a digitalizar, los datos de sensor laser y las imágenes.

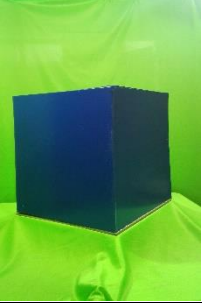
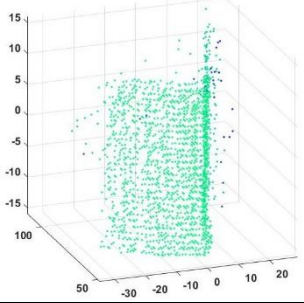

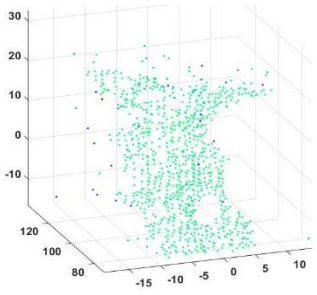

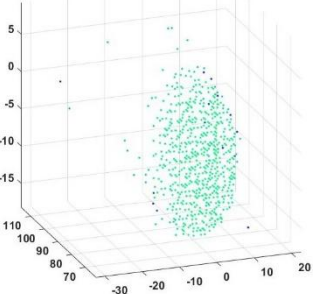

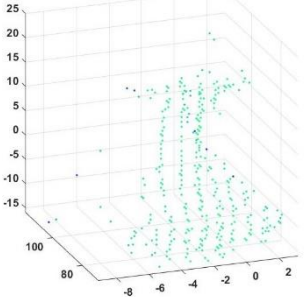
Se seleccionaron 7 *objetos* con diferentes formas y colores para dar variedad a la base de datos, de cada objeto se tiene, una breve descripción, 36 *tomas* de los datos que representan al objeto adquiridas con el sensor laser con una distribución uniforme de 10 *grados* entre toma, en el sentido horario se puede ver un ejemplo de ello en la **Figura 45**. En cuanto a las imágenes se adjuntan 36 *tomas* en bruto que al igual que en el escaneo laser tiene una distribución de 10 *grados*: la tabla de objetos puede verse a continuación en la **Tabla 3**.


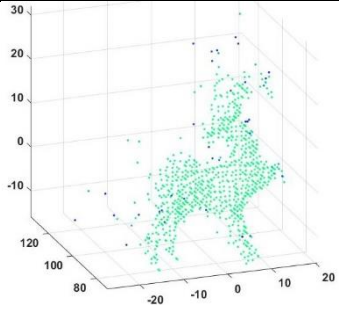

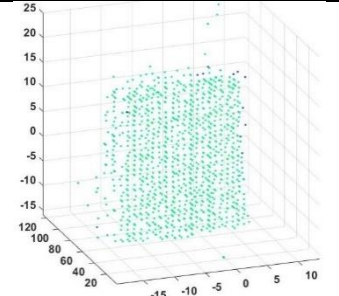

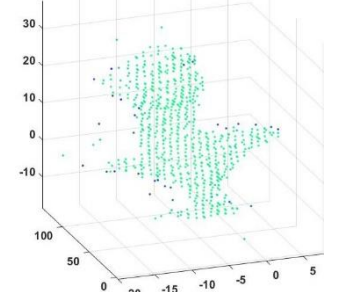
**Figura 45.** Imágenes del objeto 'Reindeer' cada 10 grados.



Elaboración propia.

**Tabla 3.** Estructuración de la Base de Datos.

	Nombre	Imagen	Escena Laser
1	Cube		
2	Angel		
3	Ball		
4	Base		

5	Reindeer		
6	Cylinder		
7	Manikin		

Elaboración propia.

La base de datos se organiza en carpetas y subcarpetas, para el fácil acceso a su información, en cada carpeta se anexa un documento de texto con los detalles de la figura, esto se detalla más en el **ANEXO 2**.

### 2.3. DESEMPEÑO DE LA ARQUITECTURA EXPERIMENTAL

Se ejecutaron una serie de experimentos en la arquitectura de acople de imágenes y métodos de medición de profundidad propuesta en la **Sección 3.7**, los experimentos propuestos se plantearon para evaluar el desempeño del algoritmo de reconstrucción 3D. Para estas pruebas y comparaciones, se usaron los datos de la base de datos construida anteriormente y datos artificiales generados por computadora como medidas comparativas de desempeño. Los datos artificiales cuentan con la nube de puntos e imágenes seleccionadas para que sean similares a los datos adquiridos con los sensores que son un cubo y una esfera, además se añade una figura básica generada en el software de modelamiento y animación 3D

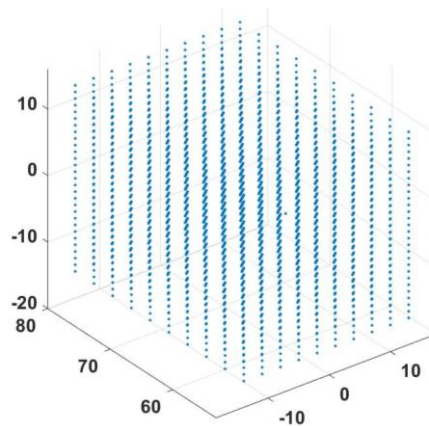


Autodesk Maya 2018 versión para estudiantes, las pruebas de desempeño realizadas se describen a continuación.

