



SISTEMA DE MEDICIÓN 3D BASADO EN LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN DE FRANJAS A COLOR EN EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE PRODUCTOS AGROALIMENTARIOS



Como requisito para obtener el grado de:

Maestría en Optomecatrónica

Asesor:

Dra. Amalia Martínez García

Estudiante:

Ing. Leidy Johana Quintero Rodríguez

*Diciembre de 2016
León, Guanajuato,
México*

DEDICATORIA

A mis padres Elida y José, hermanos Sandra, José y Darío, a mi tío Edgar, a mi abuelo que está en el cielo y en especial para la abuelita más linda del mundo, gracias por ser parte de mi vida, por los consejos y regaños aunque dolorosos, me hicieron mucho bien.

Una relación que inició a partir de una linda amistad que con el paso del tiempo dio origen a sentimientos profundos y sinceros, aunque confusos para ti y complicados para mí, hoy tengo la certeza que compartir cada instante a tu lado es mi mayor felicidad. No importa que los proyectos de vida que deseo cumplir no se den cuando realmente espero, pues siempre estas a mi lado para ofrecerme consuelo y apoyo. Gracias por hacerme feliz, por cumplir todos mis caprichos, por pensar siempre en mis deseos antes que en los tuyos, por ser mi mayor fortaleza y por aceptar tener una vida junto a la mía. Eres el amor de mi vida y te quiero regalar este logro que inició como un sueño hace dos años y hoy se vuelve realidad. Con amor para mi lindo esposo *Jorge Mario Uribe Martínez*.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por la beca otorgada para llevar a cabo los estudios de maestría en optomecatrónica, generación 2014-2016.

Al Dr. Abundio Dávila Álvarez, Dr. Moisés Cywiak Garbarcewicz, M en C. Juan Manuel Bujdud Pérez e Ing. Juan Antonio Rayas Álvarez por sus valiosos comentarios al presente trabajo de tesis.

Agradezco al CIO por la oportunidad que me brindó al aceptarme como estudiante de su posgrado y a cada uno de los doctores que hicieron parte de mi formación profesional.

En especial agradezco a la Dra. Amalia Martínez García por todo el apoyo, amistad, paciencia y comprensión, porque más que una asesora es alguien que se preocupa por el bienestar de sus estudiantes.

Quiero agradecer a una persona muy especial, por su linda amistad, apoyo y comprensión. Es un gran consuelo llegar a un país desconocido, con modismos completamente diferentes y encontrarse con personas alegres, amables y expresivas. Gracias señorita Ángeles Sánchez.

Tabla de contenido

RESUMEN	1
PRESENTACIÓN DE LA TESIS	3
1 Estado del arte	5
2 Conceptos básicos de colorimetría	9
2.1 Procesamiento digital de una imagen	9
2.1.1 Color en los materiales	11
2.2 Fuentes de luz y tipos de iluminantes	11
2.3 Percepción del color	15
2.3.1 Espacios de color y distancias de color	16
2.3.2 Sistema de color estándar	17
2.3.3 Mezcla aditiva de colores	18
3 Proyección de franjas con desplazamiento de fase	25
3.1 Proyección de franjas utilizando una fuente de luz colimada	25
3.2 Técnica de desplazamiento de fase	28
3.2.1 Ventajas y desventajas del método de desplazamiento de fase	31
3.2.2 Desarrollo de fase	31
3.2.3 Algoritmos para el desarrollo de fase	34
4 Desarrollo experimental y análisis de resultados	37
4.1 Sistema óptico basado en la técnica de proyección de franjas	37
4.2 Alineación del sistema de proyección de franjas	38
4.3 Calibración de color para el proyector	40
4.4 Calibración de color de la cámara	42
4.5 Obtención de la topografía del objeto en unidades de longitud	44
4.6 Experimento 1: Proyección de franjas en niveles de grises	46
4.7 Experimento 2: Proyección de franjas a color	49
4.8 Experimento 3: Proyección simultánea de franjas a color (desplazamiento de fase simultáneo)	57
4.9 Experimento 4: Influencia del color de la iluminación en la medición de topografía	60
4.10 Experimento 5: Proyección simultánea de franjas a color (desplazamiento de fase simultáneo) en la obtención de topografía de un objeto de prueba	66

4.11	Experimento 6: obtención de la topografía y asociación del color real en frutas	68
4.12	Experimento 7: obtención de la topografía a 360 grados de una hortaliza y su asociación del color.....	72
4.13	Reconstrucción tridimensional de una zanahoria	80
5	Conclusiones generales.....	87
5.1	Trabajos futuros	89
5.2	Trabajos presentados	90
5.3	Referencias	91

Lista de figuras

Figura 1. Escala de temperatura del color en grados Kelvin (K).....	12
Figura 2. Distribución espectral relativa del iluminante D65 o C.	13
Figura 3. Distribución espectral relativa del iluminante A.....	13
Figura 4. Distribución espectral relativa del iluminante F.....	14
Figura 5. Elementos esenciales para percibir el color.	14
Figura 6. Representación de las funciones para las combinaciones de color de la CIE (funciones de correspondencia).	20
Figura 7. Sistema <i>Munsell</i>	21
Figura 8. Diagrama de color <i>CIE L*a*b*</i>	22
Figura 9. Diagrama de cromaticidad del espacio de color CIE <i>xy</i>	23
Figura 10. Proyección de franjas a través de la interferencia entre dos frentes de onda planos.	25
Figura 11. Espectro de Fourier para un interferograma con perfil cosenoidal con desplazamiento de fase de $2\pi/3$	29
Figura 12. Función de transferencia para un filtro lineal en cuadratura.....	29
Figura 13. (a) Mapa de fase para un objeto de prueba y (b) mapa de fase para el plano de referencia	30
Figura 14. Mapa de fase envuelta para un objeto de prueba.....	31
Figura 15. Distribución del Mapa de fase envuelto en una sola dimensión.	32
Figura 16. Progreso del desenvolvimiento de la fase en una sola dimensión.....	33
Figura 17. Progreso del desenvolvimiento de la fase en una sola dimensión y fase final desenvuelta.....	33
Figura 18. Arreglo experimental del sistema de proyección de franjas.....	38
Figura 19. Componentes internas de un proyector digital.	39
Figura 20. Calibración del proyector utilizando un colorímetro II profiler XRite: a) Configuración del perfil, b) Configuración brillo y contraste, c) Calibración del proyector.	41
Figura 21. Calibración del proyector con el colorímetro X-Rite II Profiler.	41
Figura 22. Interfaz desarrollada en LabView 2013, para generar franjas a color con perfil cosenoidal.	42
Figura 23. Diagrama en bloques implementado en LabView 2013 para generar franjas a color con perfil cosenoidal.....	43
Figura 24. Calibración de los colores de la cámara utilizando la paleta de color (ColorChecker Clasic).	44
Figura 25. Arreglo utilizado para obtener la profundidad del objeto en unidades de longitud.	45
Figura 26. Medidas reales del objeto de prueba, obtenidas con una máquina de coordenadas.	46
Figura 27. Objeto de referencia.	46
Figura 28. Diagrama de bloques del algoritmo implementado para obtener la fase utilizando la técnica de desplazamiento de fase.	47

