



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias en Inteligencia Artificial

Reconstrucción de objetos en 3-D por método de cambio de fase utilizando franjas RGB.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título en Maestro en Ciencias en Inteligencia Artificial.

Presenta:

Ing. Manuel Alejandro López Cristerna.

Dirigido por:

Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega.

Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega

Presidente

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín

Secretario

Dr. Marco Antonio Aceves Fernández

Vocal

Dr. Efrén Gorrostieta Hurtado

Suplente

Dr. Saúl Tovar Arriaga

Suplente

Centro Universitario

Universidad Autónoma de Querétaro

Noviembre de 2019

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## RESUMEN

Uno de los problemas clásicos del área de Visión por Computadora es la reconstrucción tridimensional a partir de imágenes adquiridas por una cámara. Este problema involucra, específicamente, los siguientes pasos: (1) la triangulación, (2) la calibración de la cámara y (3) la estimación de los parámetros de orientación y posición de la cámara conforme a las dimensiones del objeto.

El paso (1), la triangulación, tiene por objetivo encontrar la posición de un punto en el espacio a partir de la intersección de dos líneas que parten de la correspondencia de puntos entre el objeto, el proyector y la cámara.

Los pasos (2) y (3) consisten en encontrar los parámetros de la cámara (parámetros de calibración, orientación y posición) a partir de un conjunto de correspondencias de puntos extraídos en este caso de la imagen de franjas proyectadas en RGB. Sin embargo, existen superficies y configuraciones de la cámara conocidas como críticas donde se ha demostrado que es imposible extraer los parámetros de la cámara al usar, solamente, correspondencias de franjas.

En esta tesis se describe cada una de las etapas necesarias para la reconstrucción de objetos en tercera dimensión utilizando el método de cambio de fase a través de franjas "RGB", abarcando de igual manera los pasos antes mencionados, resaltando las técnicas utilizadas de posicionamiento del sistema de proyección y captura, ya que sin él, dicho trabajo sería imposible de realizar.

Se mejora el algoritmo utilizado para la investigación el cual consiste en extraer la forma de la superficie 3-D basada en la información de la distorsión del patrón de luz proyectado sobre el objeto (imagen fase), esta información puede ser calculada a través del uso de varios principios de luz estructurada y la implementación de un algoritmo para su desarrollo. En esta técnica la información de la topografía de un objeto se reconstruye a partir de la deformación de un sistema periódico de franjas que se proyectan en él, en este

caso, la máscara experimental que se utiliza para la implementación del algoritmo es de tipo "RGB", la cual ha sido utilizada en anteriores investigaciones.

A diferencia de los estudios anteriores, lo que se logra en esta investigación es la optimización del algoritmo, de tal manera que se reduce el número de pasos a seguir con las que se logra el resultado final del proceso. Por lo tanto, los algoritmos utilizados son optimizados para obtener una calidad superior de coloración y nitidez, en este caso modificando alfa y beta respectivamente. El tiempo de procesamiento se reduce, dando como resultado una mejor obtención de información para un mejor análisis del objeto a reconstruir, consiguiendo una disminución significativa de los errores en la reconstrucción del objeto.

**(Palabras clave:** Phase-Shifting, desdoblamiento de fase, reconstrucción en tercera dimensión, franjas RGB, optimización).

## SUMMARY

*One of the classic problems of the area of Computer Vision is the three-dimensional reconstruction from images acquired by a camera. This problem involves, specifically, the following steps: (1) the triangulation, (2) the calibration of the camera and (3) the estimation of the parameters of orientation and position of the camera according to the dimensions of the object.*

*The step (1), the triangulation, aims to find the position of a point in space from the intersection of two lines that start from the correspondence of points between the object, the projector and the camera.*

*Steps (2) and (3) consist in finding the parameters of the camera (calibration parameters, orientation and position) from a set of points correspondence extracted in this case from the image of projected RGB bands. However, there are surfaces and configurations of the camera known as critical where it has been shown that it is impossible to extract the parameters of the camera when using, only, stripe correspondences.*

*This thesis describes each of the stages necessary for the reconstruction of objects in third dimension using the phase change method through "RGB" stripes, covering in the same way the steps mentioned above, highlighting the techniques used to position the system of projection and capture, because without it, such work would be impossible to perform.*

*The algorithm used for research is improved, which consists in extracting the shape of the 3-D surface based on the distortion information of the projected light pattern on the object (phase image), this information can be calculated through use of several principles of structured light and the implementation of an algorithm for its development. In this technique the information of the topography of an object is reconstructed from the deformation of a periodic system of fringes that project in it, in this case, the experimental mask that is used*

*for the implementation of the algorithm is of type "RGB ", which has been used in previous Investigations.*

*Unlike the previous studies, what is achieved in this research is the optimization of the algorithm, in such a way that the number of steps to follow is reduced with which the final result of the process is achieved. Therefore, the algorithms used are optimized to obtain a higher quality of coloration and sharpness, in this case modifying alpha and beta respectively. The processing time is reduced, resulting in a better information obtaining for a better analysis of the object to be reconstructed, achieving a significant reduction of the errors in the reconstruction of the object.*

**(Key words:** *Phase-Shifting, phase splitting, third-dimensional reconstruction, RGB fringes, optimization)*

«Los científicos de hoy piensan en profundizar y no en esclarecer. Uno debe ser sensato para pensar con claridad, pero uno puede pensar con profundidad aun siendo un demente».

*Nikola Tesla.*

Dedicada con todo cariño a mis grandes eruditos: Mis Abuelos.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por la beca otorgada por 2 años en la Maestría en Ciencias en Inteligencia Artificial realizada en la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

A mi familia por apoyarme en todo momento, a mis padres Mónico Manuel y Lourdes, que desde pequeño han sido una inspiración en mi vida, quienes son sinónimo de lucha incansable, de amor inapagable y de alegría inagotable, además de enseñarme que siempre la humildad del ser humano es indispensable en la vida.

A mi hermana Dulce Marianel que sigue adelante con sus sueños sin importar a quien le agraden, sin importar el costo de alcanzarlos, a esa compañera de la vida que de pequeño me cuida y de grande me escucha y aconseja.

A mi cuñado Alan por darme ánimos de seguir adelante y apoyarme ante cualquier situación desde que era casi un niño y esa princesa la cual es mi sobrina Isabella Marianel, quien me lleno de alegría y risas cuando más lo necesitaba, dándome ánimos para seguir adelante y darme cuenta que a pesar de cada adversidad siempre habrá sonrisas y travesuras de por medio.

A mis más grandes amigos, que son como mis hermanos David, Moisés y Gabriel, Jorge Iván, Marco Alejandro y Víctor Manuel por soportar mi carácter imperfecto, mis pláticas sin sentido e insoportables y darme aliento en los momentos más difíciles, al igual que sus familias que me aceptan como su amigo.

A mis compañeros de maestría, por escucharme cuando me estancaba en algún algoritmo. A mis profesores, esos famosos doctores de la facultad de ingeniería que combatían día a día la ignorancia de la facultad, al Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega por apoyarme en cada sueño, en cada paso académico, por ser mi tutor, asesor, mentor y amigo. Siempre un gran ejemplo de trabajo, responsabilidad, equidad, perspicacia y solidaridad.

Gracias, totales.

# ÍNDICE GENERAL

<b>Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>Summary.....</b>	<b>3</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>7</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>20</b>
1.1.1 OBJETIVO GENERAL .....	20
1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	20
<b>1.2 HIPOTESIS.....</b>	<b>21</b>
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>21</b>
<b>1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....</b>	<b>23</b>
1.4.1 ALCANCES.....	23
1.4.2 LIMITACIONES.....	24
<b>1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....</b>	<b>24</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 RECONSTRUCCIÓN 3-D POR MEDIO DE IMÁGENES.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>30</b>
2.2.1 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL.....	30

2.2.2 ANÁLISIS DE PROYECCIÓN DE FRANJAS.....	33
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>36</b>
3.1 ADQUISICIÓN DE IMAGE.....	39
3.2 PRE-PROCESAMIENTO.....	44
3.3 POST-PROCESAMIENTO Y VISUALIZACIÓN.....	50
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
4.1 PROYECCIÓN Y CORRECCIÓN DE IMAGEN.....	51
4.2 SEPARACIÓN DE CANALES DE IMAGEN CAPTURADA.....	53
4.3 PROCESO DE RECONSTRUCCIÓN DEL OBJETO.....	54
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>6. REFERENCIAS.....</b>	<b>66</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>68</b>

## INDICE DE FIGURAS

Fig.1. Proceso de reconstrucción tridimensional.....	19
Fig.2. Imágenes tomadas del trabajo de Klette (1998) para mostrar cómo es que funciona la reconstrucción por medio de sombras. En estos métodos se determina la profundidad de un punto de acuerdo su valor de intensidad. ....	27
Fig.3. Imágenes tomadas el trabajo de Aganj (2007) para mostrar cómo funciona la reconstrucción por medio de siluetas. A partir de un conjunto de imágenes tomadas de diferentes perspectivas se crea un modelo 3D de un objeto.....	28
Fig.4. Reconstrucción por medio de enfoque. Imágenes tomadas del trabajo de Nayar (1994) en el cual propone que definir la profundidad de una escena de acuerdo al grado de desenfoco que se muestra en un conjunto de imágenes capturadas con diferente enfoque.....	29
Fig.5. Técnicas de adquisición 3-D (Molleda Meré, 2008). ....	32
Fig.6. Sistema de captura de imágenes.....	39
Fig.7. Sistema de proyección de franjas. ....	40
Fig.8. Sistema de procesamiento para reconstrucción de objetos. ....	41
Fig.9. Esquema de triangulación de objetos del sistema de reconstrucción. ....	41
Fig.10. Sistema en físico de triangulación para la reconstrucción de objetos.....	42

Fig.11. Triangulo esquemático del teorema de Pitágoras.....	42
Fig.12.Triangulo esquemático del teorema de Pitágoras. ....	43
Fig. 13.-Franja sinusoidal de color (para la interpretación de las referencias de las franjas de color en RGB). ....	46
Fig.14. Gráfica de intensidad en los tres canales. ....	48
Fig.15. Proceso de composición de la franja de codificación de fase de color. (a) franja de codificación de fase en RGB (b) franja de codificación de fase de color. ....	48
Fig. 16. Color de la calibración. (a) Rojo puro, (b) verde puro, (c) azul puro y (d) blanco puro. ....	48
Fig.17. Esquematización general para procesos de reconstrucción de objetos.....	50
Fig.18. Objeto con proyección de franjas desfasadas sin aplicación de transformada de perspectiva.....	51
Fig.19. Objeto con proyección de franjas desfasadas con aplicación de transformada de perspectiva. ....	52
Fig. 20. Proyección de franjas a objeto (Mickey Mouse) que desea construir en tres dimensiones, del lado izquierdo la figura en su estado normal y del lado derecho la figura con franjas proyectadas y aplicada la transformada de perspectiva. ....	53
Fig. 21. Separación de canales de imagen capturada.....	53
Fig. 22. Separación de canales de imagen capturada, dando como resultado los canales RGB en escala de grises.....	54
Fig.23. Imagen capturada convertida a escala de grises para su procesamiento.....	54

Fig.24. Mapa de fase del objeto a reconstruir. ....	55
Fig.25.Resultado de objeto reconstruido con mapa de fase. ....	55
Fig.26.Reconstrucción tridimensional de objetos sin ningún filtrado previo. ....	56
Fig.27. a) Objeto capturado convertido a escala de grises y b) espectro de imagen del objeto. .....	56
Fig.28 a) Máscara creada a partir de ceros y unos para la aplicación en el espectro b) espectro al que se aplica la máscara c) espectro con máscara de ceros y unos aplicados. ....	57
Fig.29. Imagen del objeto filtrado con máscara de ceros y unos. .....	57
Fig.30. Resultado en tercera dimensión del objeto reconstruido y filtrado con una máscara de unos y ceros. ....	58
Fig. 31 Mascara binaria para filtro de Fourier.....	58
Fig.32 Resultado de la aplicación de máscara binaria con filtrado de Fourier. .....	59
Fig.33. Base de datos para experimentación, captura, recopilación y comparación de resultados. ....	61
Fig.34. Base de datos para experimentación, captura, recopilación y comparación de resultados. ....	61
Fig.35. Base de datos para experimentación, captura, recopilación y comparación de resultados. ....	62
Fig.36. Base de datos para experimentación, captura, recopilación y comparación de resultados.....	62
Fig.37. Objeto de cerámica de sol para reconstrucción. ....	63
Fig.38. a) Objeto de cerámica de sol antes del filtrado y figura b) Objeto de cerámica de sol después de filtrado.....	63

Fig.39. Objeto de cerámica de animal para reconstrucción. ....	64
Fig.40. a) Objeto de cerámica de animal antes del filtrado y figura b) Objeto de cerámica de animal después de filtrado.....	64
Fig.41. Objeto de plástico de mascara tipo humano.....	65
Fig.42. a) Objeto de plástico de mascara tipo humano antes del filtrado y figura b) Objeto de plástico de mascara tipo humano después de filtrado.....	65

Dirección General de Bibliotecas UAG

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estudio del arte de reconstrucción de objetos en 3D.....35

Tabla 2. Etapas para lograr la reconstrucción en tercera dimensión de un objeto.....38

Dirección General de Bibliotecas UAO

## CAPITULO 1

---

### INTRODUCCIÓN

La extracción de información a partir de imágenes es una tarea muy fácil de realizar para un ser humano, el cual desde muy temprana edad tiene la capacidad de ver y reconocer objetos en el ambiente que le rodea [1]. El sentido de la vista es una de las formas dominantes para percibir el mundo. Imitar su funcionamiento en una computadora, con base en la interpretación de las imágenes, es una tarea extremadamente difícil.

Se podría explicar tal proceso a nivel biológico, ya que se sabe cómo la luz es transformada en la retina y estimula ciertas neuronas perceptivas. Sin embargo, aún no es claro como esta transformación causa que la mente reconozca los objetos. Contrario al nivel bajo que se maneja en el área biológica neuronal, el área psicológica intenta dar interpretaciones a un alto nivel de cómo funciona el sistema visual. Sin embargo, los modelos que se proponen en el área psicológica [2] no proporcionan instrucciones de cómo construir un sistema artificial comparable con el sentido visual que tiene el ser humano. En síntesis, se puede decir que vivimos con un sistema visual único, del cual aún no se conoce a detalle cómo funciona. Sin embargo, la comunidad de Visión por Computadora ha realizado avances significativos, a tal grado que se ha podido guiar robots mediante captores visuales (cámaras) [3].

Es claro que el ser humano cuenta con un sistema visual muy complejo. No obstante, las computadoras que operan como sistemas visuales artificiales tienen sus ventajas. Por ejemplo, pueden medir de forma precisa los objetos que se encuentran en un entorno en lugar de interpretarlo. La extracción de estas medidas a partir de una o varias imágenes es el objetivo principal del área de Fotogrametría. Tal objetivo ha sido perseguido desde que se inventó la fotografía. Aunque es posible utilizar solo una imagen para extraer la información

métrica de los objetos, usualmente, en el área de Fotogrametría se utilizan dos o más imágenes.

Al utilizar múltiples imágenes es posible emplear técnicas de reconstrucción tridimensional, con las cuales se puede recuperar información superficial real de la escena. A principios del siglo XX se inventaron los primeros dispositivos para medición métrica. Después se extendieron para actuar como graficadores analógicos. En 1957 se patentó un graficado analítico, el cual tenía la capacidad de establecer la geometría entre imágenes análogas.

Cerca del año 1990, fue introducida la primera estación de trabajo fotogramétrica digital, la cual almacenaba imágenes digitales y realizaba el proceso de extracción de información métrica de forma automática mediante una computadora. En esa misma época se desarrollaron diversos algoritmos para extraer información de las imágenes a fin de generar reconstrucciones tridimensionales de forma automatizada. La extracción de información métrica de los objetos a partir de imágenes y la generación de reconstrucciones tridimensionales de forma automática a partir de esta información, son procesos complementarios. Sin embargo, pertenecen a diferentes áreas de estudio.

Tales procesos se han traslapado y ambas áreas comparten, en gran medida, la misma línea de investigación; no obstante, los objetivos de cada área son muy específicos. En el área de la Fotogrametría el objetivo es obtener la información métrica de los objetos que están en el entorno y, mediante esta información, generar modelos tridimensionales. En el área de Visión por Computadora, los objetivos están enfocados a generar algoritmos que realicen la reconstrucción de objetos en forma automática y sistemas que sean capaces de extraer información relevante de las imágenes [4, 5].

Esta última área ha tenido un crecimiento muy importante debido a la explotación que se le ha dado en diversas áreas, gracias a que se han logrado grandes avances en la obtención

de la estructura tridimensional de escenas u objetos reales. Las crecientes capacidades de cálculo hacen posible procesar volúmenes de datos previamente intratables, mejorando las técnicas y haciéndolas más rápidas y precisas. Esta capacidad para modelar escenas del mundo real dentro de una computadora es muy ventajosa en áreas como la industria, el diseño industrial o las artes gráficas.

La recreación por computadora de escenas reales y a la automatización de procesos de visión para interactuar con el ambiente tiene como finalidad generar ambientes virtuales tridimensionales a partir de imágenes de ambientes reales, para ello emplea métodos que pertenecen principalmente al área de Visión por Computadora, pero también se apoya en técnicas que pertenecen a otras áreas tales como: Procesamiento Digital de Imágenes y Graficación.

Por este motivo se han propuesto y utilizado varias técnicas de reconstrucción en tercera dimensión tomando distintos puntos de vista, con el fin de encontrar un algoritmo capaz de realizar este proceso de manera que los resultados sean buenos, principalmente en términos de tiempo y de exactitud con respecto al objeto.

En este caso, se trabajó con el método de cambio de fase (*Phase-shifting*), el cual consta de varias etapas en las que la información de profundidad se purifica progresivamente. Para que esto sea posible, es necesario separar la imagen capturada de la proyección de franjas RGB en sus tres canales y analizar la reconstrucción, ya que se analizarán en una sola imagen con la profundidad de la lectura de cada uno de sus canales. Una vez finalizado el proceso, se obtiene una matriz bidimensional con la profundidad de cada píxel y se obtiene la reconstrucción del objeto.

De tal forma que todo el proceso de recreación por computadora, mejor conocido como reconstrucción tridimensional, puede dividirse en tres pasos: 1) procesamiento digital de imágenes, 2) el paso propio de la Visión por Computadora, y 3) la visualización de la reconstrucción.