### 2.3.1. Prueba de Desempeño sobre el algoritmo de generación de mallas

Este experimento se desarrolló para evaluar la eficacia del **algoritmo de triangulaciones de Delaunay** propuesto en la **Sección 1.5**, en la base de datos se encuentran algunas figuras básicas que tienen parámetros y ecuaciones conocidas. Es por eso, que para el desarrollo de este experimento recurrimos a los datos del objeto denominado como 'cube', debido a que podemos generar fácilmente datos artificiales que tengan el mismo comportamiento, pero con una distribución uniforme como se observa en la **Figura 46**. Se realizó esta prueba de desempeño para la figura cubica, debido a que, la naturaleza de los datos permite una observación rápida de las estructuras de las triangulaciones de Delaunay.

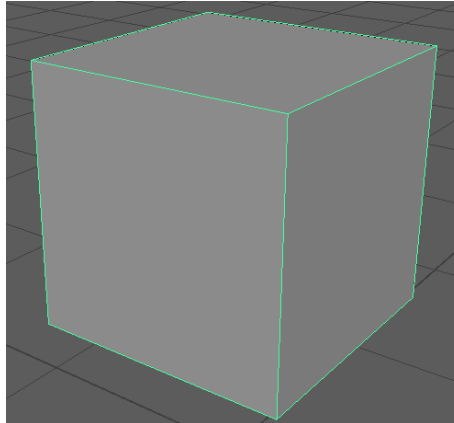
**Figura 46.** Nube de puntos del cubo generado en computadora.



Elaboración propia.

Cargamos los datos del objeto 'cube' y los datos virtuales del cubo, es posible observar visualmente la diferencia en la distribución de los datos en las nubes de puntos. Ahora, aplicamos el algoritmo incremental para triangulaciones de Delaunay a las figuras, con el fin de generar una superficie regular, y cargamos las nuevas estructuras resultantes, podemos realizar la evaluación visual de los resultados y comparar el desempeño del algoritmo en ambas figuras con la estructura cubica creada en Autodesk Maya que se ilustra en la **Figura 47**.

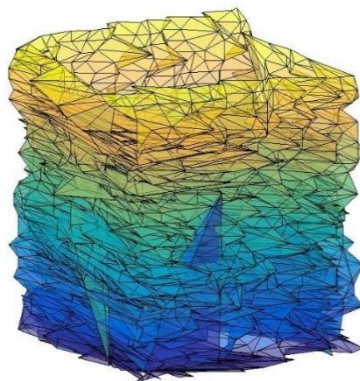
**Figura 47.** Cubo creado en Autodesk Maya.



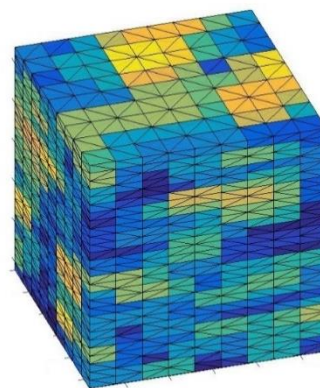
Elaboración propia.

El algoritmo incremental para triangulaciones de Delaunay que se aplicó a la nube de puntos del objeto reconstruido 'cubo', genero una malla irregular llena de aristas, aunque forma de la reconstrucción se asemeja visualmente a una estructura cubica, como se aprecia en la **Figura 48A** se puede observar que, por la distribución de los datos, no se crea una superficie plana, los bordes de la reconstrucción son irregulares y se puede deducir que el algoritmo presenta falencias. Sin embargo, en la **Figura 48B** que corresponde a los datos artificiales donde la distribución es uniforme, presento resultados muy distintos. Ya que la superficie es estable y regular, la reconstrucción representa un cubo con alto nivel de detalle y las triangulaciones crean una estructura de polígonos regulares sobre su superficie.