Figura 29. Patrones de franjas en escala de grises sobre un objeto circular.	48
Figura 30. (a) Fase envuelta del objeto y (b) perfil de la fase envuelta en $y=450$, franjas en escala de grises.	48
Figura 31. Topografía del objeto de prueba para proyección de franjas en escala de grises.	49
Figura 32. Diagrama de bloques del algoritmo para obtener la fase a partir de franjas a color (rojas, verdes y azules), utilizando la técnica de desplazamiento de fase.	50
Figura 33. Patrones de franjas en color rojo sobre un objeto circular, desplazados en fase $2\pi/3$	51
Figura 34. (a) Fase envuelta del objeto y (b) perfil de la fase envuelta para $y=450$, franjas color rojo.	51
Figura 35. Topografía del objeto de prueba para proyección de franjas en color rojo.	52
Figura 36. Patrones de franjas en color verde sobre un objeto circular, desplazados en fase $2\pi/3$	53
Figura 37. (a) Fase envuelta del objeto y (b) perfil de la fase envuelta para $y=450$, franjas color verde.	53
Figura 38. Topografía del objeto de prueba para proyección de franjas en color verde.	54
Figura 39. Patrones de franjas en color verde sobre un objeto circular, desplazados en fase $2\pi/3$	55
Figura 40. (a) Fase envuelta del objeto y (b) perfil de la fase envuelta para $y=450$, franjas color azul.	56
Figura 41. Topografía del objeto de prueba para proyección de franjas en color azul.	56
Figura 42. Patrón de franjas RGB, proyección simultánea sobre un objeto circular.	58
Figura 43. (a) Fase envuelta del objeto circular para proyección simultánea en RGB y (b) perfil de la fase envuelta para $y=450$	59
Figura 44. Topografía del objeto circular para proyección de franjas simultánea en RGB.	59
Figura 45. Arreglo experimental de proyección de franjas con dos fuentes de iluminación (color rojo, verde y azul).	61
Figura 46. Proyección de franjas en escala de grises con iluminación color rojo.	61
Figura 47. (a) Fase envuelta del objeto circular y (b) perfil de la fase, para la proyección en escala de grises y con iluminación color rojo para $y=450$	62
Figura 48. Topografía del objeto circular para proyección de franjas en escala de grises con iluminación color rojo.	62
Figura 49. Proyección de franjas en escala de grises con iluminación color verde.	63
Figura 50. (a) Fase envuelta del objeto circular y (b) perfil de la fase, para la proyección en escala de grises y con iluminación color verde para $y=450$	63
Figura 51. Topografía del objeto circular para proyección de franjas en escala de grises con iluminación color verde.	64
Figura 52. Proyección de franjas en escala de grises con iluminación color azul.	64
Figura 53. (a) Fase envuelta del objeto circular y (b) perfil de la fase, para la proyección en escala de grises y con iluminación color azul para $y=450$	65

Figura 54. Topografía del objeto circular para proyección de franjas en escala de grises con iluminación color azul.....	65
Figura 55. (a) Patrón de franjas proyectado sobre la máscara de teatro y (b) sobre el plano de referencia, para proyección simultánea.....	67
Figura 56. (a) Fase envuelta de máscara de teatro y (b) perfil de la fase envuelta, para proyección simultánea.....	67
Figura 57. Topografía de la máscara de teatro para proyección simultánea.....	68
Figura 58. Proyección de franjas en escala de grises para un desplazamiento tres pasos ($2\pi/3$), sobre una manzana color amarillo con corte en la superficie.....	69
Figura 59. Fase envuelta y perfil de la fase envuelta para una manzana verde con corte en la superficie.....	69
Figura 60. Topografía con color real y textura para una manzana verde con corte en la superficie.....	70
Figura 61. Proyección de franjas en escala de grises para un desplazamiento de tres pasos, sobre una manzana color roja.....	70
Figura 62. (a) Fase envuelta y (b) perfil de la fase envuelta para una manzana roja para $\gamma=900$	71
Figura 63. Topografía con color real y textura para una manzana roja.....	71
Figura 64. Patrones de franjas proyectados sobre la zanahoria, para un desplazamiento de fase de $2\pi/3$	72
Figura 65. (a) Fase envuelta para la zanahoria y (b) perfil de la fase, para proyección de franjas en escala de grises.....	73
Figura 66. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura, a partir de proyección de franjas en escala de grises.....	73
Figura 67. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura después de dos días sin refrigeración.....	74
Figura 68. Proyección de franjas en color rojo sobre una zanahoria, utilizando tres pasos.....	75
Figura 69. (a) Fase envuelta del objeto para proyección de franjas en color rojo utilizando el algoritmo de tres pasos y (b) perfil de la fase envuelta del objeto.....	75
Figura 70. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura, a partir de proyección de franjas color rojo.....	76
Figura 71. Proyección de franjas en color verde sobre una zanahoria, utilizando tres pasos.....	77
Figura 72. (a) Fase envuelta del objeto para proyección de franjas en color verde utilizando el algoritmo de tres pasos y (b) perfil de la fase envuelta del objeto.....	77
Figura 73. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura, a partir de proyección de franjas color verde.....	78
Figura 74. Proyección de franjas en color azul sobre una zanahoria, utilizando tres pasos.....	78
Figura 75. (a) Fase envuelta del objeto para proyección de franjas en color azul utilizando el algoritmo de tres pasos y (b) perfil de la fase envuelta del objeto.....	79