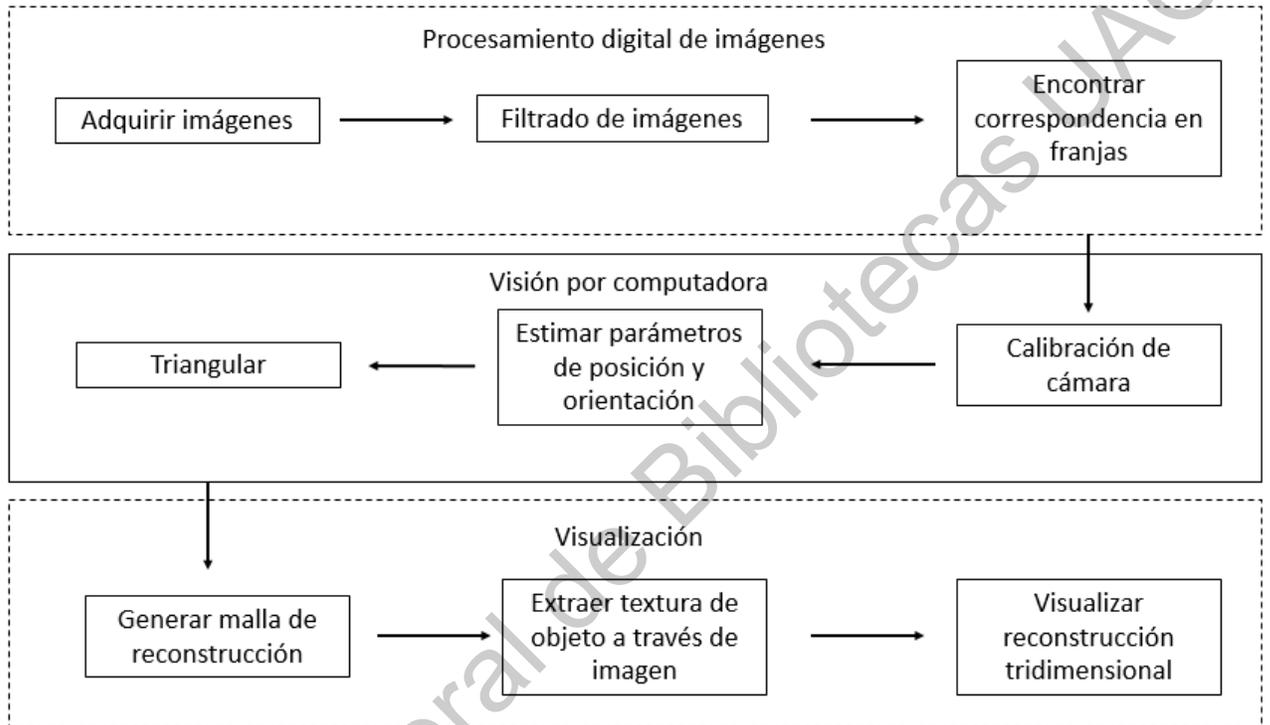


Fig.1. Proceso de reconstrucción tridimensional.

El primer paso involucra la adquisición de las imágenes, su filtrado para mejorar las condiciones de ella y encontrar la correspondencia de las franjas que se proyectan al objeto, el filtrado de ellas para mejorar sus condiciones. El segundo paso consiste en la calibración de la cámara para adaptarla de acuerdo a los parámetros que vamos a requerir, la estimación de los parámetros de orientación y posición con respecto a las dimensiones del objeto, y la triangulación, la cual consiste en posicionar la cámara, el proyector y el objeto, esto con la finalidad de obtener mejores resultados al momento de captura, adquisición de imagen y

reconstrucción. El último paso involucra la generación de la malla (en este caso, franjas verticales) que da la forma al objeto u objetos reconstruidos, la extracción de las texturas a partir de las imágenes, el mapeo de las texturas sobre los objetos de acuerdo a la información adquirida por la malla y la visualización del objeto.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

Generar soluciones a problemas de visión por computadora, creando un algoritmo que sea capaz de resolver las contrariedades que presenta el proceso de la reconstrucción tridimensional por medio del método de cambio de fase con una sola máscara en RGB, reduciendo el tiempo de procesamiento y errores múltiples para la reconstrucción de objetos diversos.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Reconstruir objetos tridimensionalmente por el método de cambio de fase con una sola máscara en ‘RGB’.
- Reducir el tiempo de procesamiento para la extracción de datos de los objetos con una sola imagen.
- Implementar el método de cambio de fase con una sola máscara por RGB para reducir la información superflua.

## **1.2 Hipótesis**

Por medio del método de cambio de fase con una sola máscara de RGB, se puede realizar la reconstrucción de objetos en tercera dimensión, aplicando y mejorando los algoritmos definidos por este procedimiento, se favorecerá la reconstrucción de los objetos. De esta manera, la lectura y la extracción de datos se determinarán con mayor exactitud y la forma del objeto adquirirá menos desajustes en la captura de la información de interés.

## **1.3 Justificación**

La reconstrucción 3-D en las últimas décadas ha sido ampliamente investigada para diferentes áreas, como por ejemplo: el desarrollo de videojuegos, animación, películas, realidad virtual, todas estas enfocadas en el área del entretenimiento [6, 7, 8, 9]. Donde es utilizada para la generación de personas, animales y objetos. Por ejemplo, hay animaciones que requieren un gran número de animales de cierto tipo desplazándose de un lugar a otro. Este tipo de animaciones se logran mediante la dinámica de desplazamiento de un solo animal. Para obtener esta dinámica, es necesario tener un modelo inicial, el cual por simplicidad, es generado por medio de algún método de reconstrucción tridimensional [10].

La reconstrucción tridimensional también se ha aplicado en el área médica. Se ha usado para generar modelos de todo tipo de órganos, así como del cerebro y los dientes. Otras aplicaciones incluyen modelar cuerpos en movimiento, teleconferencias, navegación de robots, reconocimiento de objetos, simulación de fenómenos físicos, simulación de poblaciones [10], e incluso la reconstrucción de hallazgos arqueológicos [11]. Sin la ayuda de la reconstrucción tridimensional, los diseñadores que generan modelos tridimensionales, desperdiciarían muchas horas en diversas aplicaciones complejas para modelar y dibujar objetos que pertenecen al mundo real. Además, el modelo generado podría distar mucho del objeto real.

Otras técnicas de reconstrucción se basan en marcas de luz que se adhieren en los objetos a reconstruir (comúnmente son utilizados sobre personas). Estas marcas son rastreadas por sensores visuales y, posteriormente, recrean el modelo tridimensional. Aunque pueden ser muy precisas, el costo es alto comparado con el costo de una cámara digital. Además, solo obtienen la reconstrucción del objeto sin su textura, por lo cual, hay que aplicar otros algoritmos para extraer la textura y empatarla con el modelo reconstruido.

Una alternativa muy atractiva es la reconstrucción tridimensional a partir de imágenes debido al bajo costo y a los buenos resultados que se han obtenido con esta técnica [4, 5]. Dentro del área de Visión por Computadora, el problema de la reconstrucción tridimensional a partir de imágenes, se ha clasificado de acuerdo a [4, 5]: las características de los objetos que se van reconstruir, la información a priori de las escenas y de la cámara, y el número de imágenes que se emplean.

Por lo tanto, en este trabajo se implementa un algoritmo llamado: algoritmo de cambio de fase, proyectando una sola máscara a través de franjas en “RGB”, con el cual se logra con éxito la reconstrucción de objetos, al mismo tiempo la comprobación de la reducción de tiempo en el procesamiento y eliminación significativa de información superflua en la reconstrucción.

De tal manera que las contrariedades y dificultades que se presentan en este caso en la reconstrucción de objetos en tercera dimensión con una sola máscara en RGB son las siguientes:

a) Calibración de sistema de captura.

- Triangulación del sistema de proyección y captura de acuerdo al tamaño del objeto a reconstruir.
- Velocidad y procesamiento de captura y reconstrucción de imagen en base al objeto.

b) Valores Alfa y Beta

- Manipular los valores de Alfa y Beta para calibrar las franjas “RGB”
- Realizar pruebas pertinentes para comparar resultados
- Seleccionar el mejor resultado en base al análisis de la reconstrucción del objeto.

c) Desdoblamiento de fase.

- Implementación del algoritmo de cambio de fase.
- Eliminación de ruido.

d) Reconstrucción del objeto en 3-D.

- Análisis de resultado obtenido de la reconstrucción del objeto.

## **1.4 Alcances y Limitaciones**

### **1.4.1 Alcances**

- Dar seguimiento a reconstrucción de objetos en 3-D en 360 grados.
- Realizar pruebas pertinentes en cada una de las etapas del proyecto, así como pruebas finales al concluir el trabajo.

### **1.4.2 Limitaciones**

- Falta de laboratorio específico con luz escasa para pruebas de procesamiento de imágenes.
- Estructuras dedicadas al posicionamiento de los sistemas para captura y proyección.

## **1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

En esta tesis se presenta una solución aplicada a problemas del área de Visión por Computadora, la cual utiliza un algoritmo llamado de cambio de fase para su resolución. El principal problema que aquí se aborda es el de reconstrucción en tercera dimensión con una sola máscara en “RGB”, por lo que el capítulo 1 comienza mostrando una breve descripción del proyecto de investigación, abarcando temas como: introducción, objetivos, hipótesis, justificación, alcances y limitaciones.

Posteriormente en el capítulo 2 se presenta un marco teórico necesario para el entendimiento de múltiples nomenclaturas, como: reconstrucción tridimensional, análisis de proyección de franjas, métodos disponibles para la reconstrucción de objetos en tercera dimensión, etc. También se mencionan trabajos anteriores relacionados al tema expuesto.

En la metodología expuesta en el capítulo 3, se descomponen y describen cada una de las etapas necesarias para la adquisición de imágenes tridimensionales, utilizando el método de cambio de fase, así mismo se mencionan y describen distintos pasos, así como los dispositivos utilizados para lograr dicho objetivo.

Los resultados son expuestos y examinados a detalle en el capítulo 4, mostrando el proceso y resultados de la reconstrucción de múltiples objetos en tercera dimensión por el método de cambio de fase.

Finalmente en el capítulo 5 se concluye con las aportaciones y observaciones perceptibles a lo largo del presente trabajo.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## CAPITULO 2

---

### ESTADO DEL ARTE

Los pasos de la reconstrucción tridimensional dentro del área de Visión por Computadora, se resumen a encontrar la estructura de los objetos tridimensionales a partir de entidades geométricas, tales como puntos o líneas presentes en las imágenes.

Las contribuciones de investigadores han generado una amplia gama de algoritmos que permiten realizar la reconstrucción tridimensional de entidades geométricas en las imágenes. En este capítulo se presentan algunas contribuciones, las cuales se clasifican por el número de imágenes empleadas, la información adicional en las imágenes y la información adicional de la cámara.

#### 2.1. Reconstrucción 3-D por medio de imágenes

Para obtener una reconstrucción tridimensional a partir de imágenes, es necesario conocer la relación entre las entidades geométricas del mundo y las entidades geométricas de las imágenes. Esta relación geométrica está dada por los parámetros de la cámara con base a su modelo.

Actualmente, existen diversos algoritmos para calcular diversos parámetros para la reconstrucción en 3-D. La mayoría son técnicas que buscan estimar la distancia que hay entre un punto del mundo real y la cámara con que fue tomada la imagen, de esta forma se puede estimar una coordenada 3-D para cada punto bidimensional. Hay muchas condiciones a tomar en cuenta para realizar los cálculos de las distancias, como posición de la cámara y fuentes de luz, características físicas del objeto, entre muchos otros. Los métodos de reconstrucción más populares son:

- **Reconstrucción por medio de sombras (*shape from shading*):** consiste en determinar la profundidad de un objeto tomando en cuenta la intensidad de la luz que irradia, así como sus propiedades refractivas (Klette, 1998), como se ve en la Figura 4. Un punto a favor de las técnicas basadas en este enfoque es que solo requieren de una imagen, pero normalmente requieren también de conocer la posición, intensidad y color de la fuente de luz usada durante la captura de la imagen.

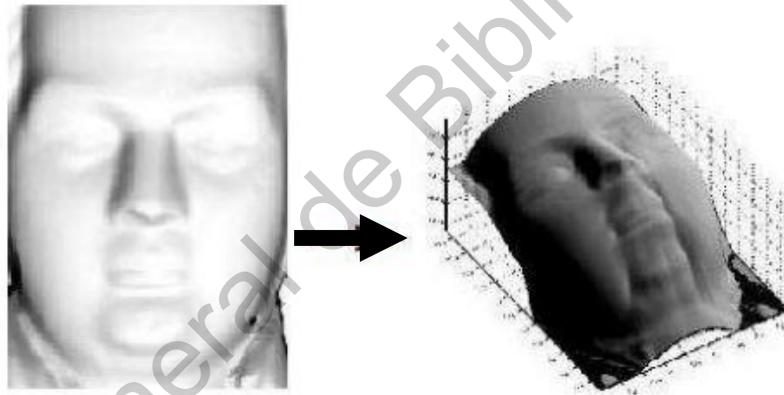


Fig.2. Imágenes tomadas del trabajo de Klette (1998) para mostrar cómo es que funciona la reconstrucción por medio de sombras. En estos métodos se determina la profundidad de un punto de acuerdo su valor de intensidad.

- **Reconstrucción por medio de siluetas (*shape from silhouette*):** Esta perspectiva consiste en generar un modelo 3D de un objeto usando un conjunto de imágenes del mismo, donde estas fueron tomadas desde diferentes puntos pero siempre manteniendo la distancia y orientación hacia el objeto (Aganj, 2007), como se ve en la Figura 5. Después, se extraen los bordes del objeto en cada imagen, para finalmente generar una nube de puntos 3D usando los bordes. La ventaja y desventaja de las técnicas basadas en este enfoque es que la exactitud del modelo 3D generado dependerá del número de imágenes con el que se trabaje. Es decir, cuando se tengan poca imágenes el modelo 3D resultante carecerá de detalle y tendrá poca similitud al objetivo. Mientras que cuando se cuente con varias imágenes se podrán obtener más puntos, esto quiere decir que el modelo 3D tendrá mayor exactitud con respecto al objetivo.

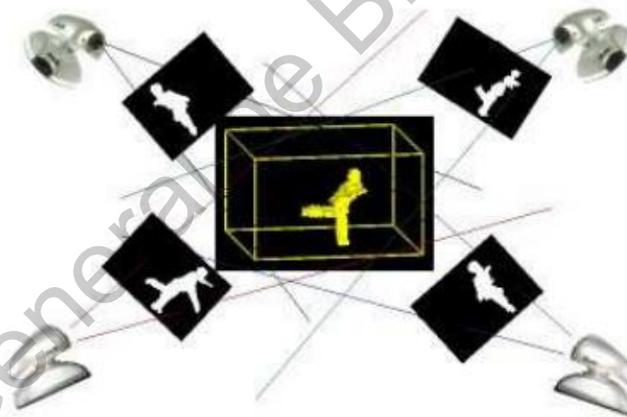


Fig.3. Imágenes tomadas el trabajo de Aganj (2007) para mostrar cómo funciona la reconstrucción por medio de siluetas. A partir de un conjunto de imágenes tomadas de diferentes perspectivas se crea un modelo 3D de un objeto.

- **Reconstrucción por medio de enfoque (*shape from focus*):** consiste en determinar el nivel de profundidad de cada punto de una escena tomando como entrada un conjunto de imágenes que han sido tomadas desde la misma posición, pero variando los parámetros de enfoque de la cámara (Nayar, 1994), como se ve en la Figura 6. La exactitud del mapa de profundidad depende del número de imágenes usadas para calcularlo, es decir, mientras más imágenes se usen mayor será la exactitud del mapa de profundidad.

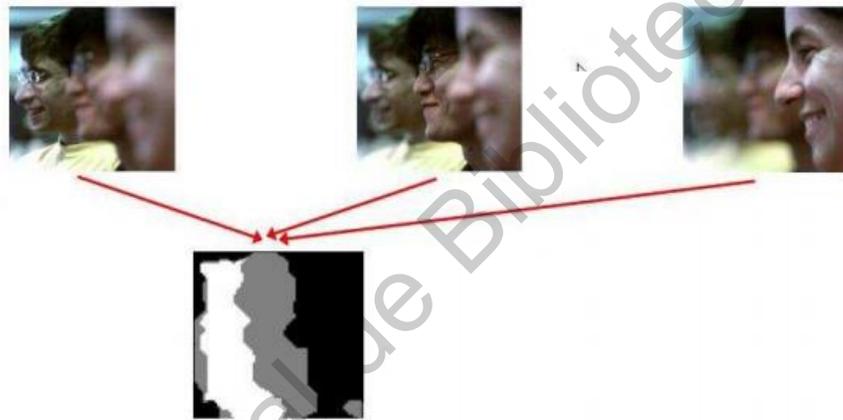


Fig.4. Reconstrucción por medio de enfoque. Imágenes tomadas del trabajo de Nayar (1994) en el cual propone que definir la profundidad de una escena de acuerdo al grado de desenfoco que se muestra en un conjunto de imágenes capturadas con diferente enfoque.

Varias de las técnicas propuestas basadas en estas perspectivas muestran resultados buenos, pero en la práctica son muy poco usadas debido a que, en la mayoría de los casos, requieren de supervisión e interacción del usuario con el sistema. Por esto el enfoque más común para aplicaciones reales es el de reconstrucción por medio de imágenes en base a la proyección de figuras geométricas en blanco y negro o a color, con desfase entre ellas para crear una perfilometría del objeto y así crear la reconstrucción.[12]

## 2.2 MARCO TEÓRICO

### 2.2.1 Reconstrucción tridimensional

La reconstrucción tridimensional es el proceso por el cual se obtiene la representación de objetos reales a partir de la toma de entradas de una o varias vistas en 2-D, reproduciéndolas en la memoria de un computador y manteniendo sus características físicas (dimensiones, volumen y forma).

Por lo tanto, cabe mencionar que si se tiene un conjunto de imágenes, con diferentes vistas de un mismo entorno, es muy probable que exista una relación entre ellas. Esta relación está dada por una geometría implícita en el conjunto de imágenes. Gracias a esta geometría es posible obtener la reconstrucción tridimensional del entorno captado por el conjunto de imágenes.

Determinar la forma 3D de un objeto a partir de un conjunto de imágenes bidimensionales ha sido un gran reto en el área de visión por computadora por varios años. Una de las razones de esto es que aún no se logra explicar con claridad la manera en que los seres humanos pueden percibir la profundidad en una escena. Por lo que se han propuesto y utilizado varias técnicas tomando distintos puntos de vista, con el fin de encontrar un algoritmo capaz de realizar este proceso de manera que los resultados sean buenos, principalmente en términos de tiempo y de exactitud con respecto al objetivo.