**Figura 48.** Aplicación algoritmo de Delaunay A) a los datos adquiridos y en B) a los datos artificiales.



A) datos adquiridos



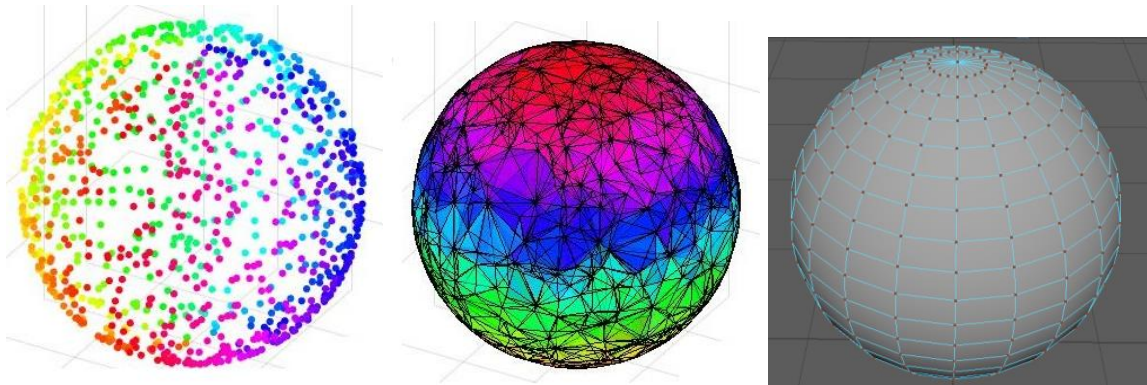
B) datos artificiales

Elaboración propia.

Posteriormente se realizó la comparación del mejor de los resultados con la figura realizada en el software de modelamiento 3D, que permitió concluir que el resultado de las triangulaciones de Delaunay es óptimo.

Se repitió el proceso experimental con otro objeto artificial, que en este caso se trata de una esfera. Este nuevo objeto se compara con su contraparte modelada en Autodesk Maya, la comparación se observa en la **Figura 49**, los resultados de la reconstrucción de superficies realizado bajo el algoritmo triangulaciones de Delaunay se considera óptimo, el algoritmo es eficiente en la descripción de una superficie poligonal. Sin embargo, el número de polígonos generados en las reconstrucciones son demasiados.

**Figura 49.** Datos artificiales de una esfera, en A) nube de puntos, en B) aplicación Delaunay y en C) objeto creado en Autodesk Maya.



A) Nube de puntos  
Elaboración propia.

B) aplicación Delaunay

C) Autodesk Maya

Una gran cantidad de polígonos aumenta el costo del procesamiento del objeto 3D, es necesario refinar el algoritmo para generar superficies con una menor cantidad de polígonos, la menor cantidad necesaria para que el objeto mantenga su forma y el software no se sature.

### 2.3.2. Prueba de la arquitectura experimental

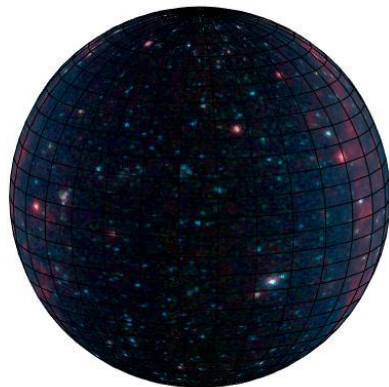
La arquitectura de acople propuesta es la integración de imágenes transformadas en texturas, con la superficie poligonal obtenida gracias al algoritmo incremental de triangulaciones de Delaunay, esto se propone para agregar detalle visual a las estructuras poligonales y poder obtener objetos digitales similares a los originales, en este proceso experimental se realiza la validación de la arquitectura.

Se realizó cargando los datos como nube de puntos de uno de los objetos de la base de datos, posteriormente se aplica a esta nube de puntos el algoritmo incremental definido en la **Sección 1.5**, con las triangulaciones y la nube de puntos,

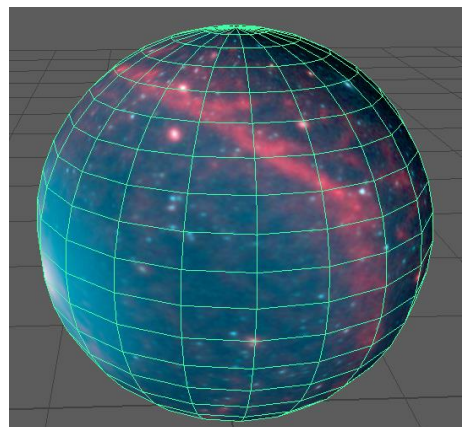
se hace uso de la herramienta 'texturemap' de Matlab para agregar la textura generada a la superficie poligonal. Esta herramienta crea un mapa de texturas en la superficie y adhiere la imagen, acomodándola de la mejor forma posible para cubrir todos los polígonos, para la evaluación del resultado se considera prudente cargar los datos de una figura generada artificialmente que se encuentra en la base de datos, la figura cuenta con su propia textura. Es posible aplicar la misma textura que al objeto para observar los resultados y comparar su nivel de detalle con las imágenes generadas en el software de modelado 3D.

La arquitectura propuesta presenta un añadido visual a las superficies generadas por las triangulaciones de Delaunay, mejorando la calidad visual de las reproducciones. Sin embargo, debido a los resultados del experimento anterior, la aplicación de texturas en superficies irregulares generada por errores de los datos, impide una visualización concreta de los resultados de aplicación de las texturas, las superficies poligonales irregulares contribuyen negativamente al aspecto visual del objeto, por tanto, se decidió aplicar el experimento a los objetos artificiales agregando texturas prefabricadas. Igualmente se realizó la comparación con los objetos construidos en Autodesk Maya a la que se les aplicó la misma textura, pero utilizando la función de mapa de texturas de Maya como se observa en la **Figura 50**.