Figura 76. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura, a partir de proyección de franjas color azul.	79
Figura 77. Perfil de la fase para la zanahoria, para diferentes proyecciones, franjas rojas, verdes, azules y en nivel de gris.	80
Figura 78. Patrones de franjas proyectados y deformados por la superficie de la zanahoria para las cuatro vistas.	81
Figura 79. Fase envuelta de la zanahoria para las cuatro vistas.	82
Figura 80. Topografía de la zanahoria con color y textura para cada una de las vistas...	83
Figura 81. Vista de la alineación de las nubes de puntos Np2 y Np3 para la zanahoria.	85

SISTEMA DE MEDICIÓN 3D BASADO EN LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN DE FRANJAS A COLOR EN EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE PRODUCTOS AGROALIMENTARIOS

Leidy Johana Quintero Rodríguez

RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados a partir de la técnica de proyección de franjas para determinar la topografía, así como la asociación del color real del objeto a partir de la toma de una fotografía a color la cual es correlacionada con la topografía. En ambos procedimientos experimentales se hace la calibración del color para el proyector y la cámara CCD. La técnica de proyección de franjas es probada en niveles de grises y en franjas a color correspondiente al rojo, verde y azul (RGB), donde el error asociado corresponde a: 1.45%, 3.23% y 3.30% para franjas RGB respectivamente.

La fase de las franjas fue obtenida mediante la técnica de desplazamiento de fase tradicional así como por desplazamiento de fase simultáneo mediante la proyección simultánea de franjas a color donde se ha introducido un corrimiento de fase de 120 grados entre las franjas RGB donde el error asociado es de .32%.

Se estudió la influencia del color de la iluminación en la medición de topografía. Comparando los resultados obtenidos con iluminaciones RGB e iluminación blanca, para un objeto blanco de referencia, donde las franjas proyectadas están en niveles de grises, se tiene los siguientes errores: .36%, .46% y .38% con iluminaciones RGB respectivamente. Cuando el objeto es iluminado con luz blanca el error corresponde a .34%. Los resultados experimentales muestran que para un mismo objeto, se obtiene diferencias en la topografía, las cuales pueden estar asociadas con el color y/o iluminación del objeto.

Con los resultados de este trabajo se pretende contribuir de manera complementaria a la evaluación de los protocolos que se implementan para la conservación de productos agroalimentarios. De manera particular se presentan resultados usando como objetos de prueba, manzanas de dos colores diferentes en un estado de maduración, y para una zanahoria en dos estados de maduración.

PRESENTACIÓN DE LA TESIS

Es importante en la industria agroalimentaria minimizar las pérdidas por la falta de calidad en sus productos. Así, las técnicas ópticas no destructivas son fundamentales para determinar la calidad externa de los productos agroalimentarios, determinando aspectos visuales tales como, color, tamaño, forma o textura, los cuales son importantes para aumentar las posibilidades de comercialización y de consumo. La determinación del estado de madurez en productos agroalimentarios presenta una serie de inconvenientes debidos a la variabilidad en el color, forma o tamaño, incluso en productos de la misma variedad.

En este trabajo se propone la técnica de proyección de franjas en niveles de gris y a color complementando con la técnica de desplazamiento de fase para obtener la topografía de manzana y zanahoria. También se propone el uso de técnicas de colorimetría para valorar el color real de frutas y hortalizas.

La topografía del objeto se obtiene proyectando franjas en niveles de gris y franjas en rojo, verde y azul (RGB), utilizando el método de corrimiento de fase para obtener información sobre su forma tridimensional.

También se muestra que es posible obtener la mayor información posible sobre el color real y la textura de un objeto, a partir de una fotografía del mismo, al ser iluminado con una fuente de luz blanca. Para esto, se realizó la calibración de color para el proyector digital, utilizando un colorímetro X-Rite II Profiler. También se realizó la calibración de color de la cámara, con la ayuda de una carta de color (Color Checker Passport) para el perfilado de los colores, para el balance de blancos, para determinar el tiempo de exposición y finalmente como una herramienta de referencia con la realidad.

Para asociar el color real a la topografía del objeto, en este trabajo se ha utilizado el concepto de una nube de puntos. Una nube de puntos es un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensionales. Estos vértices se identifican como coordenadas x , y , z y permiten realizar la representación de la superficie externa de un objeto. Generalmente las nubes de puntos se crean con un sistema de escaneo tridimensional, para medir de forma automática una gran cantidad de puntos en la superficie del objeto.

Las nubes de puntos tienen múltiples aplicaciones, por ejemplo en la elaboración de modelos tridimensionales CAD de piezas fabricadas, visualización, animación, en la inspección de calidad y para dar textura a objetos en metrología. Las nubes de puntos, al tratarse de un conjunto de información entregada por un sistema de medida, deben pasar por distintos procesos con el fin de mejorar la confiabilidad de los datos y obtener un correcto modelamiento tridimensional en una escena determinada. Para realizar esta tarea existen diferentes librerías y aplicaciones que facilitan el trabajo y ayudan a obtener resultados óptimos, entre los cuales se destacan Autocad, 3D Reshaper, Blender, 3D Studio Ma, OPENGL, PDAL y MATLAB® [1, 2].

Se presentan resultados experimentales donde uno de los parámetros corresponde al tipo de iluminación, usando la proyección de franjas en niveles de grises y proyección de franjas

en cada uno de los colores primarios. Los resultados experimentales muestran que para un mismo objeto, se obtiene diferencias en la topografía, las cuales pueden estar asociadas con el color del objeto.

En el capítulo 1 se presenta una revisión en el estado del arte de la técnica de proyección de franjas.

En el capítulo 2 se mencionan algunos conceptos importantes para entender la percepción del color por el ojo humano, el color en los materiales y cuáles son los diferentes espacios para representar un color.

En el capítulo 3 se presenta la base teórica de la técnica de proyección de franjas y se obtiene la ecuación matemática necesaria para obtener la altura de un objeto. También se describe la técnica de desplazamiento de fase y se presentan algunas ventajas y desventajas de la técnica. Finalmente se describen los pasos necesarios para implementar algoritmos de desenvolvimiento de fase.