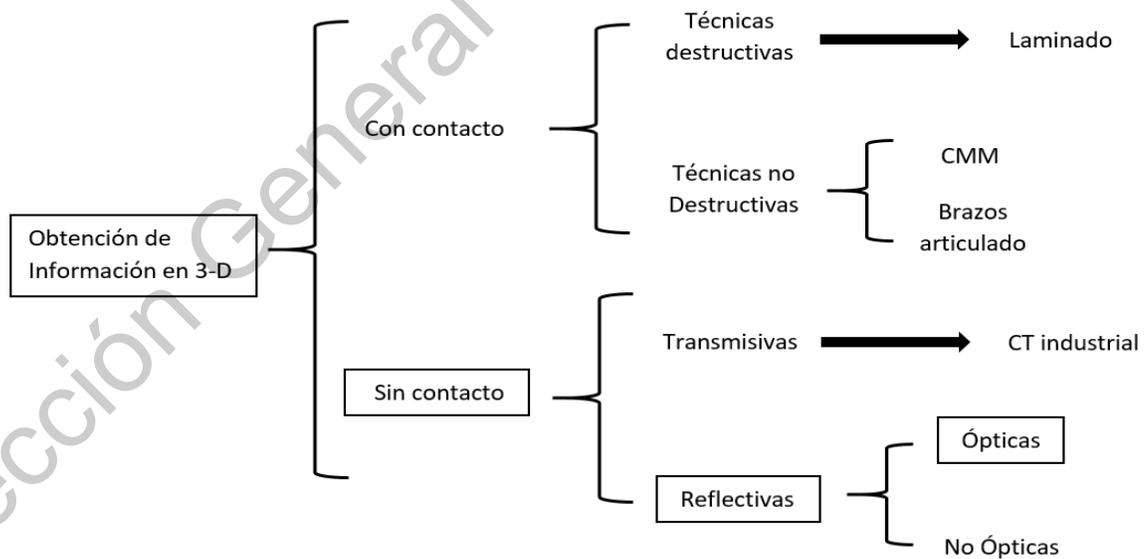
La mayoría de las técnicas utilizan una serie de máscaras en escala de grises, las cuales estiman la distancia que hay entre un punto del mundo real y la cámara con que es tomada la imagen, de esta forma se puede estimar una coordenada 3-D para cada punto bidimensional. Hay muchas condiciones a tomar en cuenta para realizar los cálculos de las distancias y la obtención de los datos, como posición de la cámara y fuentes de luz, características físicas del objeto, entre muchos otros.

Existen diversas técnicas de reconstrucción en tercera dimensión, las cuales pueden ser sin contacto o con contacto, cuyo objetivo principal de cualquier técnica que este dentro

de esos dos métodos es obtener un algoritmo que sea capaz de realizar la obtención del conjunto de características representativas del objeto y reconstruirlas tridimensionalmente.

El método por contacto cómo lo indica su nombre requiere el roce con la superficie del objeto a reconstruir, la resolución del objeto está directamente relacionada con la cantidad y claridad de franjas proyectadas; una de las mayores desventajas de usar el método por contacto es la falta de precisión en objetos blandos o deformables. Sin embargo, en esta ocasión, para el presente trabajo, se realizaron pruebas a través de método sin contacto, en el cual se implementan técnicas que no requieren el contacto con alguna de sus partes, se subdivide en técnicas transmisivas y reflectivas; las transmisivas irradian al objeto con alguna clase de radiación y las reflectivas reflejan ondas de luz o sonido aplicadas al objeto (Tadeo, 2008).

En la Figura 1 puede observarse una taxonomía de las técnicas de adquisición de información tridimensional. Se muestran los métodos disponibles basados en las dos técnicas antes mencionadas, mostrando de igual manera cuál de ellas es la utilizada en esta investigación:



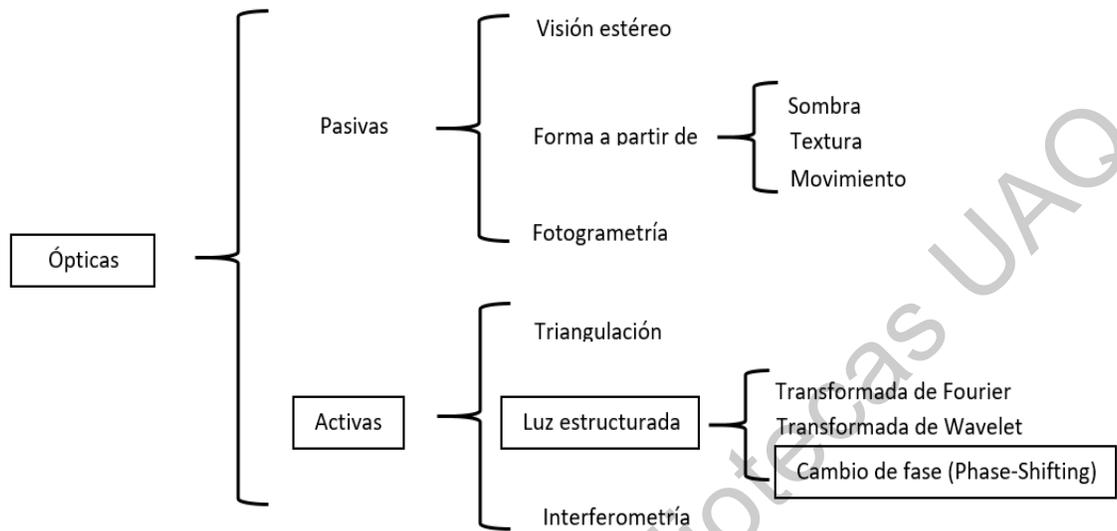


Fig.5. Técnicas de adquisición 3-D (Molleda Meré, 2008).

Dentro de las diversas técnicas ópticas el presente trabajo se encuentra en técnicas activas (aquellas en las cuales se regula la fuente de iluminación) específicamente luz estructurada, como lo es la proyección de franjas. En la Figura 2 pueden observarse las distintas técnicas ópticas y su subdivisión.

El análisis de franjas es un grupo de técnicas de luz estructurada que utiliza patrones sinusoidales (también conocidos como patrones de franjas). Estos patrones tienen intensidades que varían continuamente punto a punto de una manera conocida, lo que permite obtener información píxel a píxel.

Jun-ichi Kato (2009) menciona que el análisis de franjas es el proceso de extraer los valores cuantitativos de patrones para propósitos metrológicos y así poder obtener información sobre el objeto analizado.

### 2.2.2 Análisis de proyección de franjas

Los algoritmos existentes que se han puesto a prueba para la reconstrucción de objetos en tercera dimensión son métodos que funcionan con múltiples máscaras de proyección en escala de grises o algoritmos de una sola máscara con representaciones de rojo, verde y azul (RGB). La serie de algoritmos antes mencionados se regulan a través de una fuente de alimentación con luz estructurada. Este análisis de franjas es un grupo especial que utiliza distintos patrones de ondas sinusoidales, estos patrones tienen intensidades que varían continuamente punto a punto de una manera conocida, lo que le permite obtener la información entre pixel y pixel y así obtener la información metrológica del objeto el cual se desea reconstruir en tercera dimensión.

Es por ello, que si se tiene un conjunto de imágenes, con diferentes vistas de un mismo entorno, es muy probable que exista una relación entre ellas. Esta relación está dada por una geometría implícita en el conjunto de imágenes. Gracias a esta geometría es posible obtener la reconstrucción tridimensional del entorno captado por el conjunto de imágenes, por lo tanto, se puede definir que el análisis de franjas es el proceso de extraer los valores cuantitativos de patrones para propósitos metrológicos.

Para el análisis de información y reconstrucción de objetos a través de reflexión con franjas, se proyectan los patrones definidos a un objeto, a partir de ahí, el objeto crea una especie de distorsiones en el patrón de acuerdo a su superficie. Las distorsiones posteriormente son capturadas por una cámara digital desde otro ángulo dependiendo el tamaño del objeto y al final se procesa la imagen captada con alguna técnica de distorsión, en este caso, el algoritmo con el que se trabaja es el de cambio de fase (Phase-shifting) con una sola máscara en RGB.

AÑO	TÍTULO	AUTORES	PUBLICACIÓN	RESUMEN
2012	Fringe projection profilometry based on complementary color-encoded fringe patterns	Feipeng Da , LuyangWan,LuyaoHu	Optics & Laser Technology 44 (2012) 2332–2339	Propuesta de un método nuevo basado en proyecciones de franjas codificadas en color complementarios.
2013	Color-coding and phase-shift method for absolute phase measurement	Xiangcheng Chen, Chao Lu, Mengchao Maa.	Optics Communications 298–299 (2013) 54–58	Se propone de un nuevo método de codificación de color para la medición de fase absoluta. A tres pasos.
2014	Composited color-coded sinusoidal fringe pattern for absolute phase measurement	Shiwei Li	Optik 126 (2015) 3558–3561	Propuesta de un nuevo patrón de franjas sinusoidales codificadas por colores para la medición de fase absoluta.
2015	Neural network based color decoupling technique for	Li Rao,Feipeng Daa	Optics & Laser Technology 70 (2015) 17–25	Se propuso un enfoque de patrón de franjas de color para superar las limitaciones del

	color fringe profilometry			cambio de fase secuencial  perfilometría marginal para mediciones dinámica
2016	Applying innovative stripes adaptive detection to three-dimensional measurement of color fringe profilometry	Chung-Feng Jeffrey Kuo, Alvin Chang, Ping-Chen Joseph Kuo.	Optics Communications 381 (2016) 116–126	Se propone un algoritmo de desacoplamiento de color basado en redes neuronales para mejorar el rendimiento del color sistema de proyección de franjas
2017	Color-fringe pattern profilometry using an efficient iterative algorithm	Jorge L. Flores, Antonio Muñoz, Sotero Ordoñesa.	Optics Communications 391 (2017) 88–93	Desarrollaron un sistema de medición de software y hardware en 3D, y proponen un innovador algoritmo de detección adaptativa de franjas

Tabla 1. Estudio del arte de reconstrucción de objetos en 3D.

## CAPITULO 3

---

### METODOLOGÍA

Si se tiene un conjunto de imágenes, con diferentes vistas de un mismo entorno, es muy probable que exista una relación entre ellas. Esta relación está dada por una geometría implícita en el conjunto de imágenes. Gracias a esta geometría es posible obtener la reconstrucción tridimensional del entorno captado por el conjunto de imágenes.

Este capítulo está destinado a definir los conceptos básicos del área de Visión por Computadora. En principio se habla de estos mismos, así como de la geométrica proyectada enfocada a la reconstrucción del objeto. Asimismo, se exponen los pasos requeridos para obtener la reconstrucción del objeto, al igual que las distintas fórmulas matemáticas para lograr con éxito los pasos mencionados.

Las técnicas de reconstrucción en tercera dimensión por medio de proyección de figuras geométricas, en este caso, franjas en RGB, se encuentra dentro de la clasificación de técnicas ópticas reflectivas, en este caso en la parte activa, englobado en la parte de luz estructurada. Las técnicas activas usan las imágenes del mismo objeto variando la cantidad, intensidad o color de las fuentes de luz, así como la orientación del objeto, con el fin de mejorar la calidad de las imágenes para mejorar el cálculo de la profundidad de cada punto de la imagen con respecto a la cámara.

Estas técnicas resultan muy útiles cuando se tratan de reconstruir objetos con una superficie compleja. Estas no requieren de mucha interacción del usuario con el sistema. Cada una de las técnicas de reconstrucción 3-D basadas en proyección tienen sus propias formas para realizar este proceso, pero todas, de una u otra forma, realizan los siguientes pasos:

- **Adquisición de imágenes:** este proceso se puede ver afectado por diversos tipos de perturbaciones del ambiente o de los mismos sensores de la cámara. Las características del proceso de captura de imágenes dependen de la técnica a usar, además de la geometría usada para la captura de las imágenes.
- **Calibración de la cámara:** aquí se determinan los parámetros extrínsecos (que permiten mapear las coordenadas de los puntos del sistema de coordenadas del mundo real al sistema de coordenadas de la cámara) e intrínsecos (valores para mapear los puntos del sistema de coordenadas de la cámara al plano de la imagen) de la cámara. Para más detalles leer Tsai (1986).
- **Extracción de características:** si el proceso lo requiere, las imágenes resultantes de la captura del objeto pueden ser pre-procesadas con el fin de extraer ciertas características necesarias para este, o para que dé como resultado una mejor reconstrucción.
- **Análisis de correspondencia:** determinar la correspondencia entre las franjas proyectadas al objeto. En la mayoría de los casos, los parámetros de calibración de la cámara son conocidos con anticipación, ya que se pueden obtener directamente de las cámaras. Por esto, el principal reto de la reconstrucción 3-D con objetos, es la parte del análisis de este. Ya que, dependiendo del éxito adquirido, se procesa para obtener un mejor resultado.

Para la experimentación y reconstrucción con franjas, en primera instancia se proyectan los patrones definidos a un objeto, a partir de ahí, el objeto crea una especie de distorsiones en el patrón de acuerdo a su superficie, las distorsiones posteriormente son capturadas por una cámara digital desde otro ángulo y al final se procesa la imagen captada con alguna técnica de distorsión, en este caso, el algoritmo con el que se trabaja es el de cambio de fase (Phase-shifting) con una sola máscara en RGB.

Existen una serie de pasos para el logro de la reconstrucción en tercera dimensión del objeto, por lo tanto es muy importante el conocer esta serie de métodos, principalmente orientados al área de visión por computadora, apoyándose de igual manera en técnicas que pertenecen a otras áreas tales como: procesamiento digital de imágenes y graficación.

De tal forma que todo el proceso de recreación se puede dividir en tres bloques principales y dentro de ellas se visualiza el trabajo que se realiza en cada sección:

A continuación se explican las etapas anteriormente mencionadas, las cuales son la estructura esencial para lograr la reconstrucción tridimensional del objeto:

### **3.1.- ADQUISICIÓN DE IMAGENES**

- CALIBRAR SISTEMA DE CAPTURA
- ESTIMAR PARÁMETROS DE ORIENTACIÓN Y POSICIÓN DEL SISTEMA DE CAPTURA
- TRIANGULAR SISTEMA DE PROYECCIÓN Y CAPTURA

### **3.2.- PRE-PROCESAMIENTO**

- GENERAR MALLA DE RECONSTRUCCIÓN
- CAPTURA Y CENTRADO DE IMÁGEN
- MAPA DE FASE

### **3.3.- POST-PROCESAMIENTO Y VISUALIZACIÓN**

- POST-PROCESAMIENTO PARA MEJORA DE RECONSTRUCCIÓN
- VISUALIZAR RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL

Tabla 2. Etapas para lograr la reconstrucción en tercera dimensión de un objeto.

### 3.1 Adquisición de imágenes

La adquisición de imágenes es la primera etapa del proceso, dentro de ella se derivan otras series de pasos los cuales se encargan de calibrar el sistema de captura y proyección, estimando los parámetros de orientación y posición, creando una triangulación con medidas lineales y angulares entre la cámara, el proyector y el objeto. De tal manera que, las medidas se determinan conforme a las dimensiones del objeto que se desea reconstruir.

En este caso, el sistema de captura de imágenes, proyección de patrón de franjas y procesamiento de datos e información que se utilizaron son los siguientes:

- 1) Sistema de captura de imágenes:



Fig.6. Sistema de captura de imágenes.

- Cámara marca Logitech.
- Resolución máx.: 1080p/30 fps – 720p/30 fps.
- Tipo de enfoque: automático / anulado.
- Bajo costo monetario.
- Conexión de tipo USB.
- Resolución de Alta definición.

2) Sistema para proyección de patrón de franjas:

- Proyector marca ACER.
- Modelo K132.
- Resolución de 1280 X 800 pixeles de alta definición.
- Brillo de 500 Lúmenes.
- Lámpara tipo LED.
- Bajo costo monetario.



Fig.7. Sistema de proyección de franjas.

3) Sistema para procesamiento de datos e información:

- Laptop HP-Pavilion cc183cl.
- Procesador AMD A-12 RADEON R7.
- Memoria RAM de 12.0 GB.
- Sistema operativo de 64 bits.
- Memoria de almacenamiento de 1 TB.



Fig.8. Sistema de procesamiento para reconstrucción de objetos.

Se posiciona el sistema de proyección de franjas, captura de imagen del objeto y adquisición de datos para su post procesamiento, triangulados de acuerdo al tamaño del objeto que se desea reconstruir, dando como resultado el siguiente esquema:

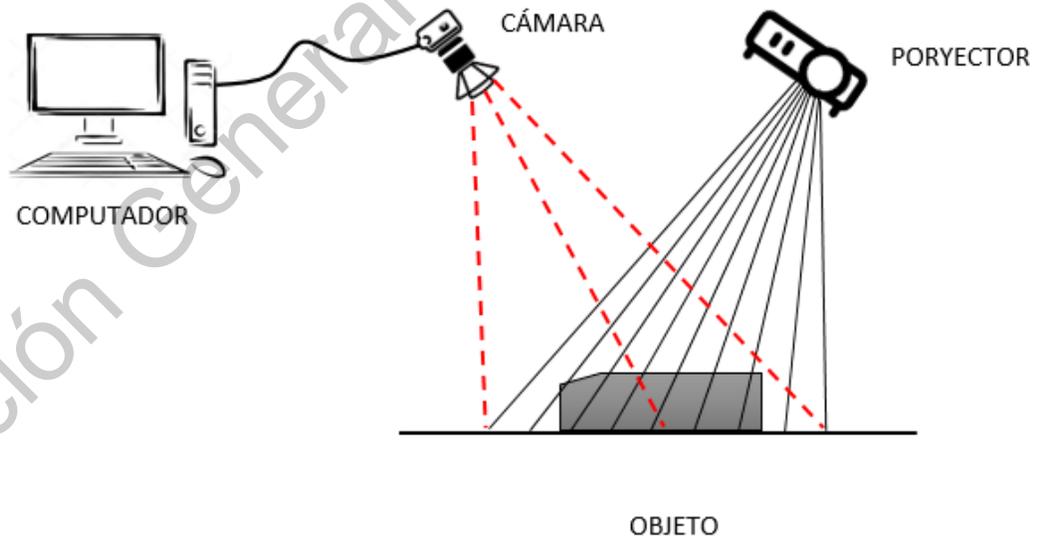


Fig.9. Esquema de triangulación de objetos del sistema de reconstrucción.