**Figura 50.** Esfera texturizada sobre datos A) aplicados Delaunay y en B) objeto Autodesk Maya.



A) Aplicado Delaunay  
Elaboración propia.



B) objeto Autodesk Maya

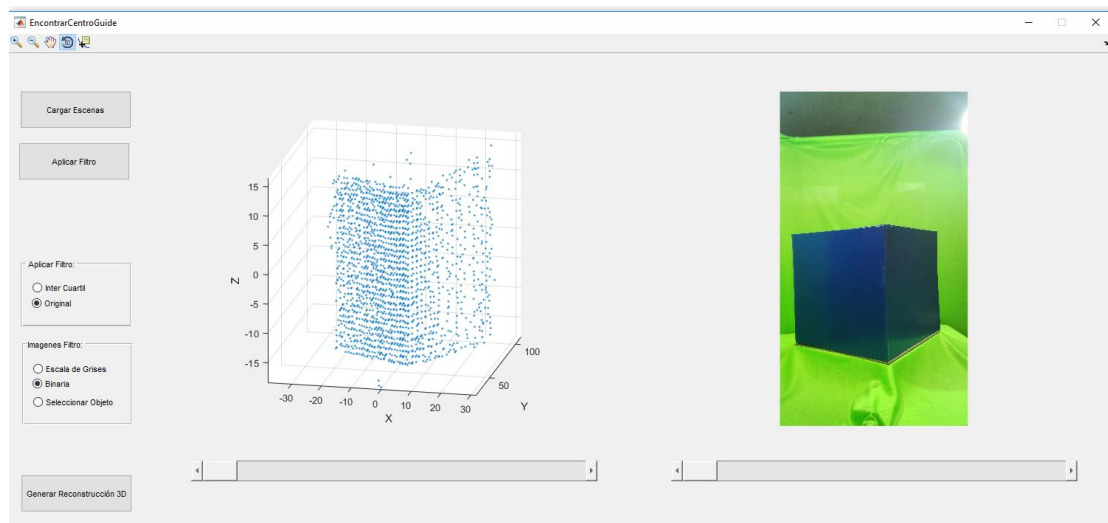
Los resultados fueron una mejora en la calidad visual de la reconstrucción, la aplicación de texturas a los modelos poligonales construidos con triangulaciones de Delaunay, resultaron en una enorme mejoría al objeto 3D en su aspecto visual, dando como resultado un objeto más real y cómodo de usar en aplicaciones futuras. Se recomienda la integración de estas técnicas en los modelos de adquisición, lo

cual puede derivar en mejores reconstrucciones, realizar la obtención paralela de la información mediante un algoritmo de función conjunta, deriva en una nube de puntos mejor estructurada y con menos errores, lo que facilita la creación de los objetos digitales.

## 2.4. GUIDE MATLAB PARA LA VISUALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y LA BASE DE DATOS

La interfaz cuenta con diversos botones y barras de desplazamiento como se puede ver en la **Figura 51**, cada elemento tiene un accionar que se describe a continuación.

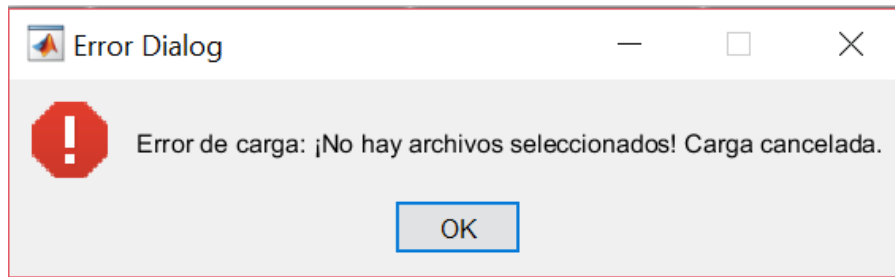
**Figura 51.** Interfaz gráfica en funcionamiento.



Elaboración propia.

El botón 'Cargar Escenas' abre el cuadro de diálogo de selección archivos, permitiendo cargar las nubes de puntos y las imágenes, tiene activada la función de selección múltiple. Si se cancela la selección de archivos se abre una caja de diálogo que informa del error, esta se muestra en la **Figura 52**, de lo contrario se cargan los archivos y se grafica el primer archivo.

**Figura 52.** Mensaje de error.



Elaboración propia.