En el capítulo 4 se describen los métodos experimentales implementados en este trabajo y se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos en cada experimento. Finalmente se presenta la topografía en un campo de 360° para una zanahoria y una manzana, con su asociación del color.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y los trabajos a futuro. También se mencionan las posibles fuentes de error debidas a la proyección de franjas a color.

1 Estado del arte

En los últimos años el uso de la técnica de proyección de franjas para la medición de la forma en 3D de una superficie, se ha centrado en realizar una búsqueda intensiva de aplicaciones, en el área de la metrología óptica. Algunas aplicaciones van desde la caracterización de componentes MEMS [3-5], aplicaciones biomédicas, tales como, diagnóstico de superficies dentales [6], monitoreo y detección de deformaciones en paredes vasculares [7], monitoreo y evaluación de pacientes con escoliosis [8], medición y localización de las partes del cuerpo humano [9] durante la administración de tratamientos a base de radioterapia para personas con cáncer [10], inspección de lesiones y medición de la topografía de la piel para aplicaciones cosmetológicas [11, 12], aplicaciones en la industria, tales como análisis de vibraciones [13], medición de deformaciones [14-16], medición de superficies rugosas [17, 18], control de calidad en el diseño de circuitos impresos (PCB) [19-21], reconstrucción 3D para reconocimiento facial [22] y preservación del patrimonio cultural (piezas arqueológicas, digitalización de monedas antiguas, entre otras) [23, 24].

La proyección de franjas con luz estructurada es una técnica basada en el principio de la triangulación [25], es similar a la estéreo visión, ya que solamente utiliza dos dispositivos (una cámara y un proyector DLP) para obtener la forma tridimensional de una superficie. La estéreo visión es otra técnica muy utilizada para obtener la forma tridimensional de un objeto [26]. En esta técnica se utilizan dos cámaras desde diferentes ángulos para adquirir un par de imágenes al mismo tiempo para extraer la información tridimensional, encontrando una correspondencia entre los píxeles de ambas imágenes [27, 28]. En la técnica de proyección de franjas se proyecta un patrón de franjas codificado, a partir de la proyección se realiza la captura de los patrones y posteriormente estos son decodificados para obtener la información tridimensional de una superficie.

Uno de los patrones estructurados más utilizado es el patrón tipo cosenoidal y los diferentes métodos que se utilizan para decodificar estas franjas son conocidos como técnicas para analizar patrones de franjas. En los últimos años, las investigaciones han estado orientadas a encontrar algoritmos más eficientes para analizar patrones de franjas, incluyendo la perfilometría a través de la transformada de Fourier [29], el algoritmo para la detección espacial de fase [30, 31], el algoritmo de desplazamiento de fase [32-34], algoritmo para el análisis de franjas a través de la transformada Wavelet [35], entre otros.

La fase óptica se puede obtener bien sea a través de una simple imagen o con dos imágenes utilizando el método de Fourier, o con múltiples imágenes aplicando un desplazamiento de fase a partir de los algoritmos propuestos en [36, 37], las diferencias entre cada algoritmo están descritas por la cantidad de imágenes, desplazamiento de fase, la susceptibilidad a errores debidas al desplazamiento de fase, ruido ocasionado por las condiciones ambientales, vibraciones y turbulencias, así como las no linealidades en el detector al registrar los valores de intensidad para cada imagen [38].

Las ventajas de la técnica de proyección de franjas digitales son: alta precisión, alta reproducibilidad, no hay presencia de componentes mecánicas, alto contraste, los patrones

de franjas generados en la computadora pueden ser cambiados fácilmente, imágenes con color, en contraste algunas desventajas que tiene la técnica son: no-linealidad, cuantización de la intensidad: el número de diferentes valores de intensidad está limitado, se genera porque las franjas son definidas por una computadora. Así el número de diferentes valores de intensidad es limitado. Normalmente se utilizan 8 bits, generando 256 niveles de intensidad diferentes. Otra clase de cuantización de la intensidad es la que se genera por la cámara, la cual tiene un número dado de niveles de intensidad, normalmente 8, 10, 12 o 16 bits [39-41].

Cuantización espacial: la pantalla del medio de proyección está separada en píxeles. La intensidad de la luz proyectada sobre un píxel se mantiene constante, la función coseno consiste en pequeñas partes espacialmente constantes. La matriz del sensor de la cámara está separada en píxeles. Cada píxel se comporta como una rejilla. Si el tamaño de la rejilla es lo suficientemente pequeño este no tiene influencia en el muestreo de una función cosenoidal continua. El muestreo de una función parcialmente constante provocará errores en la medición de la fase dependiendo del tamaño del píxel de la cámara y de la posición con respecto a los píxeles del sistema de proyección [42].

La proyección de franjas a color es una técnica recientemente estudiada como un método alternativo para reconstruir la forma de un objeto [43, 44]. Proporcionando más información en una simple imagen. Los tres canales de color (Rojo, Verde y Azul) de las cámaras han permitido satisfacer diferentes requerimientos en la metrología óptica. A partir de las características de las cámaras a color se han desarrollado trabajos generando diferentes patrones de franjas a color hasta llegar a obtener la información tridimensional de una superficie y el color con una sola toma. Para determinar la textura y el color de un objeto, se han propuesto diferentes técnicas, las cuales han sido clasificadas de acuerdo al método de medición: como de simple toma y de múltiples tomas. La proyección de franjas a color es un método sensible al color de la superficie del objeto y tienen baja precisión debido a la interferencia que se produce entre los tres canales de color RGB. Por tal razón se han investigado diferentes métodos para realizar una medición con mayor precisión. Hay dos factores que limitan la medición de una superficie, el color y la estructura interna de los proyectores y las cámaras comerciales, produciendo una superposición entre los canales RGB.

En la reconstrucción 3D entre menos tomas se tengan es más rápida la medición y la precisión es mayor, ya que menos tomas significa menor sensibilidad al movimiento del objeto, vibraciones y condiciones ambientales.

Determinar la textura y el color de un objeto es un requerimiento cada vez más importante en los diferentes campos de aplicación, tales como reconocimiento facial, realidad virtual, entre otros.