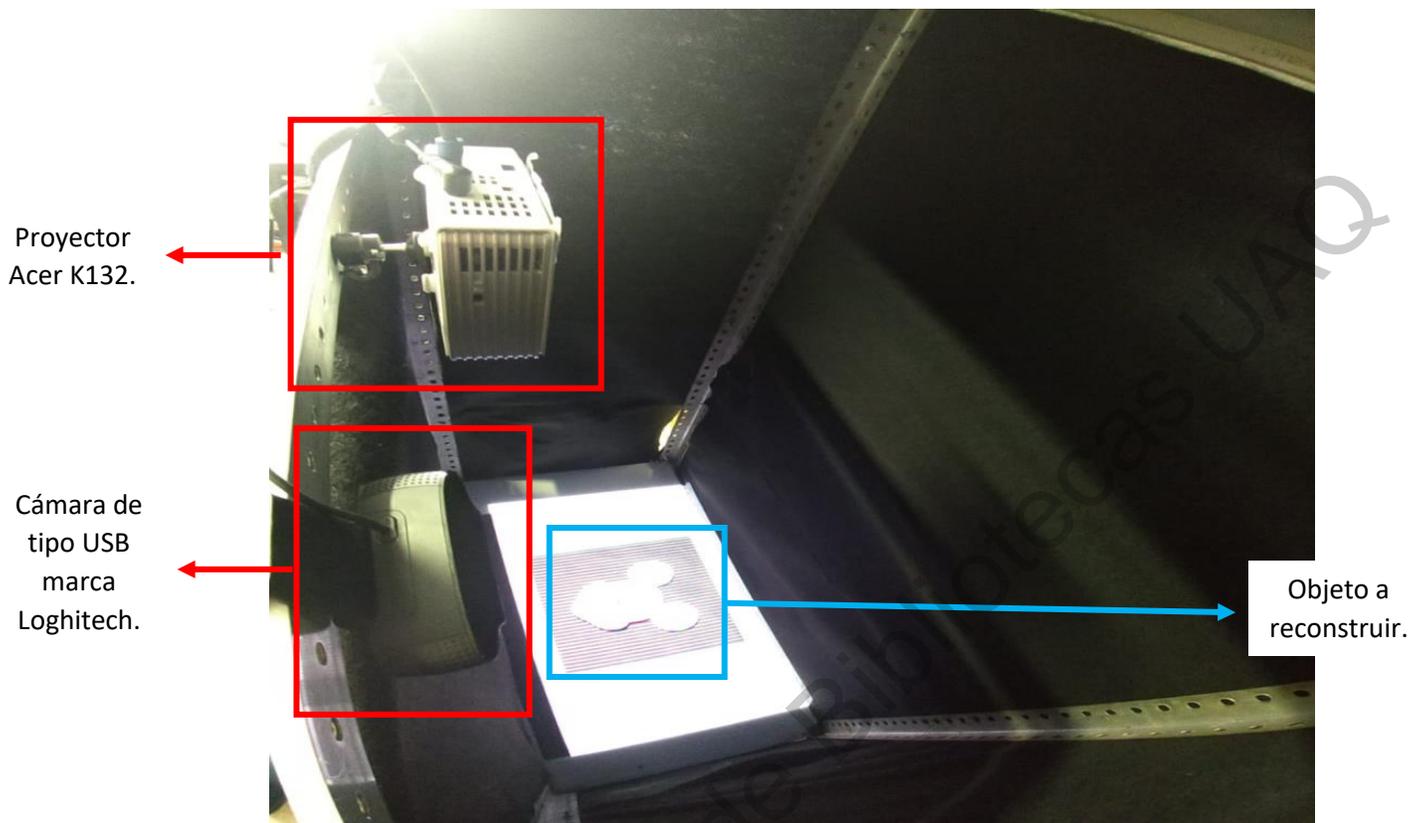


Fig.10. Sistema en físico de triangulación para la reconstrucción de objetos.

Para definir el ángulo adecuado en el cual estarán triangulados el sistema de captura y el de proyección conforme al objeto, se calculan los lados y los ángulos de un triángulo rectángulo, suponiendo que ciertos datos del triángulo son conocidos.

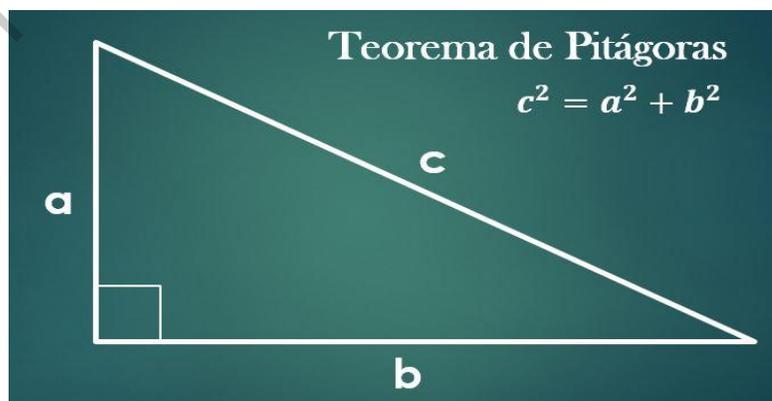


Fig.11. Triángulo esquemático del teorema de Pitágoras.

Los elementos que se utilizan son:

– El teorema de Pitágoras

Dado un triángulo rectángulo con catetos «a», «b» e hipotenusa «c», se cumple que « $c^2=a^2+b^2$ ».

– Ángulos de un triángulo

La suma de los tres ángulos internos de un triángulo es  $180^\circ$ .

– Las funciones trigonométricas:

Considérese un triángulo rectángulo. Entonces, se definen las funciones trigonométricas seno, coseno y tangente del ángulo beta ( $\beta$ ) como sigue:

$\text{sen}(\beta) = \text{CO}/\text{Hip}$ ,  $\text{cos}(\beta) = \text{CA}/\text{Hip}$  y  $\text{tan}(\beta) = \text{CO}/\text{CA}$ .

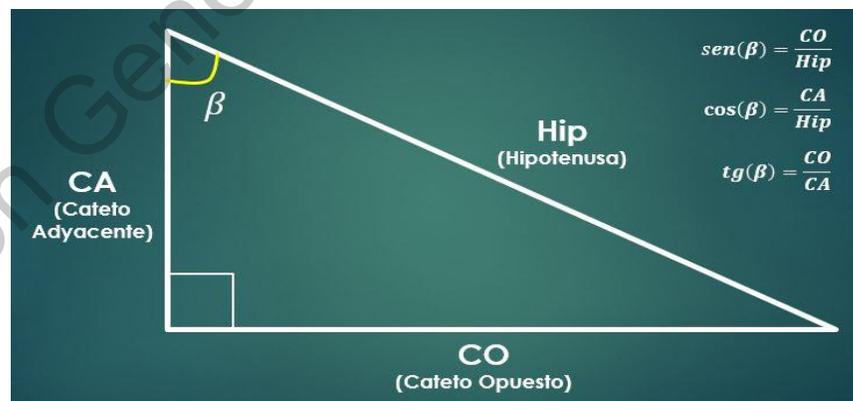


Fig.12.Triángulo esquemático del teorema de Pitágoras.

¿Cómo calcular los lados y los ángulos de un triángulo rectángulo?

Dado un triángulo rectángulo ABC, se pueden presentar las siguientes situaciones:

1- Son conocidos los dos catetos

Si el cateto «a» mide 23 cm y el cateto «b» mide 136 cm, entonces para calcular el valor de «c» se utiliza el teorema de Pitágoras. Al sustituir los valores de «a» y «b» se obtiene que  $c^2=19025 \text{ cm}^2$ , lo cual implica que  $c=137.93 \text{ cm}$ .

Ahora, si el ángulo  $\beta$  es opuesto al cateto «b», entonces  $\text{sen}(\beta)=136/137.93$ . Al aplicar la función inversa del seno, en esta última igualdad se obtiene que  $\beta=80.40^\circ$ . Ya son conocidos dos ángulos internos del triángulo.

Sea  $\theta$  el ángulo que falta por conocer, entonces  $90^\circ+53,13^\circ+\theta=180^\circ$ , de donde se obtiene que la triangulación entre el sistema y el objeto es de  $\theta=9,68^\circ$ .

### 3.2 Pre-procesamiento

Se genera una malla de reconstrucción de acuerdo al método que se utiliza, dicha malla proyectada genera información mediante el uso de varios principios de luz estructurada proyectada al objeto, en conjunto con un algoritmo, en este caso el de cambio de fase, se reconstruye la información de la topografía del objeto a partir de la deformación de un sistema periódico de franjas que son proyectadas sobre él.

Las franjas de tipo sinusoidal, se proyectan mediante una sola imagen de una máscara en RGB, el cual consiste en extraer la forma de la superficie 3D del objeto conforme a la información de la distorsión del patrón de luz proyectado al objeto (imagen de fase).

La máscara experimental que se utilizará para la implementación del algoritmo de tipo “RGB”, la cual ya se ha utilizado en investigaciones anteriores, a diferencia de los estudios realizados anteriormente. Lo que se pretende lograr es mejorar el algoritmo de tal manera que al momento de procesar la máscara de franjas de color en el sistema, lo procese

con una mayor calidad de coloración y nitidez, así como menor tiempo de procesamiento de datos, dando como resultado una mejor obtención de información del objeto que se desea reconstruir, obteniendo así una disminución significativa de errores en el análisis del objeto.

La reconstrucción de objetos en tercera dimensión es el proceso mediante el cual objetos reales son reproducidos en la memoria de un computador, manteniendo sus características físicas. Existen diversas técnicas de reconstrucción y métodos de malla 3-D, cuyo objetivo principal es obtener un algoritmo que sea capaz de realizar la conexión del conjunto de puntos representativos del objeto en forma de elementos de superficie, ya sean triángulos, cuadrados o cualquier otra forma geométrica.

Los algoritmos existentes que se han puesto a prueba para la reconstrucción de objetos en tercera dimensión son métodos que funcionan con múltiples máscaras de proyección en escala de grises o algoritmos de una sola máscara con representaciones de rojo, verde y azul (RGB). La serie de algoritmos antes mencionados presentan un déficit en la información obtenida y un porcentaje de ruido significativo al momento de la reconstrucción, de igual manera, un gasto de procesamiento computacional bastante alto en el caso de los algoritmos que utilizan múltiples máscaras para la reconstrucción, esto se debe a que el sistema necesita más memoria para el procesamiento y análisis de las múltiples capas de proyección.

El algoritmo que se utiliza para la investigación del proyecto es llamado algoritmo de cambio de fase (phase-shifting), el cual consiste en extraer la forma de la superficie 3-D basados en la información de la distorsión del patrón de luz proyectado al objeto (imagen de fase), dicha información puede ser calculada mediante el uso de varios principios de la luz estructurada y la implementación de un algoritmo en este trabajo para su desenvolvimiento, en dicha técnica se reconstruye la información de la topografía de un objeto a partir de la deformación de un sistema periódico de franjas que son proyectadas sobre él.

Para la aplicación de los pasos en la reconstrucción tridimensional, en este caso se implementa el algoritmo de cambio de fase con una sola máscara de RGB, la cual se compone de los tres canales (Rojo, Verde y azul). La diferencia de fase entre los canales es  $120^\circ$ . La franja es simulada por computadora, como se muestra en la Fig. 5. La franja sinusoidal de

color se proyecta en la referencia, y se captura la imagen a través de una cámara digital. El método de cambio de fase de tres pasos se usa para obtener la fase. Los canales Rojo, Verde y Azul están separados, la intensidad de cada píxel en los tres canales es la siguiente:

$$I_R(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) - \frac{2\pi}{3}] \quad (1)$$

$$I_G(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (2)$$

La obtención física de la información se obtendrá por medio de una triangulación entre el proyector, el cual dispara la imagen de la máscara dada por los tres colores antes mencionados, la cámara, la cual será la que captará la máscara proyectada y el objeto de interés, y por último, el objeto el cual se desea obtener la información.

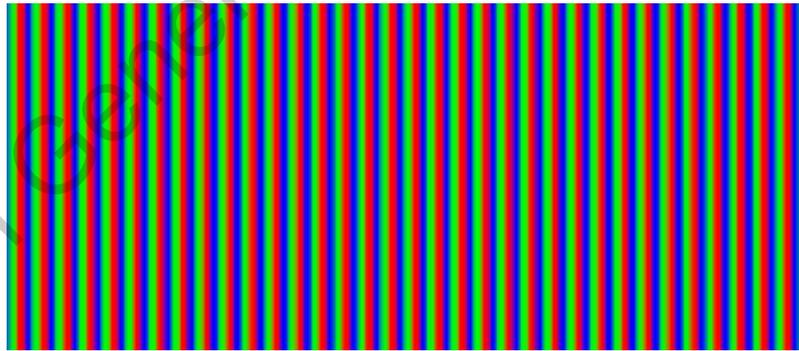


Fig. 13.-Franja sinusoidal de color (para la interpretación de las referencias de las franjas de color en RGB)

$$I_B(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos \left[ \phi(x, y) + \frac{2\pi}{3} \right] \quad (4)$$

Donde  $I_R(x, y)$ ,  $I_G(x, y)$ ,  $I_B(x, y)$ , son las intensidades de cada píxeles en los canales de rojo, verde y azul, respectivamente.  $I'(x, y)$ , es la modulación de intensidad y  $I''(x, y)$ , es el promedio de intensidad y  $I'''(x, y)$ , es la modulación de intensidad.  $\phi(x, y)$ , es la fase deseada relacionada con el perfil del objeto. Resolviendo Ecs. (2)-(4), el  $\phi(x, y)$ , se puede lograr mediante:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left( \sqrt{3} \frac{I_R - I_B}{2I_G - I_R - I_B} \right) \quad (5)$$

La función arco-tangente dará como resultado un valor en el rango de  $[-\pi \sim \pi]$  con  $2\pi$  discontinuado.

Principio de la franja de codificación de fase de color:

Es una fase de escalera  $\phi(x, y)$  que va desde  $-\pi$  a  $\pi$  se muestra en la Fig. 6. La fase está codificada en intensidad de tres canales, y la diferencia de fase entre dos canales es  $120^\circ$  como se muestra en la Fig. 6. La Fig. 7 muestra el proceso de composición de fleje de codificación de fase de color.

El procedimiento para resolver el orden marginal se puede resumir como sigue:

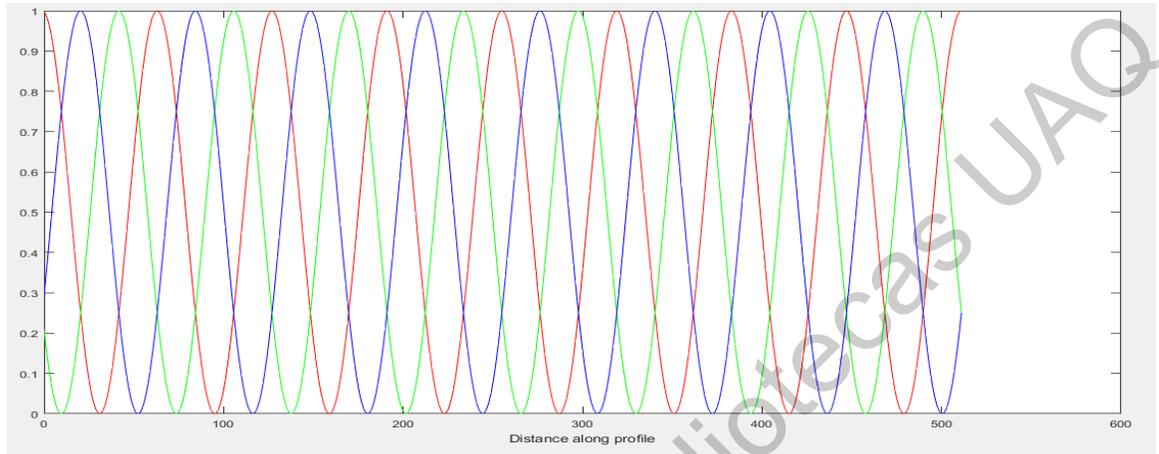


Fig.14. Gráfica de intensidad en los tres canales.

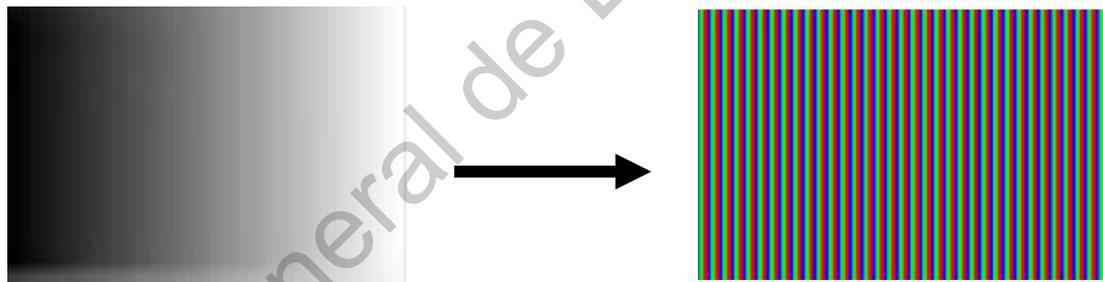


Fig.15. Proceso de composición de la franja de codificación de fase de color. (a) franja de codificación de fase en RGB (b) franja de codificación de fase de color.



Fig. 16. Color de la calibración. (a) Rojo puro, (b) verde puro, (c) azul puro y (d) blanco puro.

Paso 1: insertar la palabra en la fase con la función de la fase de escalera:

$$b(x, y) = -\pi + \left[ \frac{x}{p} \right] \cdot \frac{2\pi}{N} \quad (6)$$

Aquí  $(x, p)$  es el orden de la franja ideal obtenida por la operación de redondeo, “x” y “y” son el pixel horizontal y vertical del proyector, respectivamente.  $2\pi/N$  significa la altura de la escalera. N es el número total de los ciclos marginales. P es el tono marginal.

Paso 2: se codifica la fase de escalera  $b(x, y)$  en tres canales para formar la franja de codificación de fase de color:

$$I_{R'}(x, y) = \frac{255[1+\sin(b(x,y)-\frac{2\pi}{3})]}{2} \quad (7)$$

$$I_{G'}(x, y) = \frac{255[1+\sin(b(x,y))]}{2} \quad (8)$$

$$I_{B'}(x, y) = \frac{255[1+\sin(b(x,y)-\frac{2\pi}{3})]}{2} \quad (9)$$

Aquí  $(x, y)$ ,  $I_G(x, y)$ ,  $I_B(x, y)$  son las intensidades de cada píxel en el canales rojo, verde y azul, respectivamente.

Paso 3: Obtenga la fase de escalera de la franja de codificación de fase de color a través del método de cambio de fase de tres pasos.

Paso 4: Determine el orden marginal k de la fase de escalera.

### 3.3 Post-procesamiento y visualización

Se utilizan técnicas de procesamiento de imágenes enfocadas a la mejora del objeto tridimensional una vez obtenidas las características del objeto y los errores que se desean corregir, por último, se muestra el resultado de la imagen que contiene las 3 dimensiones.