Los mensajes de error se condicionaron para el accionar de todos los botones para hacer más informativa la interfaz y que el usuario pueda usar la interfaz correctamente. El 'axes1' se utiliza para graficar las nubes de puntos y el 'axes2' las imágenes. El botón 'Aplicar Filtro' da la orden de aplicar el filtro seleccionado en los paneles de filtros a los datos, posteriormente se gráfica. El botón 'Generar Reconstrucción 3D' como su nombre lo indica genera la reconstrucción 3D a partir de los datos cargados anteriormente, esta se muestra en una figura externa a la interfaz. Las barras de desplazamiento permiten cambiar de escenas, son dos para proporcionar independencia entre las imágenes y las nubes de puntos.

### 3. CONCLUSIONES

Con la aplicación de técnicas de control, fue posible obtener resultados óptimos que posteriormente pueden ser procesados para generar objetos digitales con un buen nivel de detalle, con un bajo costo computacional y con tiempos más prudentes de reconstrucción, la tecnología de digitalización por láser presenta un buen desempeño para la reconstrucción 3D, no obstante aplicar técnicas de control más refinadas y aplicadas al mejoramiento del hardware puede permitir que los sistemas de adquisición evolucionen y desarrollen todo su potencial .

Los algoritmos de reconstrucción de superficies fueron una parte fundamental del proceso de construcción de los gráficos 3D por computadora, el algoritmo de triangulaciones de Delaunay demostró tener un gran potencial y buen desempeño en esta tarea, el desarrollo de un algoritmo robusto, resultó en una carga menor a los sistemas de adquisición, el uso de triangulaciones resultó en estructuras simples y bien definidas, fáciles de interpretar y modificar en procedimientos futuros que busquen editar las formas de los objetos y espacios obtenidos.

La arquitectura para el acople de técnicas desarrollada, crea nuevas posibilidades, la adición de un modelo de adquisición de imágenes que se llevó a cabo en conjunto con un sistema de medición de profundidad, no es un concepto nuevo, pero en la digitalización los sistemas siempre priman el detalle o la calidad visual, por este motivo la arquitectura propuesta se convirtió en una gran herramienta para el diseño de futuros dispositivos de adquisición, que permitan una digitalización más eficiente, con gran detalle y calidad visual, un mejor desempeño y menor costo computacional.

El haber construido una base de datos estructurada fue un arduo proceso, que conllevó múltiples horas de investigación de los dispositivos de adquisición para el diseño de un protocolo estable y la obtención de buenos resultados, los dispositivos se analizaron, y fueron observados los resultados bajo diferentes condiciones de trabajo. En base a los resultados experimentales se construyó y estructuró los sistemas necesarios y suficientes, para que la base de datos pueda ser usada en trabajos futuros y contribuya en el desarrollo de mejores técnicas para la digitalización tridimensional de objetos.

El sistema de adquisición de datos de profundidad, aún necesita desarrollo para ser viables y obtener modelos tridimensionales exactos, por ser un sistema de bajo costo, presentó múltiples problemas con la adquisición de datos y requirió de filtros exhaustivos. No obstante, cuando se aplicaron los algoritmos de generación de mallas se obtuvieron resultados aceptables. Durante el desarrollo de este trabajo de grado se observó la aplicación de algoritmos de triangulación a datos reales y

artificiales, presentando buenos resultados en la generación de triangulaciones para las estructuras generadas artificialmente, pero resultados de baja calidad en los datos adquiridos por el sensor laser, debido a, que el sensor presento múltiples falencias y falta de estructura en las nubes de puntos, lo que impidió observar resultados óptimos.

Uno de los principales problemas con el sensor laser que se presentó, es debido, a la etapa experimental de adquisición de datos, donde se encontró que el sistema era sensible al color, dando resultados erróneos cuando los objetos a digitalizar, no son del color blanco. Las superficies blancas presentaron una mejor respuesta al haz de luz láser, que las superficies con otros colores, esto se debió a que las superficies dependiendo del color reflejan las señales de luz del sensor de una manera diferente, retrasando la respuesta del sistema y otorgando un valor erróneo de distancia. Sin embargo, fue necesario destacar que esto no se consideró del todo una desventaja, un estudio exhaustivo de las respuestas del sensor laser a los colores, puede desembocar en el desarrollo de un sistema óptimo de digitalización, que permita, no solo obtener información de distancia o profundidad, sino acoplar las características de color de los objetos, mejorando ampliamente el proceso de adquisición de la información.

También fue propuesto el desarrollo de los métodos de adquisición, especialmente el basado en sensores laser, su potencial en el reconocimiento de colores, permitió añadir definición, color y textura a los objetos digitalizados de una forma más simple y rápida, el acople de adquisición de imágenes a estos sistemas, permitió obtener objetos definidos, permitió realizar un aporte en el área de visión artificial y el Machine Learning. El desarrollo de sensores laser de bajo costo y mejor definición, contribuyo favorablemente a la comunidad académica.



#### 4. RECOMENDACIONES

Debido a la necesidad creciente de la digitalización de objetos, se recomienda la exploración de otros métodos de digitalización, así como la aplicación de nuevas técnicas de control a los sistemas ya propuestos que permita mejorar la calidad con la que realizan la adquisición de los datos. El tiempo es un recurso fundamental, agilizar los procesos de obtención de información resulta indispensable para que estos métodos sean factibles.