La percepción del color a través de una imagen, es un concepto subjetivo que permite determinar la calidad de una imagen a partir de la calidad para reproducir los niveles de intensidad y de color, a través de atributos como claridad, brillo, textura, rugosidad, tono y croma de la imagen real con respecto a la imagen digitalizada de una superficie. Estos parámetros están fuertemente ligados con la calibración de color, la cual se refiere

principalmente a la configuración del sistema que forma la imagen de acuerdo a parámetros conocidos que pueden producir valores consistentes y repetibles de color, los cuales están relacionados con los canales primarios de la imagen RGB y a un determinado espacio de color independiente del sistema.

La medición del color en productos agroalimentarios es una forma de controlar la calidad de estos, asegurando que cumplan con los requisitos para el consumo humano. Por ejemplo evaluando el estado de frutas y hortalizas en cuanto a forma y color, detectando defectos en las superficies por medio de procesamiento de imágenes [45], determinando el color de la carne en aves de corral [46], evaluando si es un corte claro u oscuro, ya que el color en la carne [47] tiene una relación directa con la retención de agua. Otra de las aplicaciones basadas en el estudio del color tiene que ver con determinar los niveles de estrés ocasionados por la ausencia de agua y nitrógeno en las hojas del cultivo de maíz [48-50].

2 Conceptos básicos de colorimetría

La luz produce una serie de estímulos en la retina y también genera reacciones en el sistema nervioso llamadas sensaciones cromáticas. Así el color es por lo tanto una interpretación psicofisiológica del espectro electromagnético visible. El color está definido en gran medida, por la composición espectral de la radiación que llega a nuestro ojo. Las sensaciones cromáticas dependen de la composición espectral de luz y de las propiedades de reflexión y transmisión de los objetos iluminados. Generalmente los colores que podemos observar no son los que hacen parte del espectro visible, sino en cada caso uno de los infinitos colores que resultan de la mezcla de distintos colores. Esta mezcla de colores se puede presentar de dos formas diferentes; mezcla de colores aditiva y mezcla de colores subtractiva. En este capítulo se tratarán algunos conceptos básicos sobre colorimetría, los cuales permiten identificar como el ojo humano reconoce los diferentes colores en una imagen, los cuales se forman debido a la combinación de los colores primarios. También se mencionan algunas características de las diferentes fuentes de luz y los tipos de iluminantes establecidos por la CIE (Comisión Internacional sobre Iluminación) y finalmente se mencionan algunos sistemas para representar los colores [51].

2.1 Procesamiento digital de una imagen

Una imagen digital está definida por los píxeles de la imagen que pueden estar en el plano real o pueden ser elementos de un conjunto discreto de puntos.

Los píxeles de una imagen discreta y los valores de una imagen discreta diferencian a una imagen digital.

El dominio de los índices está dado por:

$$1 \leq x \leq M \quad 1 \leq y \leq N, \quad (1)$$

El valor de M y N marcan la resolución de la imagen. El valor $A=M.N$ marcan el tamaño de la imagen. Para los posibles valores de la imagen $E(x,y)$ de un nivel de gris digital para una imagen E , $G_{max}+1$ valores de gris, son asumidos. La representación de los valores de la imagen y los tonos de gris en un número limitado de valores de gris es llamado cuantización. Para los $G_{max}+1$ valores de gris, se supone un intervalo único de enteros no-negativos. Para un valor entero de gris u se debe mantener la siguiente relación:

$$0 \leq u \leq G_{max}, \quad (2)$$

Donde el valor estándar de $G_{max}=255$, para una imagen con 8 bits por píxel.

Una imagen a color corresponde a la representación intuitivamente del color que percibimos del entorno. Computacionalmente, una imagen a color es tratada como una función vectorial (generalmente con tres componentes). El rango de la función de la imagen es un vector espacial, que se le dará una norma que es también llamada espacio de color [52].

Para una imagen digital a color \mathbf{C} (con tres canales), tres componentes vectoriales u_1, u_2, u_3 están dadas para un pixel de la imagen (x, y) .

$$\mathbf{C}(x, y) = (u_1(x, y), u_2(x, y), u_3(x, y))^T = (u_1, u_2, u_3)^T, \quad (3)$$

El color representado por la combinación de un valor concreto de las componentes u_1, u_2, u_3 son componentes relativas [53]. Cada uno de los vectores $(u_1, u_2, u_3)^T$ con las componentes enteras generalmente para un dominio de:

$$0 \leq u_1, u_2, u_3 \leq G_{\max}, \quad (4)$$

Ejemplos de espacios de color son el espacio de color RGB , el cual es utilizado para representar una imagen a color en un monitor (mezcla aditiva de color), o el espacio de color $CMY(K)$, el cual es utilizado para imprimir una imagen a color (mezcla sustractiva de color).

Una imagen a color es denotada como una imagen de color real si las componentes del vector de la imagen a color digitalizada representan las transmisiones espectrales de luz visible. La creación de una imagen de color real, resulta por lo general de utilizar una cámara CCD a color, la cual comercialmente tiene una cuantificación de 8 bits por canal de color.

Una imagen de falso color corresponde fundamentalmente a una imagen de color real, sin embargo, se tienen una diferencia, ya que en las regiones que están fuera del rango de la longitud de onda para la luz visible, se asignan componentes al vector de la imagen a color. Un ejemplo de ello, es una imagen infrarroja cuya información no contiene luz visible. Para su representación y visualización, la información del espectro infrarrojo es transformada dentro de la región de la luz visible [54].

El término de imagen de falso color (*pseudocolor*) es utilizado si los píxeles seleccionados de la imagen son recodificados o coloreados, es decir, para estos píxeles de la imagen, el valor de la imagen asociado (valor de gris o vector de color) es sustituido por un determinado vector de color. La imagen original puede ser una imagen en nivel de gris en la cual las regiones significativas serán re-codificadas en color. La selección de los vectores de color es con frecuencia arbitraria y sirve únicamente para mejorar la visualización de los diferentes dominios de la imagen.