La esquematización general de los procesos antes mencionados y su escalafon se muestran en las siguientes figuras:

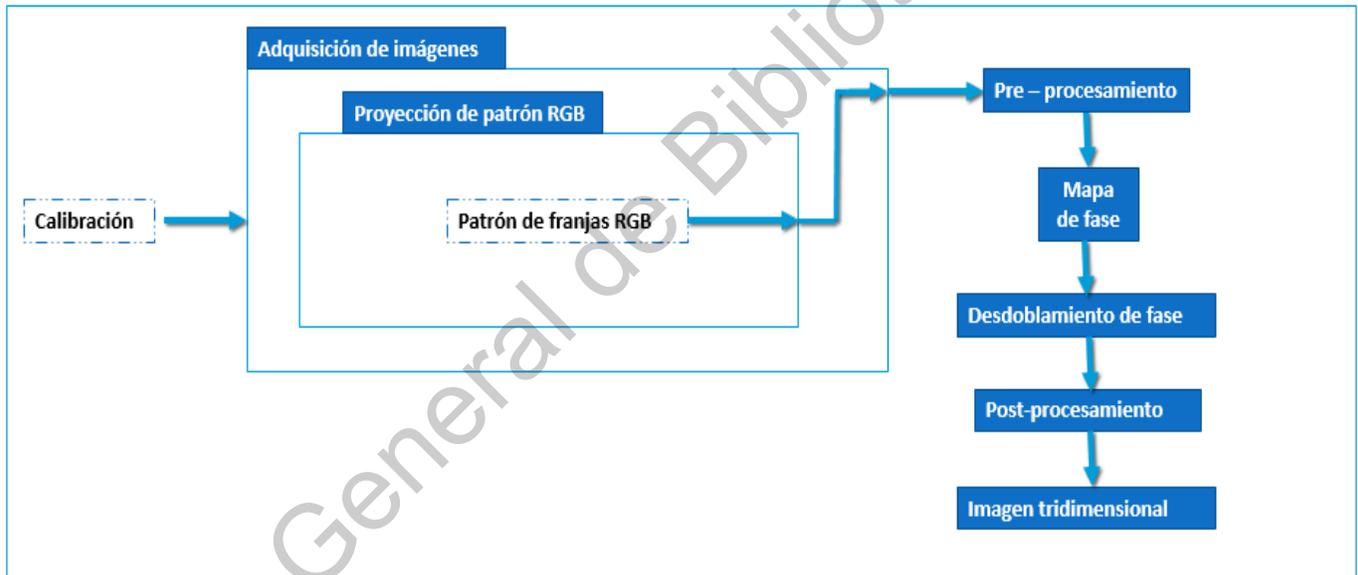


Fig.17. Esquematización general para procesos de reconstrucción de objetos.

### RESULTADOS

#### 4.1 PROYECCIÓN Y CORRECCIÓN DE IMÁGEN

Se requiere una serie de pasos para obtener resultados óptimos para la reconstrucción tridimensional del objeto.

En primer lugar, las franjas RGB se proyectan  $120^\circ$  grados fuera de fase respecto del objeto del que se desea obtener la información de su relieve (Fig.9), más tarde, después se aplica una transformada de perspectiva a la imagen tomada para eliminar el efecto cóncavo que produce la cámara, tomando cuatro pixeles, uno de cada esquina de la figura. Se toman muestras a través de la captura de múltiples imágenes con las tiras proyectadas, esto, con el propósito de elegir la mejor calidad y realizar las pruebas con dicha captura.

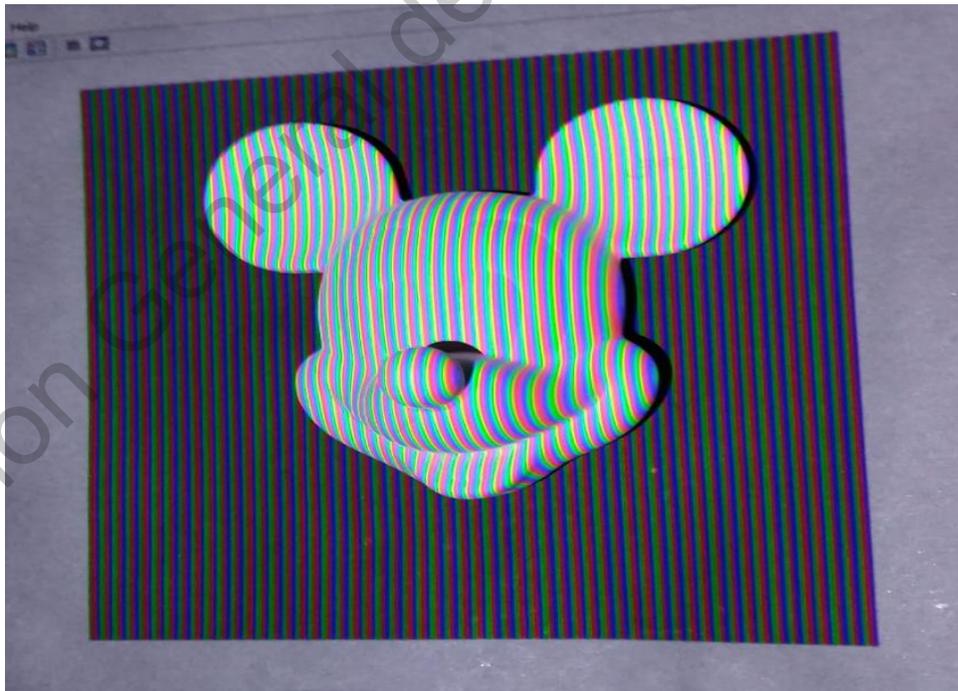


Fig.18. Objeto con proyección de franjas desfasadas sin aplicación de transformada de perspectiva.

Por lo tanto, de acuerdo a la transformada de perspectiva, el resultado nos da como la figura 10, una imagen sin efectos cóncavos, totalmente cuadrada.

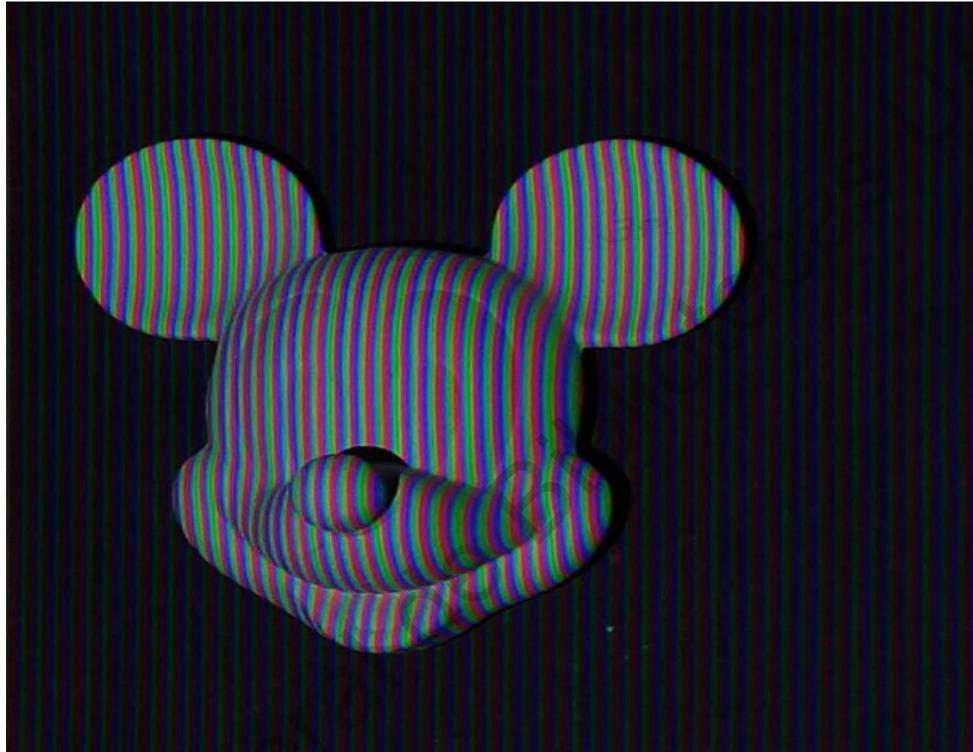


Fig.19. Objeto con proyección de franjas desfasadas con aplicación de transformada de perspectiva.

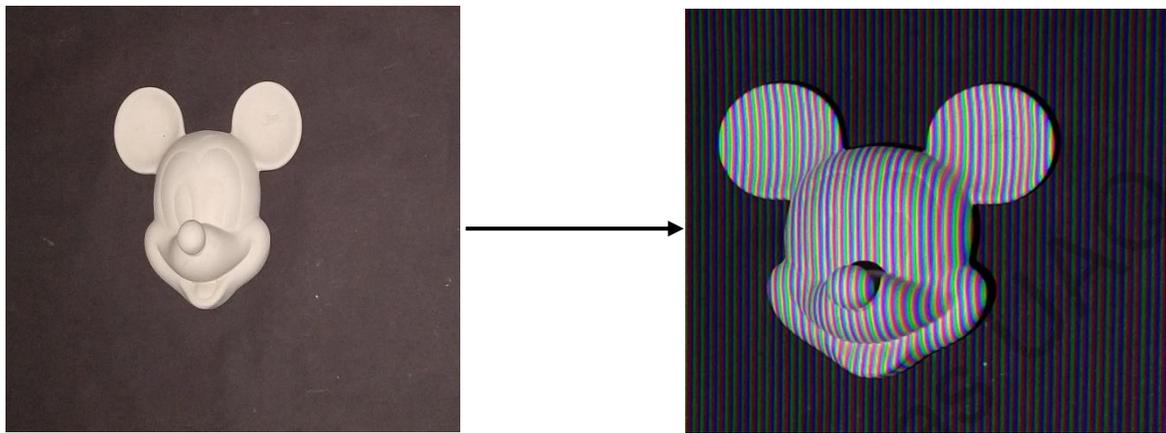


Fig. 20. Proyección de franjas a objeto (Mickey Mouse) que desea construir en tres dimensiones, del lado izquierdo la figura en su estado normal y del lado derecho la figura con franjas proyectadas y aplicada la transformada de perspectiva.

#### 4.2 SEPARACIÓN DE CANALES DE IMÁGEN CAPTURADA

Una vez que se proyectan las franjas RGB, se captura la imagen a reconstruir y se procesa de tal manera que los canales de color de la imagen se separan, lo que resulta en lo siguiente:



Fig. 21. Separación de canales de imagen capturada

La imagen separada en sus tres canales disponibles se utiliza para la creación del objeto en tercera dimensión, todo esto resulta en un objeto reconstruido sin ningún tipo de filtrado.

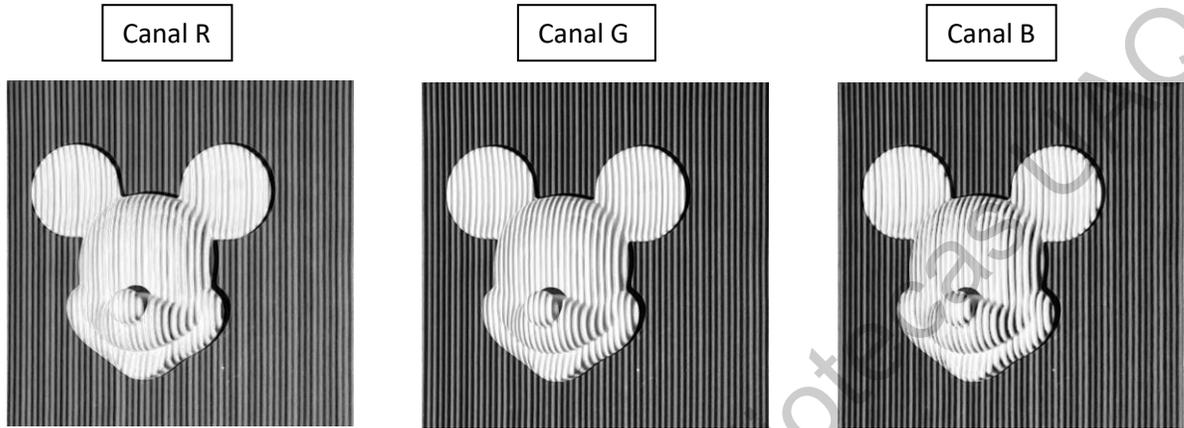


Fig. 22. Separación de canales de imagen capturada, dando como resultado los canales RGB en escala de grises.

#### 4.3 PROCESO DE RECONSTRUCCIÓN DEL OBJETO

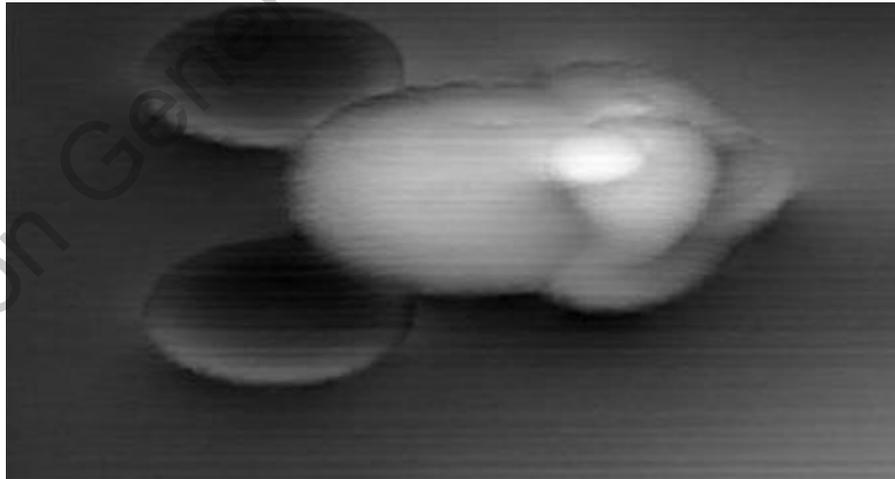


Fig.23. Imagen capturada convertida a escala de grises para su procesamiento.

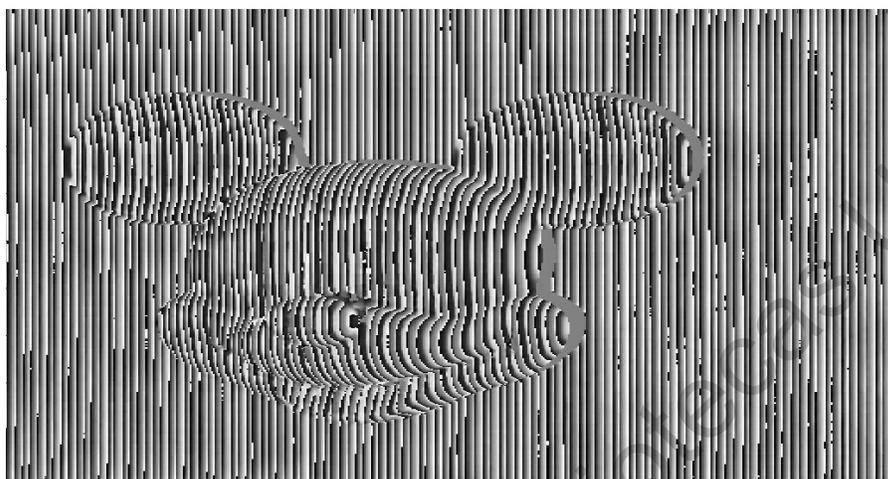


Fig.24. Mapa de fase del objeto a reconstruir.

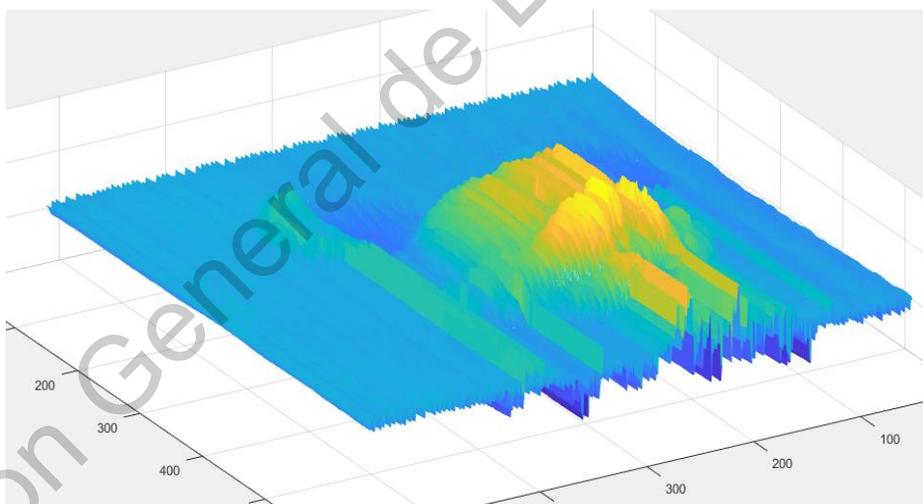


Fig.25.Resultado de objeto reconstruido con mapa de fase.

Los valores de fase envueltos contienen la información de la superficie del objeto, por lo tanto, es necesario utilizar algoritmos de desdoblamiento de fase para recuperar esa información, dando como resultado la reconstrucción del objeto en tercera dimensión.

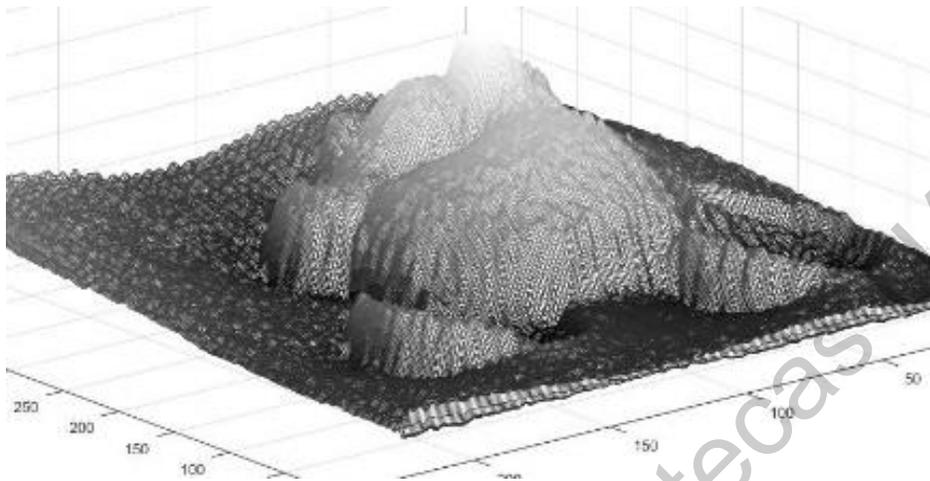


Fig.26.Reconstrucción tridimensional de objetos sin ningún filtrado previo.

Una vez que los resultados obtenidos de la reconstrucción del objeto han sido analizados, la superficie se detecta con un ruido abrupto. Se decide corregirlo mediante el análisis de su espectro, detectando ciertas anomalías en algunas regiones de la información que arroja su lectura, que procede a la aplicación de una máscara binaria para la eliminación del ruido en ciertas regiones del espectro, lo que resulta en una reconstrucción considerable con menos ruido.

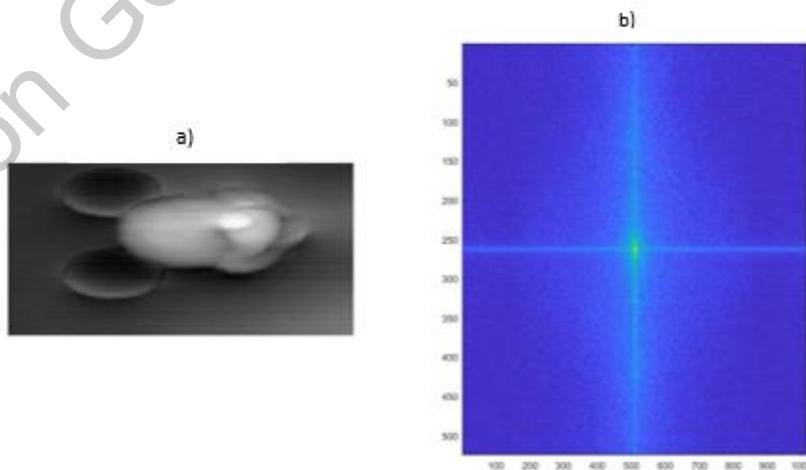


Fig.27. a) Objeto capturado convertido a escala de grises y b) espectro de imagen del objeto.