La aplicación de algoritmos de Delaunay para la reconstrucción de superficies tridimensionales, darles sentido y forma a una nube de puntos, resulta eficiente y satisfactorio cuando se posee una información coherente, sin embargo estos algoritmos pueden ser mejorados y refinados para obtener resultados mejores, la aplicación de condiciones extras que limiten la formación de las triangulaciones, resulta en una estructura poligonal más estable y regular, que resulta mucho más eficiente para la aplicación de trabajo posterior, los sistemas de modelado 3d como Autodesk maya, trabajan mejor sobre polígonos regulares.

Se propone como trabajo a futuro el desarrollo de las técnicas de triangulaciones de Delaunay, un proceso refinado permite la reducción de la cantidad de polígonos de las superficies, lo que mejora el rendimiento de los sistemas, y facilita el post-procesado de las estructuras. Los algoritmos de Delaunay refinados también pueden ser usados como un medio de filtrado en conjuntos de datos, si se limitan las triangulaciones en base a sus ángulos y distancia euclidiana, se obtienen estructuras coherentes, mejor definidas y fáciles de estudiar, y el algoritmo puede ser más versátil y útil en otros campos de estudio.

Se recomienda la aplicación de nuevas arquitecturas de acople, que profundicen en la información conjunta entre las nubes de puntos y las imágenes, la aplicación de reconocimiento de patrones y aprendizaje de máquinas puede desembocar en resultados mucho más óptimos, así la creación de mundos digitales será más cómoda y accesible para todas las personas.

También se propone el desarrollo de los métodos de adquisición, especialmente el basado en sensores laser, su potencial en el reconocimiento de colores, permite añadir definición, color y textura a los objetos digitalizados de una forma más simple y rápida, el acople de adquisición de imágenes a estos sistemas, permitiría obtener objetos de muy alta definición, permitiendo realizar un aporte importante en el área de visión artificial y el Machine Learning. El desarrollo de sensores laser de bajo costo y mejor definición, contribuiría favorablemente a la comunidad académica.

En el desarrollo de este proyecto de grado encontramos características interesantes en las propiedades adquisitivas del sensor Scanse, es recomendable el desarrollo de un estudio profundo del sensor que permita descubrir sus atributos y mejorar el sistema para futuras investigaciones, consideramos que actualmente el sistema es ineficiente y lleno de errores, pero posee un enorme potencial si se mejoran sus protocolos y se refina su software de procesamiento para hacer que el sistema sea más exacto con la adquisición de nubes de puntos.

## BIBLIOGRAFIA

**ALBORNOZ María Claudis, BÉRON Mario y MONTEJANO Germán Antonio** Interfaz gráfica de usuario: el usuario como protagonista del diseño [Conferencia] // XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación / ed. WICC. - Buenos Aires : [s.n.], 2017, septiember.

**ALFONSO María José** Los gemelos tecnológicos, al alza. Revista PYMES [En línea] // Los gemelos tecnológicos, al alza. Revista PYMES. - Inma Elizalde, julio de 2018. - marzo de 2019. - <https://revistapymes.es/12782-2/#>.

**ÁLVAREZ MENESES Emilia del Pilar y MUÑOZ CRUZ John Gabriel** Diseño e Implementación de un Escaner 3D para la Reconstrucción de una Superficie a través de una Nube de Puntos [Conferencia]. - 2017.

**BARHAK J. y FISCHER A.** Parameterization for reconstruction of 3D freeform objects from laser-scanned data based on a PDE method [Publicación periódica] // The Visual Computer. - 2001. - 6 : Vol. 17. - págs. 353-369.

**BENDAANANE Mohammed , EDDAHMANI Kaoutar y SEBARI Imane** Urban objects extraction from 3D laser point clouds acquired by a static laser scanner and a mobile mapping system [Publicación periódica] // Revista Internacional de Aplicaciones de Teledetección (IJRSA). - 2015. - Vol. 5. - págs. 33-44.

**CARO VALENCIA Camilo, PATIÑO LEÓN William Vicente y VARGAS TAMAYO Luis Fernando** Planteamiento de una solución automatizada al proceso de manufactura de moldes y modelos para ASTEMODEL S.A.S. [Conferencia]. - 2018.

**CIRO MARTINEZ Bencardino** Estadística y muestreo [Libro]. - [s.l.] : ECOE ediciones. - Décima tercera edición. -2014.

**CUADRAS Carles M** Distancias Estadísticas [Publicación periódica] // Estadística Española. - 1989. - 119 : Vol. 30. - págs. 295-378.

**DE BERG Mark [y otros]** Computational Geometry - Algorithms and Application [Libro]. - Heidelberg : Springer, 1997. - tercera.