Otro ejemplo de una imagen en *pseudocolor* es una imagen de color verdadero en la cual los vectores de color son re-codificados. Esto puede ser utilizado para hacer énfasis especial en la coloración de algunas zonas de una imagen o para disminuir el número de distintos vectores de color en la imagen. El último caso es implementado para reducir la cuantización del color (por ejemplo para 256 colores). Mientras en años iniciales muchas estaciones de trabajo podían representar solamente 256 colores, las estaciones de trabajo de la actualidad ofrecen una representación del color verdadero con una cuantización de 8 bits por cada componente de color (por ejemplo 24 bits por cada píxel de la imagen o 16 millones de colores). Reducir el número de diferentes vectores de color en la imagen puede también ser utilizado para reducir la cantidad de información de la imagen que está almacenada. Una

imagen en un formato de 8 bits requiere menos espacio de almacenamiento que una imagen en un formato de 24 bits para el color verdadero [55]. La cuantización del color es realizada en general mediante el uso de colores indexados.

2.1.1 Color en los materiales

El color de la luz emitida por un cuerpo caliente o cálido está definido por su espectro de emisión [56]. Así, todos los objetos emiten luz cuando son calentados (se presenta un incremento en la temperatura), produciendo cambios en la intensidad y en el color de la luz que emiten estos. Por ejemplo, el brillo y el color de un cuerpo negro dependen de su temperatura. Entre más alta, su brillo es más grande y la luz que emite, es más azul. Ahora bien, para bajas temperaturas, su brillo es más bajo y la luz que emite, es roja o infrarroja [57, 58].

Cuando un objeto es iluminado, la luz es transmitida, reflejada, dispersada o absorbida. Estos cuatro procesos pueden producir un cambio en la luz, ya que no todas las longitudes de onda son igualmente transmitidas, reflejadas, dispersadas o absorbidas. Si los átomos, moléculas o partículas de un cuerpo están más separados que la longitud de onda de la luz, no se presenta el proceso de esparcimiento. Entonces, tenemos un cuerpo transparente, donde solamente toman lugar la reflexión, absorción y transmisión [59]. Los átomos y moléculas que conforman el material que está siendo iluminado tienen ciertas frecuencias de resonancia donde absorben la luz y el calor del material, en lugar de reflejarla o transmitirla. De forma más simple los átomos tienen sus frecuencias de resonancia en el visible y en el ultravioleta. Por otra parte, las moléculas pueden vibrar o rotar, por el movimiento de los átomos (unos con respecto a otros). Como la masa de las moléculas puede ser relativamente grande, ellas frecuentemente tienen resonancias en el infrarrojo o hasta la región de las microondas, pero también pueden tener resonancias en el visible [60].

En general, los materiales están formados por diferentes tipos de átomos y moléculas. Estos dan a los materiales una característica espectral de transmisión o reflexión. Así, cada material opaco o transparente tiene un color característico propio cuando es iluminado con luz blanca.

2.2 Fuentes de luz y tipos de iluminantes

Las fuentes de luz existentes se pueden dividir en dos categorías: naturales y artificiales. Una fuente de luz natural se produce por el sol y su color depende de las condiciones del clima, por ejemplo, en un día despejado el color de la luz solar tiende a ser más rojizo, mientras que en un día nublado tiende a ser más azulosa.

La temperatura del color de una fuente de luz, se define comparando su color dentro del espectro luminoso, con el color de la luz que emitirá un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada. Ésta permite describir el espectro de luz y las cantidades relativas de diferentes longitudes de onda que una fuente luminosa puede emitir. Como es por

radiación, es medida en grados Kelvin (K). En la Figura 1 se puede observar la escala de temperatura para el color [61].

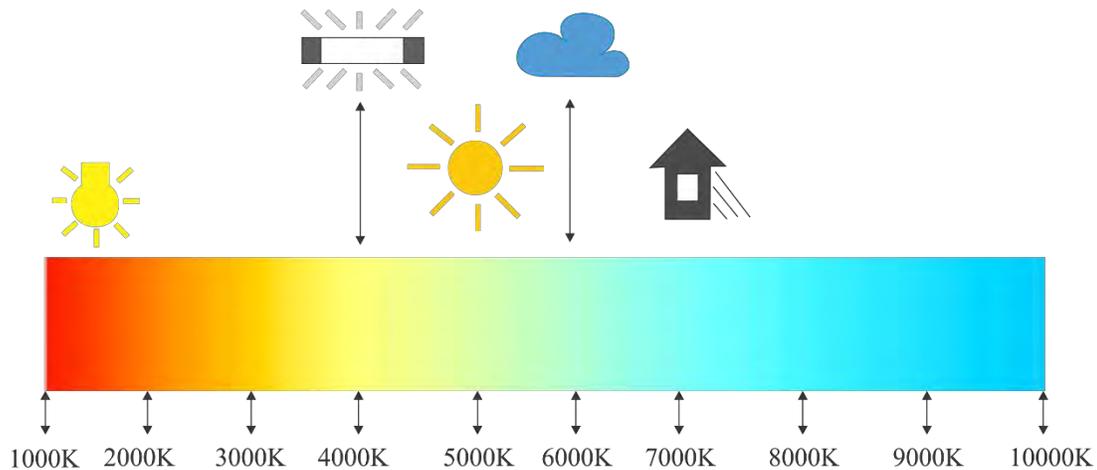


Figura 1. Escala de temperatura del color en grados Kelvin (K).

Las fuentes de luz estándar y los iluminantes estándar [62] tienen conceptos ligeramente diferentes. Desde un punto de vista formal, una fuente de luz estándar existe en la vida real y puede ser físicamente apagada o encendida. Por otra parte, los iluminantes estándar son descripciones matemáticas de fuentes de luz ideales. Sin embargo, algunas fuentes de luz están especialmente diseñadas y construidas para imitar iluminantes, haciendo sus características casi equivalentes para propósitos prácticos. En 1931 la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) recomendó utilizar unos patrones tanto para el observador como para la fuente de iluminación. Así, la especificación del color sólo depende de la reflectancia espectral o transmitancia espectral, en su caso, del objeto. Para el observador la CIE establece, mediante las funciones de mezcla, los Observadores Patrón 1931 o 1964, dependiendo del ángulo subtendido por la muestra [63].

Como fuentes de iluminación la CIE propone diversas contribuciones espectrales relativas, llamadas iluminantes y ha regularizado las fuentes de luz en función de la cantidad de energía emitida en cada longitud de onda (distribución relativa de energía espectral $S(\lambda)$).