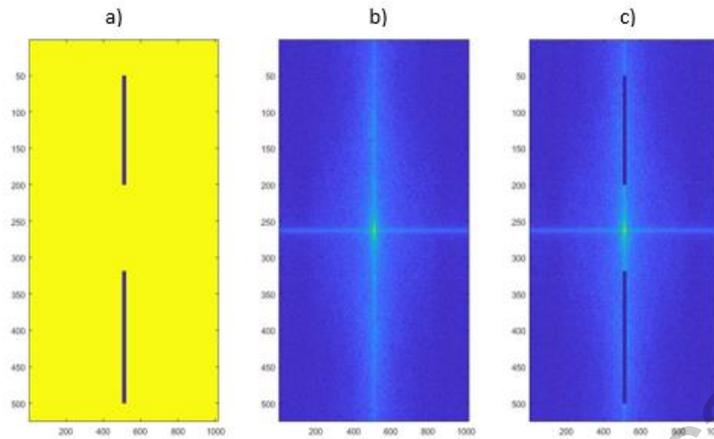


Fig.28 a) Máscara creada a partir de ceros y unos para la aplicación en el espectro b) espectro al que se aplica la máscara c) espectro con máscara de ceros y unos aplicados.



Fig.29. Imagen del objeto filtrado con máscara de ceros y unos.

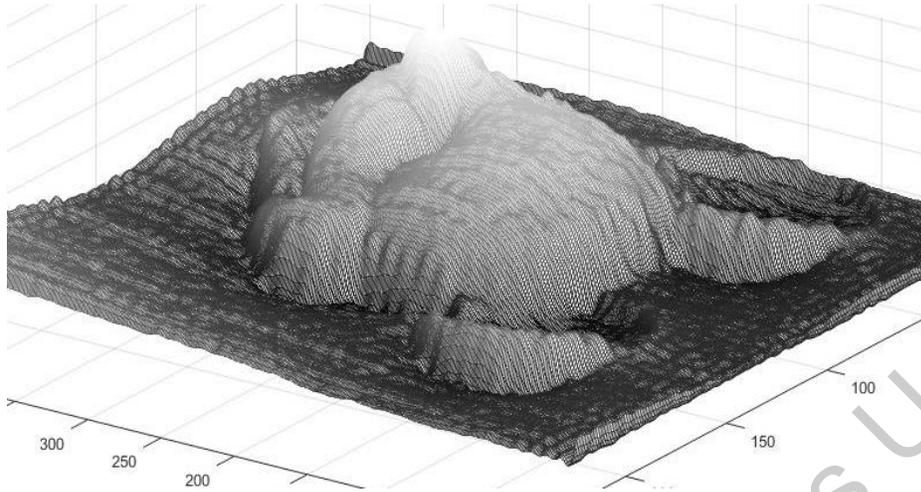


Fig.30. Resultado en tercera dimensión del objeto reconstruido y filtrado con una máscara de unos y ceros.

Al observar el resultado que dio la aplicación de la máscara binaria a la imagen original del objeto, se notó que la reducción del ruido en la superficie era muy pequeña, por lo que se procedió a la aplicación de un segundo filtrado de manera general (en toda la imagen), trabajando en esta ocasión con un filtro de Fourier con una máscara binaria de unos y ceros, lo que resulta en una imagen corregida en gran parte sin tanta pérdida general de información, obteniendo un resultado óptimo.

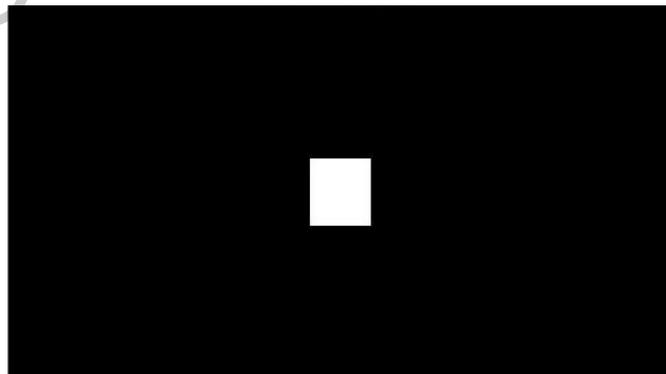


Fig. 31 Mascara binaria para filtro de Fourier

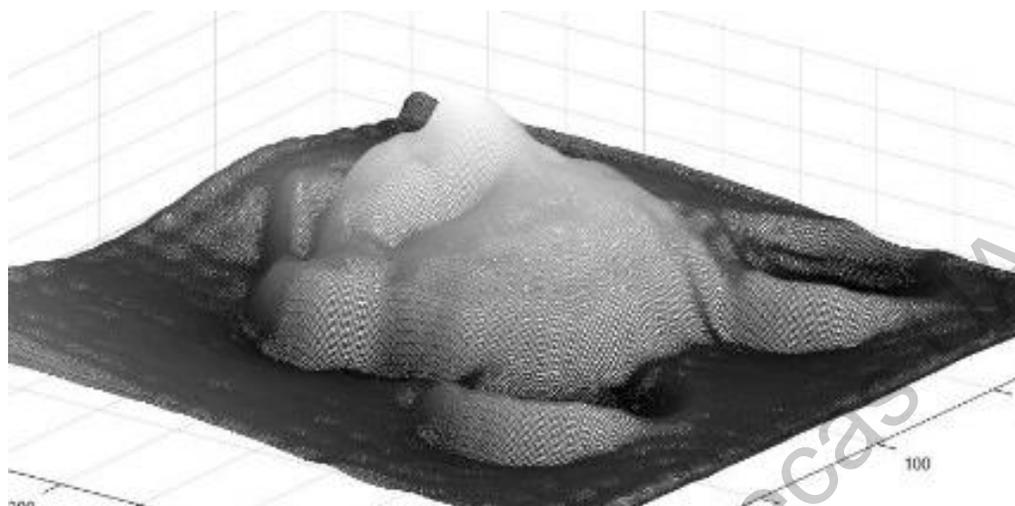


Fig.32 Resultado de la aplicación de máscara binaria con filtrado de Fourier.

Una vez obtenido el resultado de la reconstrucción del objeto (figura de cerámica con rostro de personaje) se analizó y se dedujo que es una reconstrucción aceptable, ya que se comparó con diferentes objetos a los cuales se les aplicó la misma serie de pasos, dando como resultado la siguiente base de datos y los siguientes objetos reconstruidos en tercera dimensión.

## CAPITULO 5

---

### CONCLUSIONES

Se experimentó con múltiples objetos de diferentes formas y superficies, al igual que del material por el cual están compuestos. Siguiendo los mismo pasos para cada uno de ellos, se tomaron capturas desde diferentes ángulos dependiendo su profundidad, por lo tanto, se determinó que se puede lograr la obtención de la topografía en formas simples, manteniendo con éxito sus características físicas (dimensiones, volumen y forma), con una sola imagen proyectada de franjas desfasadas de  $-120^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $120^\circ$  en “RGB”.

Cabe resaltar de suma importancia la realización de una buena calibración del sistema, ya que de ello depende fundamentalmente el resultado obtenido, la aplicación o apoyo de otro tipo de procesos en la reconstrucción se utilizaron para eliminar anomalías en el resultado final de la reconstrucción del objeto.

Se necesita de un buen análisis de los resultados obtenidos, ya que de ello depende el tipo de filtro que se aplicará, aunque para esta investigación se realizó específicamente abordando los algoritmos para el filtrado de Fourier así como la aplicación de una máscara de ceros en el espectro de la imagen. El resultado óptimo obtenido depende de todo lo mencionado anteriormente, sin ello, la reconstrucción en tercera dimensión del objeto sería ineficiente.

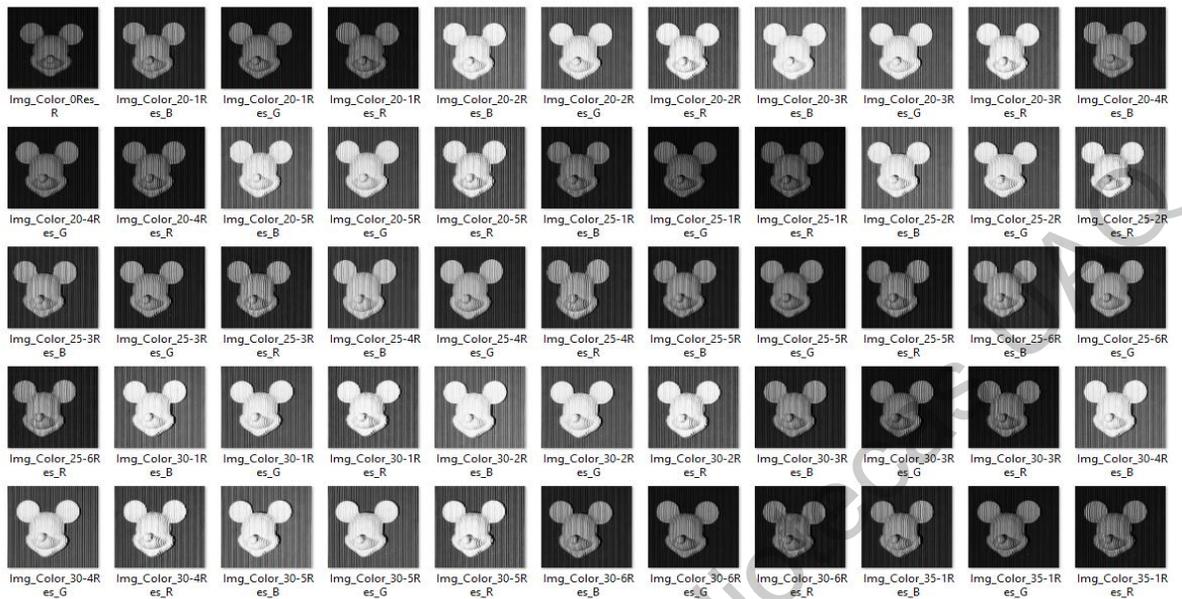


Fig.33. Base de datos para experimentación, captura, recopilación y comparación de resultados.

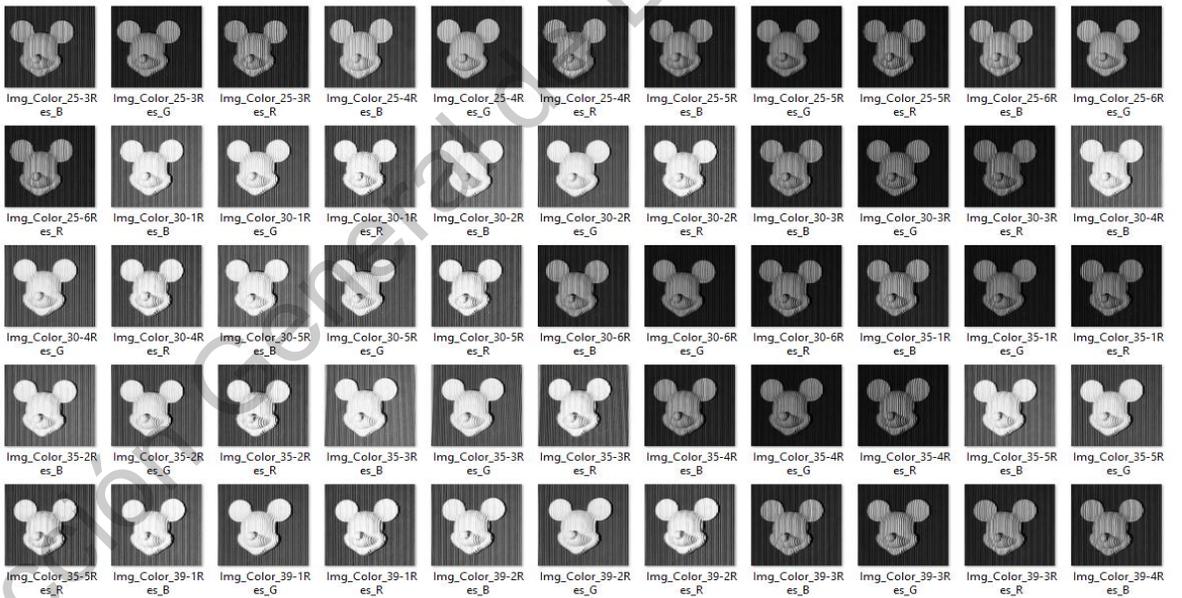


Fig.34. Base de datos para experimentación, captura, recopilación y comparación de resultados.

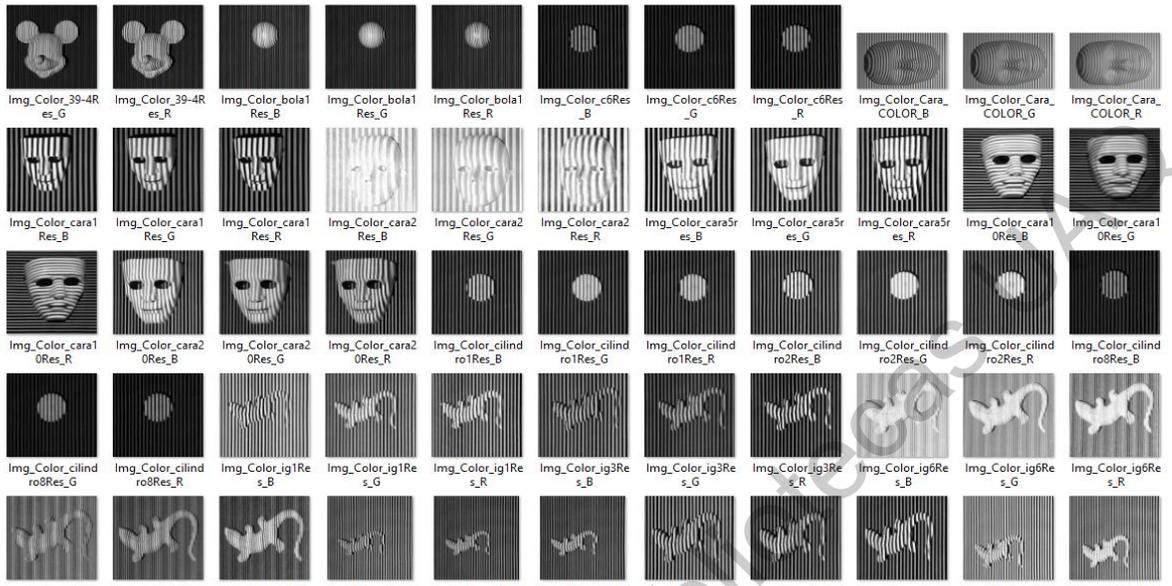


Fig.35. Base de datos para experimentación, captura, recopilación y comparación de resultados.

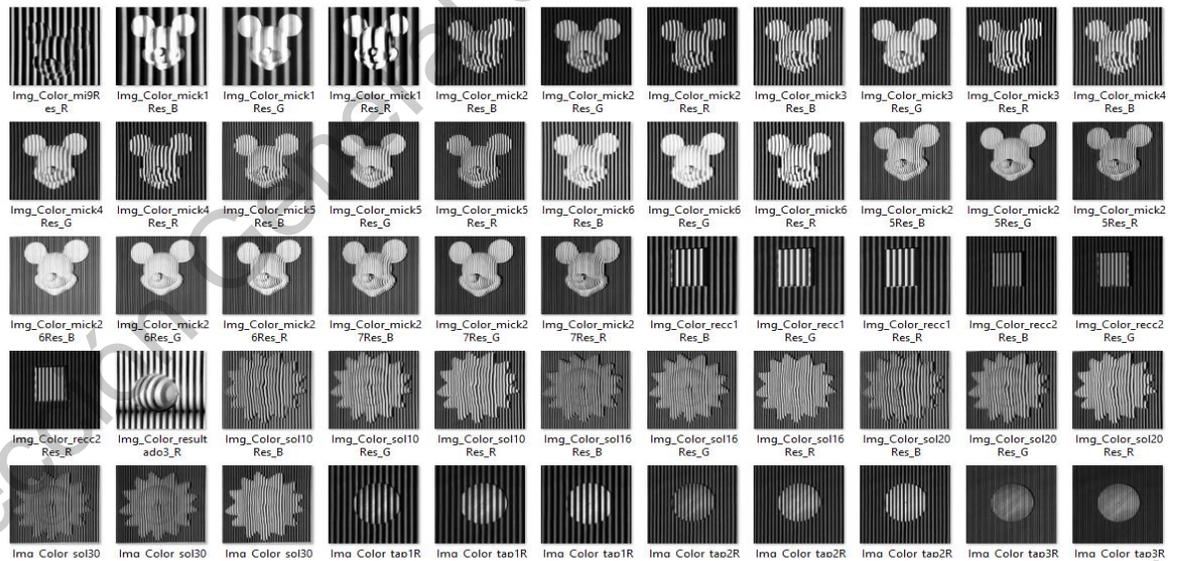


Fig.36. Base de datos para experimentación, captura, recopilación y comparación de resultados.

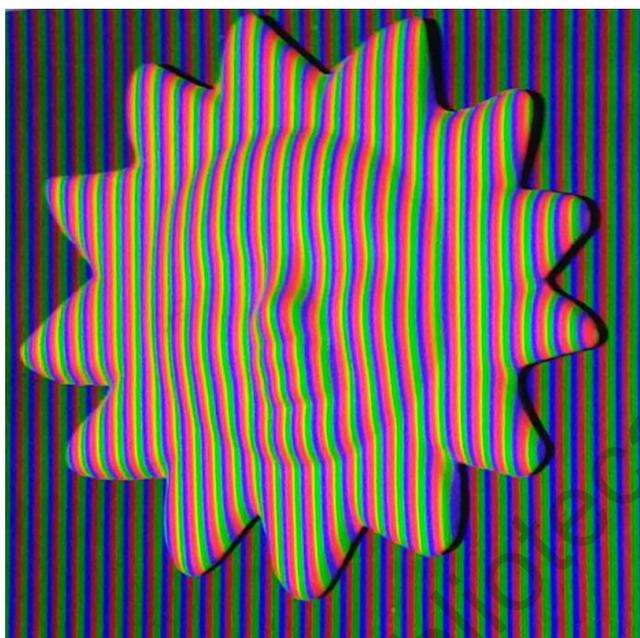


Fig.37. Objeto de cerámica de sol para reconstrucción.