**DOMÍNGEZ TORRES Alejandro** Procesamiento Digital de Imágenes [Publicación periódica] // Perfiles Educativos. - Distrito Federal, México : Instituto de Investigaciones sobre la Universidad y la Educación, 1996. - 72.

**FERNÁNDEZ RUIZ Marta** Modelado, Texturizado y Ajuste de Malla [Conferencia]. - 2011.

**GALLARDO PALACIOS Francisca Daniela** Software de Comparación de Algoritmos Delaunay de Refinamiento de Triangulaciones [Informe] / Ciencias de la computación ; Universidad de Chile. - Santiago de Chile : [s.n.], 2012.

**GARCÍA S. Iván y CARANQUI S. Víctor** La visión artificial y los campos de aplicación [Publicación periódica] // Tierra Infinita. - 2015. - 1 : Vol. 1. - págs. 94-103.

**GOLIAS N. A. y DUTTON R. W.** Delaunay triangulation and 3D adaptive mesh generation [Publicación periódica] // Finite Elements in Analysis and Design. - 17 de April de 1997. - 3-4 : Vol. 25. - págs. 331-341.

**HOFFMANN Christoph M** Computer Vision, Descriptive Geometry, and Classical Mechanics [Sección de libro] // Computer graphics and mathematics. - Berlin, Heidelberg : Springer, 1992.

**KLENK Matthias** El cine digital en el siglo XXI. La transformación del cine hollywoodense y del consumo cultural a causa de la digitalización [Publicación periódica] // El ojo que piensa, revista de cine iberoamericano. - 2011. - 4.

**LÓPEZ ESCOGIDO Daniel** Escáner 3D de Alta Precisión [Publicación periódica]. - 2016.

**LÓPEZ MENDOZA Patricio [y otros]** Uso de escáner láser 3D en la reproducción de restos óseos: una evaluación desde la zooarqueología, paleontología y la conservación-restauración [Publicación periódica] // Conserva: Revista del Centro Nacional de Conservacion y Restauracion. - 2013. - 18. - págs. 59-70.

**MANRIQUE GARCÍA Oscar L.** Reconstrucción 3D de fondos marinos mediante sensores acústicos sobre AUVs [Informe]. - [s.l.] : Escuela Técnica Superios de Ingenieros Industriales - UPM, 2017.

**MathWorks** GUI de MATLAB [En línea]. - MathWorks. - marzo de 2019. - <https://la.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>.

**MENÉNDEZ VELÁZQUEZ Amador** Una breve introducción a la teoría de grafos [Publicación periódica] // Suma. - junio de 1998. - 28. - págs. 11-26.

**OKABE Atsuyuki [y otros]** Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams [Libro]. - [s.l.] : John Wiley & Sons, 2009. - segunda : Vol. 501.

**OLACHEA Occi** 6 de las mejores opciones de programas para el modelado en 3D [En línea]. - Redacción PAREDRO, octubre de 2014. - marzo de 2019. -

<https://www.paredro.com/6-buenas-opciones-de-programas-para-el-modelado-en-3d/>.

**ORTIZ CODER Pedro y PINO ESPINOSA Beatriz del** Digitalización 3D automática con láser escáner, fotogrametría y videogrametría. El caso práctico del Templo de Diana (Mérida) [Publicación periódica] // Virtual Archaeology Review. - 2013. - 8 : Vol. 4. - págs. 90-94.

**ORTIZ P. [y otros]** Experiences about fusing 3D digitalization techniques for cultural heritage documentation in Cáceres wall (Spain) [Publicación periódica] // ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'. - Germany : [s.n.], septiembre de 2006. - págs. 25-27.

**PAEZ Francisco C. [y otros]** Método no destructivo para la estimación del LAI mediante digitalización magnética: datos preliminares en un cultivo de tomate en invernadero [Conferencia] // II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola. - Almería : [s.n.], 2016.

**PARRILLA Jara [y otros]** Glándulas de la sal en *Maledictosuchus riclaensis* (Metriorhynchidae, Thalattosuchia) del Calloviense de la Península Ibérica [Publicación periódica] // Sociedad Geológica de España. - 2016. - 59.

**PEREIRA UZAL José Manuel y ROBLEDANO ARILLO Jesús** Uso de Tecnologías 3D en la Digitalización y Difusión de Documentos de Alto Valor Patrimonial [Publicación periódica] // El profesional de la información. - 2013. - 3 : Vol. 22.

**Scanse** 3D Scanner Node Web Application [En línea]. - septiembre de 2017. - febrero de 2019. - <https://github.com/scanse/sweep-3d-scanner>.

**Scanse** User's Manual and Technical Specifications.

Standard Set of Images [En línea]. - repositorio Image Processing Place. - marzo de 2019. - [http://www.imageprocessingplace.com/root\\_files\\_V3/image\\_databases.htm](http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm).

**TORRES Juan Carlos [y otros]** Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio [Publicación periódica] // Virtual Archaeology Review. - 11 de abril de 2010. - 1 : Vol. 1. - págs. 51-54.