Los iluminantes más importantes son: luz diurna (D65 o C), luz incandescente A, tubos fluorescentes (F2, F11).

El iluminante D65, es una aproximación de la luz media diurna (incluyendo la región de longitud de onda ultravioleta) con temperatura de color correlativa de 6540 K. Generalmente se utiliza para medir especímenes que sean iluminados por luz diurna incluyendo radiación ultravioleta. En la Figura 2 se puede observar la distribución espectral para el iluminante D65.

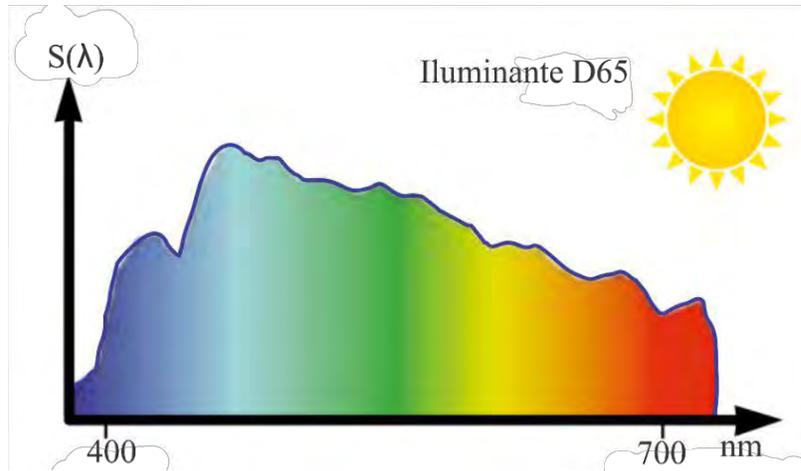


Figura 2. Distribución espectral relativa del iluminante D65 o C.

El iluminante A está compuesto por una bombilla incandescente con un filamento de Tungsteno, con una temperatura correlativa de 2865 K, la cual corresponde con la del cuerpo negro. Generalmente es utilizada para medir especímenes que se iluminan mediante lámparas incandescentes, su distribución espectral de potencia se puede observar en la Figura 3.

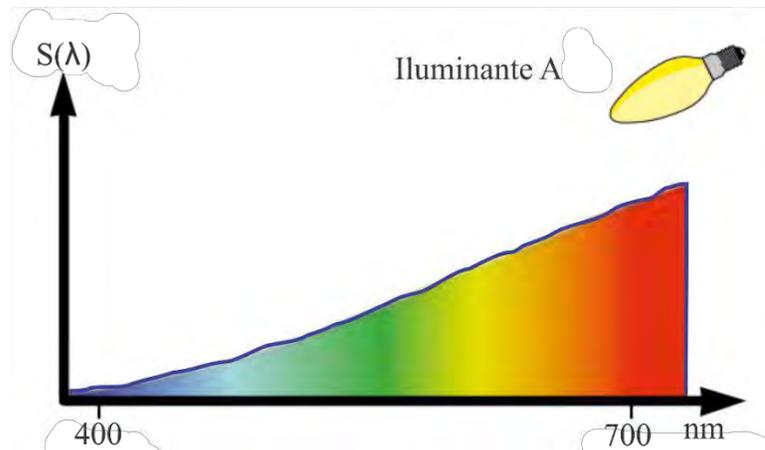


Figura 3. Distribución espectral relativa del iluminante A.

El iluminante F sirve para estandarizar lámparas y tubos fluorescentes. Este iluminante describe la luz normalizada de los tubos y lámparas fluorescentes de uso más común en las oficinas y ambientes de trabajo usuales, describen luces de dos emisiones [64] y su distribución espectral de potencia se puede observar en la Figura 4.

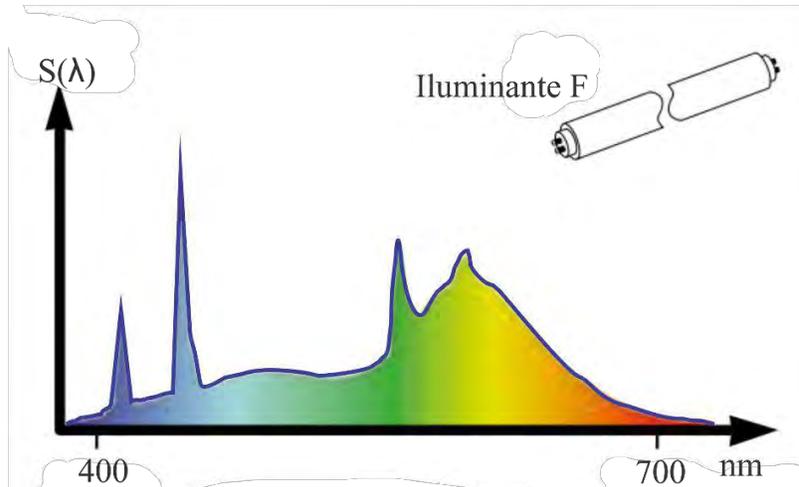


Figura 4. Distribución espectral relativa del iluminante F.

Así, el color percibido de un objeto que es iluminado por una fuente de luz, no solamente tiene que ver con su color intrínseco o reflectividad espectral, sino también con la potencia espectral de la fuente de luz. La percepción del color de un objeto depende de tres factores: el observador, el objeto mismo y la fuente de iluminación, como se observa en la Figura 5. Por lo tanto, se puede considerar a la capacidad de absorción de un material como el color propio del objeto y la composición espectral de una fuente de luz como su color luminoso [65].

Los objetos que absorben energía lumínica, usualmente pueden emitir esa energía a longitudes de onda más largas en forma de calor. Los objetos que reflejan luz no cambian las características espectrales de la luz, la reflexión puede ser regular o difusa. Los objetos que refractan luz, inclinan y parcialmente reflejan los rayos de luz debido a la superficie del objeto, porque la luz cambia su velocidad al moverse entre materiales. Los objetos que dispersan luz, reflejan energía luminosa en diferentes ángulos [66]. La dispersión puede ocurrir durante la reflexión o transmisión.