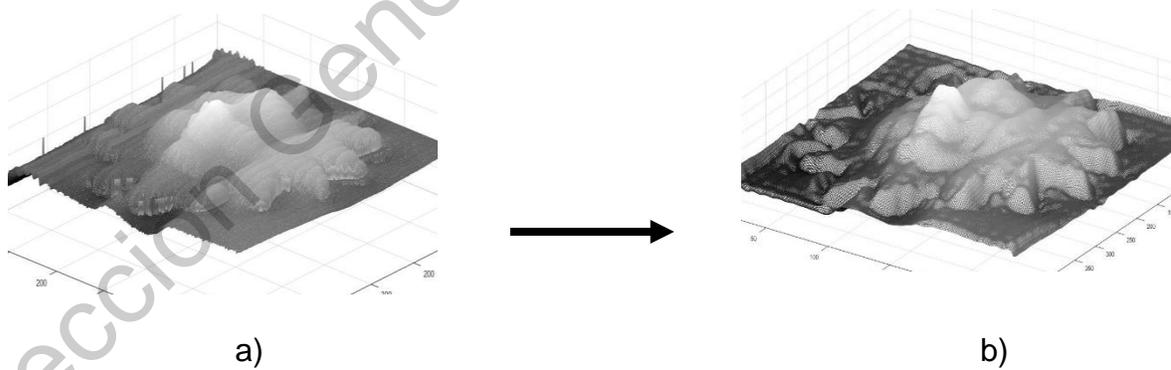


Fig.38. a) Objeto de cerámica de sol antes del filtrado y figura b) Objeto de cerámica de sol después de filtrado.

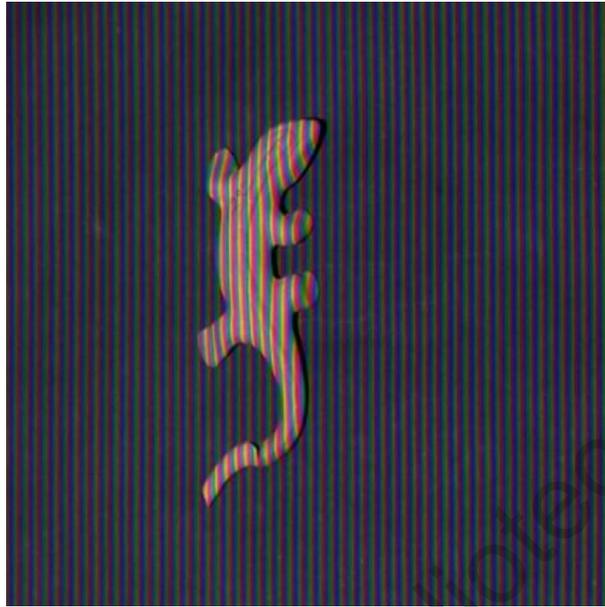


Fig.39. Objeto de cerámica de animal para reconstrucción.

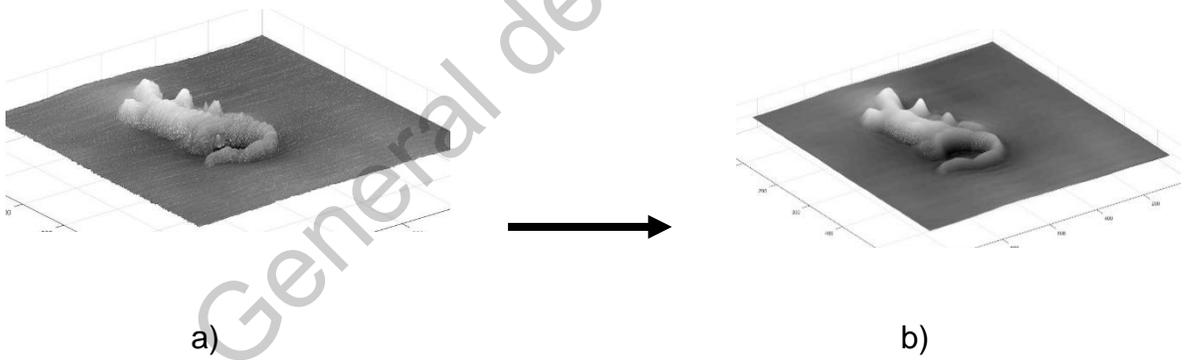


Fig.40.a) Objeto de cerámica de animal antes del filtrado y figura b) Objeto de cerámica de animal después de filtrado.



Fig.41. Objeto de plástico de mascara tipo humano.

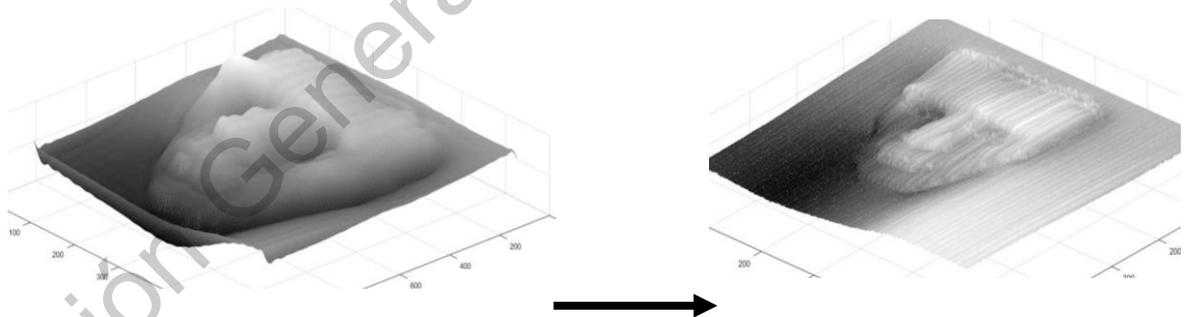


Fig.42.a) Objeto de plástico de mascara tipo humano antes del filtrado y figura b) Objeto de plástico de mascara tipo humano después de filtrado.

## REFERENCIAS

- [1] J. Piaget. The Construction of Reality in the Child. Basic Books, Inc., New York, USA, 1954.
- [2] I. Bierderman. Recognition-by-components: a theory of human image understanding. *Psychological Review*, 94(2):115–147, 1987.
- [3] Stephan Heuel. Uncertain Projective Geometry: Statistical Reasoning for Polyhedral Object Reconstruction. Springer. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Volume 3008, 2004.
- [4] Y. Ma, S. Soatto, J. Koecka, and S. S. Sastry. An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models. Springer-Verlag, 2003.
- [5] R. I. Hartley and A. Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2nd edition, 2004.
- [6] F. Pighin, J. Hecker, D. Lischinski, R. Szeliski, and D. H. Salesin. Synthesizing realistic facial expressions from photographs. In SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, volume 26, pages 75–84, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [7] I-C. Lin, J.-S. Yeh, and M. Ouhyoung. Extracting 3D facial animation parameters from multiview video clips. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 8(2):72–80, 2002.
- [8] G. Moiza, A. Tal, I. Shimshoni, D. Barnett, and Y. Moses. Image-based animation of facial expressions. *International Journal of Computer Graphics*, 18(7):445–465, 2002.

[9] D. DeCarlo, D. Metaxas, and M. Stone. An anthropometric face model using variational techniques. In SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pages 67–74, New York, NY, USA, 1998. ACM Press.

[10] S. R. Musse and D. Thaimann. Hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. *Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 7(2):152–164, 2001.

[11] M. Pollerfeys and L.V. Gool. 3D recording for archaeological fieldwork. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 27(2):20–27, 2003.

[12] Luis Manuel Jiménez Medina. (Septiembre de 2008). Programa de posgrado en ciencias de la computación. En *Algoritmo para la reconstrucción 3-D de objetos texturizados* (10-13). Ensenada, Baja California, México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

**ANEXOS**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE  
LENGUAS Y LETRAS**



**A QUIEN CORRESPONDA:**

La que suscribe, Directora de la Facultad de Lenguas y Letras, hace **C O N S T A R** que

**LOPEZ CRISTERNA MANUEL ALEJANDRO**

Presentó el **Examen de Manejo de la Lengua** efectuado el día veintiséis de febrero de dos mil diecinueve, en el cual obtuvo la siguiente calificación:

**8-**

Se extiende la presente a petición de la parte interesada, para los fines escolares y legales que le convengan, en el Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro, el día cinco de marzo de dos mil diecinueve.



Atentamente  
"Enlazar Culturas por la Palabra"

**LIC. LAURA PÉREZ TELLEZ**



**LPT/evm\*CL\*FLL-C.-111**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

Campus Aeropuerto, Anillo Vial Fray Junípero Serra S/N, Querétaro, Qro.  
C.P. 76140, Tel. 01 (442) 192 12 00 Dirección Ext. 61010,  
Secretaría Administrativa 61300, Posgrado 61140, Licenciatura 61070,  
Centro de Lenguas 61050, Secretaría Académica 61100 y Planeación 61110

**SOMOSUAQ**  
EDUCAR CRECER CONSOLIDAR



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE LENGUAS Y LETRAS



Campus Aeropuerto, 03 de julio de 2019.  
FLL/SA/HCA/2019/501

**C. López Cristerna, Manuel Alejandro**  
Exp. 272739  
Facultad de Ingeniería  
**Presente.**

Me permito comunicar a usted que en Sesión Ordinaria del H. Consejo Académico de la Facultad de Lenguas y Letras, celebrada el **03 de julio de 2019**, se acordó **Aprobar** su solicitud de **convalidación** de la Constancia del Examen de Manejo de la Lengua (8-), expedida por el CELyC, por **Examen de Comprensión de Textos en Inglés**.

Sin más por el momento, me es grato quedar a sus órdenes para cualquier aclaración.

Atentamente,  
"Enlazar Culturas por la Palabra"

  
**Dra. Ma. de Lourdes Rico Cruz**  
Secretaria Académica



SECRETARÍA  
ACADÉMICA

C.c. Expediente.  
Archivo.

MLRC/\*mlip

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Campus Aeropuerto, Anillo Vial Fray Junípero Serra S/N, Querétaro, Qro.  
C.P. 76140, Tel. 01 (442) 192 12 00 Dirección Ext. 61010,  
Secretaría Administrativa 61300, Posgrado 61140, Licenciatura 61070,  
Centro de Lenguas 61050, Secretaría Académica 61100 y Planeación 61110

**SOMOS UAQ**  
EDUCAR CRECER CONSOLIDAR

## Reconstrucción de objetos en 3-D por método de cambio de fase utilizando franjas RGB

M. Alejandro López-Cristerna <sup>a</sup>, J. Carlos Pedraza-Ortega <sup>b</sup>, J. Manuel Ramos-Arreguin <sup>c</sup>, Efrén Gorrostieta-Hurtado <sup>d</sup>,  
Saúl Tovar-Arriaga <sup>e</sup>, Rodrigo Escobar Díaz-Guerrero <sup>f</sup>.

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería

<sup>a</sup> [ing.alejandrocristerna@gmail.com](mailto:ing.alejandrocristerna@gmail.com), <sup>b</sup> [caryoko@yahoo.com](mailto:caryoko@yahoo.com), <sup>c</sup> [jsistdig@yahoo.com](mailto:jsistdig@yahoo.com), <sup>e</sup> [efrengorrostieta@gmail.com](mailto:efrengorrostieta@gmail.com), <sup>e</sup> [saul.tovar@uaq.mx](mailto:saul.tovar@uaq.mx),  
<sup>f</sup> [rodediazg@gmail.com](mailto:rodediazg@gmail.com)

**Resumen.** Este artículo presenta una propuesta de solución al problema de la reconstrucción en 3D (tercera dimensión) de objetos a través del método de cambio de fase utilizando franjas de colores rojo, verde y azul. El algoritmo utilizado en esta investigación se denomina algoritmo de cambio de fase, que consiste en extraer la forma de la superficie 3D y la información de la distorsión del patrón de luz proyectado en el objeto (fase de la imagen); esta información se puede calcular a partir de la forma y desplazamiento de la luz estructurada. En esta técnica, la información topográfica de un objeto se reconstruye a partir de la deformación de las franjas de fase periódicas y desplazadas proyectadas sobre el objeto. La proyección de los patrones de franjas en colores rojo, verde y azul se ha utilizado en investigaciones previas, pero a diferencia de estudios anteriores, este trabajo mejoró el proceso de reconstrucción, considerando una mejor calidad de color y nitidez, además, se aplica un filtrado utilizando transformada de Fourier como una etapa de post-procesamiento, reduciendo el ruido que se presenta en la reconstrucción final de los objetos que utilizan el algoritmo tradicional de cambio de fase.

**Palabras clave.** Reconstrucción 3D, franjas de colores, cambio de fase, filtrado de señales.

### 1. Introducción

La determinación de la forma 3-D (tercera dimensión) de un objeto a partir de un conjunto de imágenes bidimensionales ha sido un gran desafío en el área de la visión por computadora durante varios años. Una de las razones de esto es que todavía no podemos explicar claramente cómo los seres humanos pueden percibir la profundidad en una escena [1].

Aun así, se han logrado grandes avances en la obtención de la estructura tridimensional de escenas u objetos reales. El aumento en las capacidades de computación hace posible procesar volúmenes de datos previamente intratables, mejorando las técnicas y haciéndolas más rápidas y precisas. Esta capacidad para modelar escenas del mundo real dentro de una computadora es muy ventajosa en áreas como la industria, el diseño industrial o las artes gráficas.

En este caso, para la reconstrucción de objetos, se utilizó el método de cambio de fase (phase-shifting en inglés), que consta de varias etapas en las que la información de profundidad se purifica progresivamente. Para que esto sea posible, se previó la imagen del objeto con las franjas proyectadas, más adelante, es necesario separar la imagen capturada de la proyección de las franjas de color rojo, verde y azul (RGB Red, Green and Blue por sus siglas en inglés) en sus tres canales R, G, B, respectivamente. A través de la combinación de la intensidad de los tres canales se obtiene una imagen que contiene la fase,

y ésta a su vez la altura del objeto, lo cual es la reconstrucción 3D del mismo.

Los métodos tradicionales basados en el algoritmo de cambio de fase al final del proceso muestran una reconstrucción que presenta ondulaciones al final del proceso de reconstrucción, las cuales presentan un patrón periódico y el cual puede ser removido con el propósito de mejorar el proceso de obtención de la altura del objeto. Por esta razón, se propone el uso de una serie de filtros basados en la transformada de Fourier, con el propósito de reducir el ruido y mejorar el resultado final en el proceso de reconstrucción 3D de los objetos [2].

### 2. Fundamentación teórica y análisis de algoritmo del método de cambio de fase

Dado un conjunto de imágenes, con diferentes vistas del mismo entorno, es muy probable que exista una relación entre ellas. Esta relación está dada por una geometría implícita en el conjunto de imágenes. Gracias a esta geometría es posible obtener la reconstrucción tridimensional del entorno capturado por el conjunto de imágenes. El propósito de la recreación con computadora es generar entornos virtuales tridimensionales a partir de imágenes de entornos reales, para los cuales utiliza métodos que pertenecen principalmente al área de visión por computadora, pero también se basa en técnicas que pertenecen a otras áreas como: procesamiento digital de imágenes y tramas. De tal manera que todo el proceso de recreación por computadora, mejor conocido como reconstrucción tridimensional, se puede dividir en tres pasos [7]:

1. Procesamiento digital de imágenes.
2. Visión por Computadora.
3. La visualización de la reconstrucción.

A continuación se presentan los pasos para la reconstrucción tridimensional:

1. Procesamiento digital de imágenes
  - 1.1. Adquirir la imagen.
  - 1.2. Filtrar la imagen.
  - 1.3. Encuentra las correspondencias de puntos.
2. Visión por computadora
  - 2.1. Calibrar la cámara.
  - 2.2. Estimación de los parámetros de orientación y posición.
  - 2.3. Triangulación.
3. Visualización
  - 3.1. Generación de la malla de reconstrucción.
  - 3.2. Extraer la textura de las imágenes.
  - 3.3. Visualizar reconstrucción tridimensional.

Para la aplicación de los pasos en la reconstrucción tridimensional, en este caso, el algoritmo de cambio de fase se implementará con una sola máscara RGB, que se compone de los tres canales (Rojo, Verde y Azul), donde la diferencia de fase entre dos canales es de 120°. La franja sinusoidal de color se proyecta sobre una superficie plana y se captura con la cámara de color CCD (Charged Coupled Device), esta imagen se utiliza como plano de referencia. El método de cambio de fase de tres pasos se utiliza para obtener la fase del objeto. Por lo que para generar la malla antes mencionada, los canales rojo, verde y azul deben estar desfasados, entonces, se establece que la intensidad de cada píxel para cada uno de los canales es la siguiente:

$$I_R(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos\left[(x, y) - \frac{2}{3}\right] \quad (1)$$

$$I_G(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[(x, y)] \quad (2)$$

$$I_B(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos\left[(x, y) + \frac{2}{3}\right] \quad (3)$$

El patrón de franjas combinado se muestra en la Fig. 1.

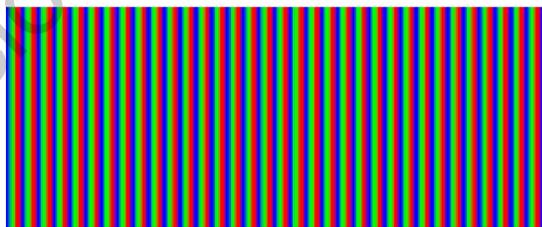


Fig. 1. Franja sinusoidal de color en RGB

Por siguiente, la recopilación física de la información se obtendrá mediante una triangulación entre un proyector, la cámara, que será la que capturó la máscara proyectada y el objeto de interés, como se puede observar en la Fig. 2. Y, finalmente, el objeto sobre el cual se desea obtener la información.

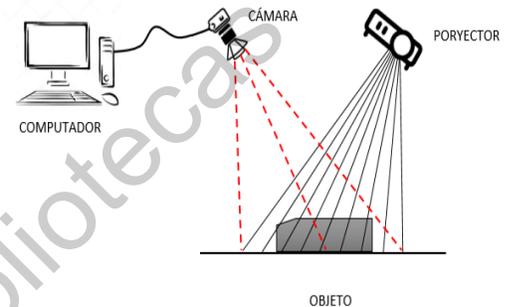


Fig.2. Triangulación del sistema de captura

Una vez generada y proyectada la malla de reconstrucción de acuerdo con el método a utilizar, se capturan las imágenes y mejoran mediante uno o varios métodos. Por ejemplo, la transformada de perspectiva, como es en este caso. Finalmente, se obtiene un mapa de fase, que contiene el perfil de la imagen, lo que resulta en un conjunto de características del objeto.

La fórmula para generar la malla antes mencionada (ec.4) establece que:  $I_R(x, y)$ ,  $I_G(x, y)$ ,  $I_B(x, y)$  son las intensidades de cada píxel en los canales rojo, verde y azul, respectivamente.  $I'(x, y)$ , es la modulación de intensidad y  $I''(x, y)$ , es el promedio de intensidad y  $I''(x, y)$ , es la modulación de intensidad.  $\phi(x, y)$ , es la fase deseada relacionada con el perfil del objeto. Resolviendo ecs. (2) - (4), el  $\phi(x, y)$  se puede lograr mediante:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\sqrt{3} \frac{I_R - I_B}{2(I_R - I_B - I_G)}\right) \quad (4)$$

La función de arco tangente dará como resultado un valor en el rango de  $-\pi$  a  $\pi$  con  $2\pi$  discontinuidades (Fig.3).