## ANEXOS

Esta sección ha sido destinada a los resultados tangibles logrados con el trabajo realizado en esta tesis. Estos anexos contienen una descripción más ampliada de los resultados mencionados en la **Sección 2**.

### ANEXO 1. LISTA DE ACRÓNIMOS

**3D** Tres dimensiones

**2D** Dos dimensiones

### ANEXO 2. BASE DE DATOS

Para la constitución de la base de datos los datos de escaneo laser han sido guardados como archivos CSV (Valores separado por comas) ya que son un tipo de documento en formato abierto y sencillo para representar tablas, donde:

X: la coordenada x del punto 3d

Y: la coordenada y del punto 3d

Z: la coordenada z del punto 3d

SIGNAL STRENGTH: la intensidad de la señal del punto (rango 0: 255)

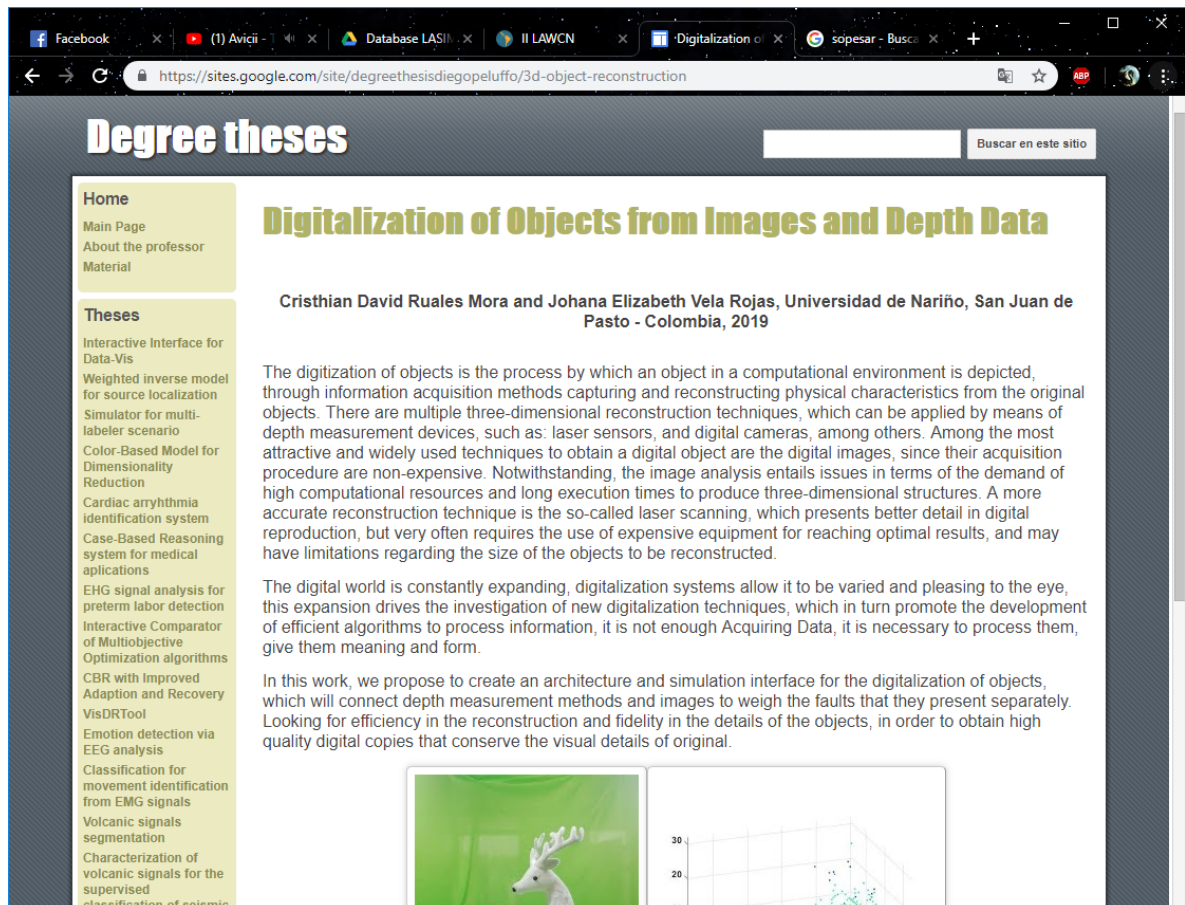
Y las imágenes están en están como archivos JPG.

La base de datos está disponible en la página descrita en el **ANEXO 3**.

## ANEXO 3. PÁGINA WEB

Dentro del desarrollo de este proyecto, se contempla la creación de una página web en Google Sites, donde, se puede encontrar información general acerca de este proyecto y se puede acceder a la base de datos.

Figura 53. Diseño de la Página Web<sup>1</sup>.



Elaboración propia.

<sup>1</sup> <https://sites.google.com/site/degreethesisdiegopeluffo/3d-object-reconstruction>