La base de la tira de codificación de la fase de color: es una fase de escalera b (fase de escalera b)  $(x, y)$  que va de " $-\pi$ " a " $\pi$ " se muestra en la Fig. 3. La fase se codifica en la intensidad de los canales, y la diferencia de fase entre dos canales es de 120 grados como se muestra en la Fig. 4. La Fig. 5 muestra el proceso de composición de la tira de codificación de la fase de color. El proceso para resolver el problema se expresa de la siguiente manera:

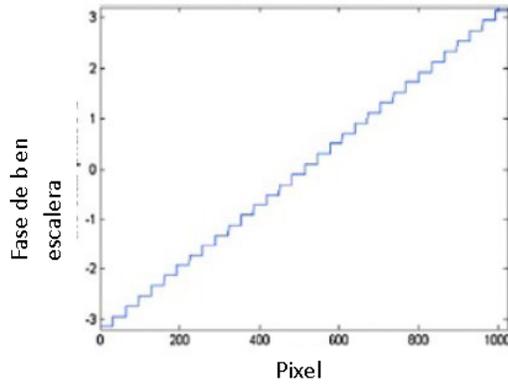


Fig. 3. Gráfica de pixeles en escalera [3].

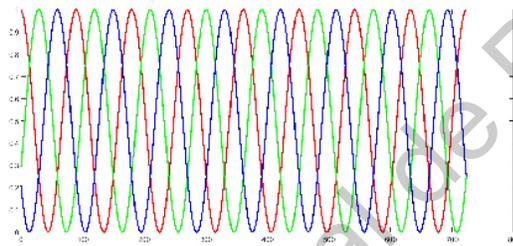


Fig. 4. Gráfica de intensidad de pixeles.

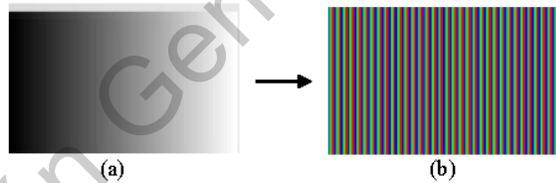


Fig. 5. Proceso de composición de franjas de codificación de fase de color. (a) franjas de codificación de fase en RGB (b) tira de codificación de fase de color

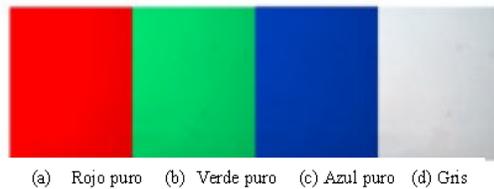


Fig. 6. Calibración de colores al tono más puro. (a) Rojo, (b) Verde, (c) Azul y (d) Gris. [3]

Paso 1: Se procede a graficar ecuación tipo escalera:

$$b(x, y) = -\pi + \frac{x}{p} 2 \frac{\pi}{N} \quad (5)$$

Aquí  $(x, p)$  es el orden del rango ideal obtenido por la operación de redondeo, "x" e "y" son los píxeles horizontal y vertical del proyector, respectivamente.  $2p / N$  significa la altura de la escalera. N es el número total de ciclos marginales. P es el tono marginal.

Paso 2: la fase de escalera  $b(x, y)$  se codifica en tres canales para formar la tira de codificación de fase de color:

$$I_{R_i}(x, y) = \frac{255 [ 1 + \sin(b(x, y) - 2\frac{\pi}{3}) ]}{2} \quad (6)$$

$$I_{G_i}(x, y) = \frac{255 [ 1 + \sin(b(x, y)) ]}{2} \quad (7)$$

$$I_{B_i}(x, y) = \frac{255 [ 1 + \sin(b(x, y) - \frac{2}{3}) ]}{2} \quad (8)$$

Aquí  $(x, y)$ ,  $I_G(x, y)$ ,  $I_B(x, y)$  son las intensidades de cada pixel en los canales rojo, verde y azul, respectivamente.

Paso 3: Obtenga la fase de escalera de la tira de codificación de la fase de color a través del método de cambio de fase de tres pasos.

Paso 4: Determine el orden marginal k de la fase de escalera mediante el método de cambio de fase con una sola máscara RGB, se realiza la reconstrucción de objetos en la tercera dimensión, aplicando y mejorando los algoritmos definidos por este procedimiento, favoreciendo la reconstrucción del objetos.

De esta manera, la lectura y extracción de datos se determinan con mayor precisión y la forma del objeto adquiere menos errores al capturar la información de interés.

### 3. Resultados

Se requiere una serie de pasos para obtener mejores resultados para la reconstrucción tridimensional del objeto.

En primer lugar, las franjas RGB se proyectan de forma vertical sobre el objeto, después, se toman captura la imágenes con las franjas de colores proyectadas.

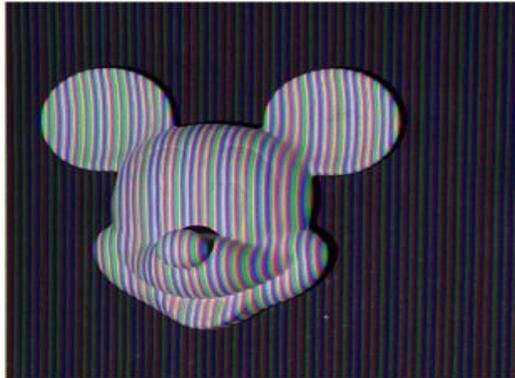


Fig. 7. Proyección de franjas al objeto que se desea reconstruir

Una vez que se proyectan las tiras RGB y se captura la imagen a reconstruir (Fig. 7), se procesa de tal manera que los canales de color de la imagen se separan, lo que resulta en lo siguiente (Fig.8):

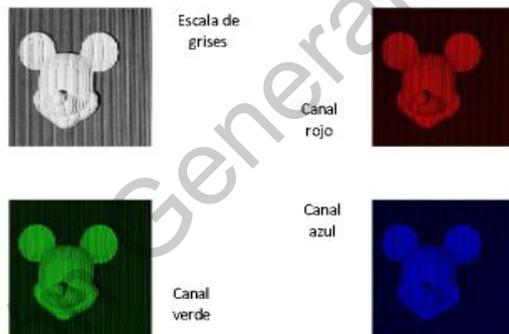


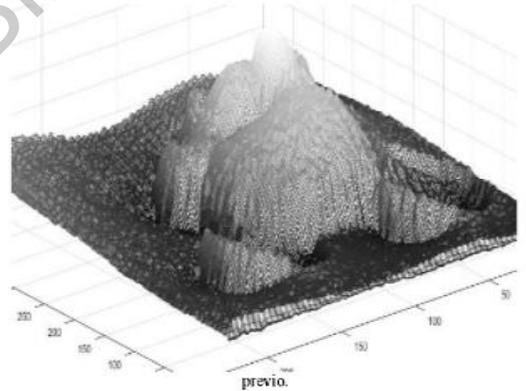
Fig. 8. Separación de canales de imagen capturada

La imagen separada en sus tres canales disponibles se utiliza para la creación del objeto en la tercera dimensión (Fig. 10), estando en primer plano y sin ningún tipo de filtrado, la imagen del objeto convertida a escala de grises (Fig.9).

Fig. 9. Imagen capturada convertida a escala de grises para su procesamiento



Fig. 10. Reconstrucción tridimensional de objetos sin ningún tipo de filtrado



Una vez que los resultados obtenidos de la reconstrucción del objeto han sido analizados, la superficie se detecta con un ruido abrupto (Fig. 10). Se decide corregirlo mediante el análisis de su espectro, detectando ciertas anomalías en algunas regiones de la información que arroja su lectura, que procede a la aplicación de una máscara binaria para la eliminación del ruido en ciertas regiones del espectro, lo que resulta en una reconstrucción considerable con menos ruido (Fig.11) (Fig.12).

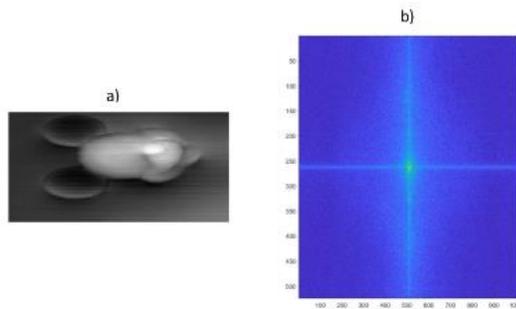


Fig. 11. a) Objeto capturado convertido a escala de grises y b) espectro de imágenes del objeto

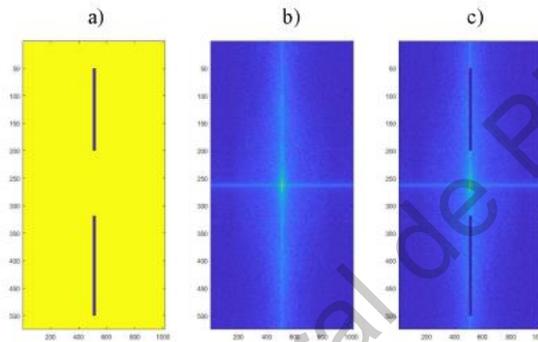


Fig. 12. a) Máscara creada a partir de ceros y unos para la aplicación en el espectro b) espectro al que se aplica la máscara c) espectro con máscara de ceros y unos aplicados.

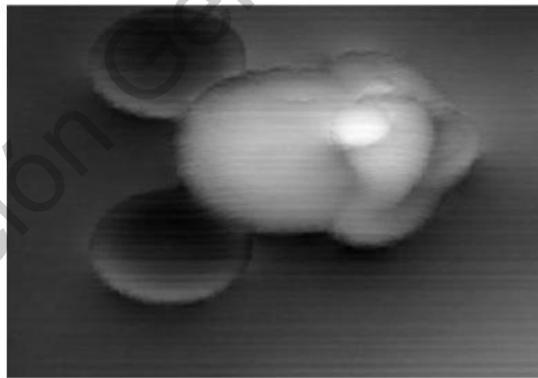


Fig. 13. Imagen del objeto filtrado con máscara de ceros y unos.

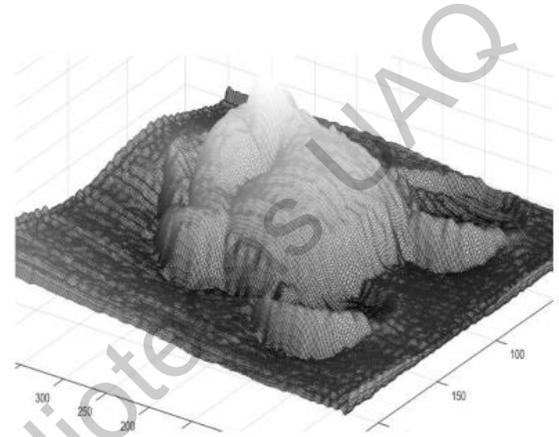


Fig. 14. Resultado en la tercera dimensión del objeto reconstruido y filtrado con una máscara de unos y ceros

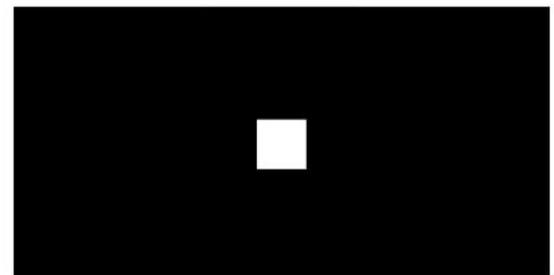


Fig. 15. Máscara binaria con filtrado de Fourier.

Al observar el resultado (Fig.14) que dio la aplicación de la máscara binaria (Fig.15) a la imagen original del objeto, se notó que la reducción del ruido en la superficie era muy pequeña, por lo que se procedió a la aplicación de un segundo filtrado de manera general (en toda la imagen), trabajando en esta ocasión con un filtro de Fourier con una máscara binaria de unos y ceros, que resulta en una imagen corregida en gran parte sin tanta pérdida general de información, obteniendo un mejor resultado en el proceso de reconstrucción 3D de los objetos.

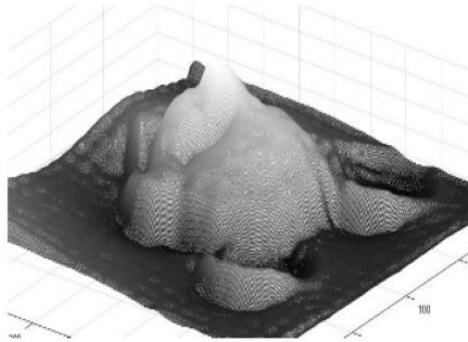


Fig. 16. Resultado de la aplicación de máscara binaria con filtrado de Fourier.

Con el propósito de validar el método propuesto, se lleva a cabo una comparación con objetos del trabajo propuesto por B.Li et al (2015) [3]. Los resultados de esta comparación se pueden observar en las figuras 17 y 18.

Como se puede observar, la reconstrucción obtenida con el método propuesto presenta, una menor oscilación en la forma final del objeto, lo cual indica que nuestro método tiene un mejor desempeño.

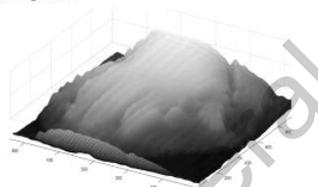


Fig. 17. Reconstrucción del objeto sin transformada de Fourier.

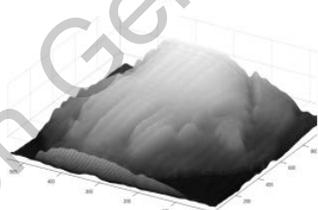


Fig. 18. Resultado de reconstrucción con transformada de Fourier aplicada.

#### 4. Conclusiones

La obtención de la topografía de objetos en formas simples se obtiene manteniendo con éxito sus características físicas (dimensiones, volumen y forma), con una sola imagen proyectada en "RGB" y utilizando el algoritmo de cambio de fase (phase-shifting).

Es muy importante realizar una calibración adecuada del sistema de proyección y captura, así como un buen análisis de los resultados obtenidos para poder determinar si se aplica algún tipo de filtro posterior a la reconstrucción 3D, como una etapa de post-procesamiento.

En este trabajo se propuso el uso de un filtro supresor de banda, mediante el uso de la transformada de Fourier.

Con el propósito de validar el método se llevaron a cabo comparaciones con trabajos previos en la literatura.

#### 5. Referencias

- [1] Grandón-Pastén, N., Aracena-Pizarro, D., & Tozzi, C. L. (2007). Reconstrucción de objeto 3D a partir de imágenes calibradas. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 15(2), 158-168.
- [2] S. McCann, (January 05, 2015) "3D Reconstruction from Multiple Images." Retrieved: June 15, 2016.
- [3] B. Li, Y. Fu, J. Zhang, H. Wu, G. Xia, G. Jiang. (October of 2015). "A fast three-dimensional shape measurement method based on color phase coding." *ELSEVIER*, 1, 5.
- [4] N. Grandón - Pastén, D. Aracena-Pizarro, C.L. Tozzi. (Agosto 20,2007). "Reconstrucción de objeto 3d a partir de imágenes calibradas." *Revista chilena de ingeniería*, 1, 11.
- [5] S. McCann, (January 05, 2015) "3D Reconstruction from Multiple Images." June 15, 2016.
- [6] I. Vite Silva, L.G. de la Fraga. (Julio de 2008). "Reconstrucción Tridimensional de Objetos Mediante Técnicas Evolutivas". México, D.F: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- [7] R.E. Díaz Guerrero. (Junio 2016). "Digitalización de sólidos utilizando análisis de franjas y técnicas de desplazamiento de fase en arquitecturas ARM". Querétaro, Qro. Centro Universitario, UAQ.
- [8] L. Flores, A. Muñoz, S. Ordoñez, G. García-Torales, A. Ferrari. (January 17, 2017). "Color-fringe pattern profilometry using an efficient iterative algorithm.". *Optics Communications*. ELSEVIER.
- [9] W. Yin, X. Cheng, J.Xie, H. Cui, Yingying Chen. (May 23, 2017). "High-speed 3D profilometry employing HSI color model for color Surface with discontinuities". *Optics and Laser Technology*. ELSEVIER.
- [10] Y. Ding, J. Xi, Y. Yu, F. Deng, J. Cheng. (April 11,2017). "Recovering the absolute phase maps of three selected spatial-frequency fringes with multi-color channels". *Neurocomputing*. ELSEVIER.

## 5. Biografías

### A) Manuel Alejandro López Cristerna

Se tituló como Ingeniero en Electrónica con línea terminal en Automatización y Control en el Tecnológico Nacional de México campus Culiacán, llevó a cabo sus estudios finales enfocados en el área de Procesamiento Digital de Imágenes. Actualmente se encuentra matriculado en el programa ofrecido por la Universidad Autónoma de Querétaro para obtener el grado de M. en C. en Inteligencia Artificial, orientando su trabajo al área de Visión por Computadora.

### B) Jesús Carlos Pedraza Ortega

El Doctor Jesús Carlos Pedraza Ortega realizó sus estudios de Maestría en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica (FIMEE – Universidad de Guanajuato) con especialidad en Instrumentación y Sistemas Digitales. El Doctorado en Ingeniería Mecánica con especialidad en Robótica - Sistemas de Reconstrucción 3D lo realizó en la University of Tsukuba en Japón, donde trabajó con técnicas de reconstrucción 3D basado en método de visión pasiva. Actualmente es profesor e investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### C) Juan Manuel Ramos Arreguin

El Doctor Juan Manuel Ramos Arreguin recibió su título de Maestro en Ciencias en ingeniería eléctrica y sistemas digitales por la Universidad de Guanajuato y posterior, su Doctorado en Ciencia y Tecnología por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Desde 2009, ingresó a la Universidad Autónoma de Querétaro y actualmente es profesor-investigador de la Facultad de Ingeniería.

### D) Efrén Gorrostieta Hurtado

El Doctor Efrén Gorrostieta es profesor-investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Estudió Ingeniería Electrónica, recibió una maestría en Ciencias en Control y Automatización y un doctorado en Mecatrónica. Fue cofundador de la Asociación Mexicana de Mecatrónica y fue presidente de la Sección IEEE Querétaro, además de haber sido presidente del Capítulo de Inteligencia Computacional IEEE Querétaro.

### E) Saúl Tovar Arriaga

El Doctor Saúl Tovar Arriaga pertenece al sistema nacional de investigadores (CONACyT) sin interrupción desde 2013. En 2016, fue responsable de la creación del Máster en Inteligencia Artificial en la Universidad Autónoma de

Querétaro. Desde 2017, es presidente del capítulo de la IEEE Computational Intelligence Society. Desde enero de 2017 hasta diciembre de 2018, presidió la Sección de IEEE Querétaro. Es docente en la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro e imparte temas como Programación, Inteligencia Artificial, Robótica y Matemáticas.

### F) Rodrigo Escobar Díaz Guerrero

Estudió Ingeniería en Computación y Maestría en Ciencias de la Computación en la Universidad Autónoma de Querétaro. Ha trabajado como colaborador en proyectos de investigación en desarrollo de hardware y software con profesores-investigadores de la facultad de ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro.

Dirección General de Bibliotecas UAQ