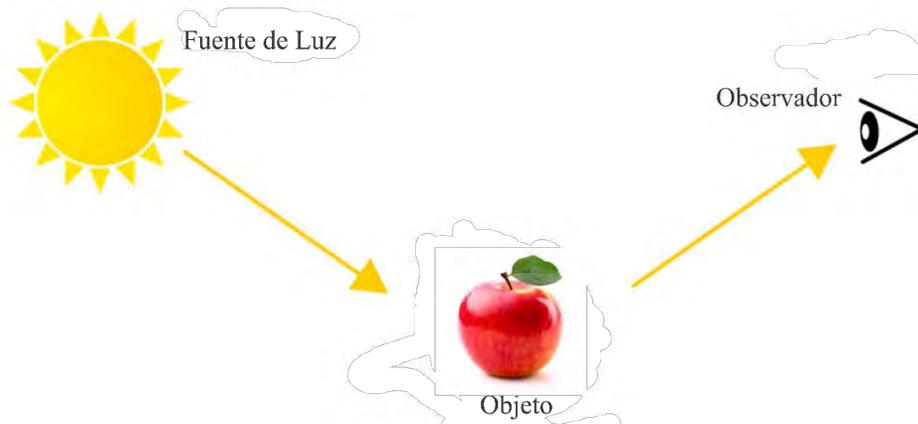


Figura 5. Elementos esenciales para percibir el color.

2.3 Percepción del color

El color que percibimos en nuestro entorno está dividido en dos clases: cromático y acromático. Los niveles de gris que van del negro al blanco son denotados como colores acromáticos. Los colores cromáticos, los cuales percibimos en las superficies de los objetos, se pueden caracterizar por tres componentes: tonalidad (*hue*), saturación (*saturation*) y luminosidad (*luminance*) o brillo (*brightness*). Estas tres componentes del color son necesarias para describir la visión del color [67].

La cromaticidad es una propiedad psicofísica de la calidad de un color, la cual es independiente de su luminancia. La cromaticidad se compone de dos atributos o parámetros independientes, con frecuencia especificados como tonalidad (*hue*) y saturación o intensidad. La tonalidad describe el tipo de cromaticidad que tiene un color y está indicada generalmente con palabras como *rojo*, *verde* y *azul*. La tonalidad también puede estar representada en una serie cerrada desde rojo a naranja, amarillo, verde, azul, violeta, púrpura, luego a rojo en un círculo de color. La saturación describe la pureza de un color, o la medida del grado para el cual la pureza de un color es rebajada por la luz blanca. Como la saturación decrece, los colores aparecen cada vez más descoloridos. La pureza o croma de un color es un atributo del color, es proporcional a la cantidad de intensidad que tiene. Por ejemplo, cuando se mezclan dos colores, uno blanco y otro rojo, se podrá observar que cuanto mayor es la proporción de la pintura roja, más intenso será el color resultante. Esto se relaciona con el aumento de pureza (o de croma) del color.

La luminosidad de un color es una característica psicofísica y se identifica con la propiedad de los materiales de reflejar, en mayor o menor grado, la cantidad de luz que lo ilumina. La luminosidad está caracterizada por el valor trimesístimulo *CIE Y*, el cual representa el valor porcentual de la reflectancia luminosa respecto del difusor perfecto. Un difusor perfecto es un objeto que sigue la Ley de Lambert, el cual posee una luminancia constante independiente del ángulo de incidencia del haz de luz que lo ilumina. La CIE ha establecido que el blanco de referencia sea el Difusor Perfecto. La luminosidad describe un atributo del color, entonces indica que tan claro u oscuro es.

La percepción del color se debe a unas células situadas en la retina ocular, llamadas conos. Existen tres tipos de conos, encargados de percibir cada uno de los tres colores primarios de la luz (el azul, el verde y el rojo). El cerebro utiliza la información proveniente de los conos para determinar la percepción del color.

Para una persona no daltónica, la combinación de estos tres colores le permite discernir de una muy amplia gama de tonalidades intermedias (percibir alrededor de 8000 colores y matices con un determinado nivel de luminancia).

El primer paso para la representación del color ocurre en la retina. La diferencia entre la visión de día y de noche en los humanos debe primero ser distinguida. El proceso de visión bajo las condiciones de iluminación de la luz del día es denotado como *visión fotópica*, la función de los conos en este proceso es comportarse como receptores. Los conos son estimulados por la luz del día. La visión que ocurre bajo las condiciones de iluminación de

la noche es llamada *visión escotópica*, la cual carece de color, su agudeza visual es baja y la recepción de luz es principalmente con los bastones de la retina. Los bastones de la retina son sensibles a niveles muy bajos de iluminación, contienen un pigmento cuyo máximo de sensibilidad se encuentra en la zona de los 510 nanómetros (zona de los verdes). La *visión mesópica* es una visión intermedia que se da en situaciones de iluminación, que sin llegar a la obscuridad total, tampoco llegan a ser la luz en día a pleno sol. Se trata principalmente, del tipo de visión empleado en condiciones de luz artificial, donde tanto conos como bastones actúan en este tipo de visión.

La agudeza visual y la visión del color están muy bien marcados en la visión fotópica, y la ubicación de la mayor agudeza visual se encuentra en el centro de la fovea central. En contraste, solamente colores acromáticos pueden ser percibidos en la *visión escotópica*.

Cuando uno de los tres tipos de conos falta o funciona defectuosamente, se presenta el trastorno conocido como daltonismo o ceguera al color. El daltonismo es una alteración de origen genético que afecta la capacidad de discriminar los colores. Por lo general entre verdes y rojos, y ocasionalmente azules.

Existen varios tipos de daltonismo en función del cono afectado. La más frecuente, es la ceguera para el rojo o el verde. Está se da en el 8% del género masculino y el 1% del género femenino. Al faltar uno de estos conos, las tonalidades de luz que le deberían corresponder al cono son captadas por otro, de modo que una persona con este defecto identifica los dos colores como un único color. La alteración menos frecuente es la ceguera para el azul, en la que faltan los conos responsables de este color y la persona no es capaz de distinguir entre los tonos azules y los amarillos. Solamente los conos se encuentran localizados en el área de la fovea central y no los bastones. Es por ello que es muy difícil enfocar durante la *visión escotópica*.

Thomas Young y *Hermann von Helmholtz* propusieron la hipótesis de que la visión del color está basada en tres diferentes tipos de conos que son especialmente sensibles a longitudes de onda largas, media y corta. Esta hipótesis es también llamada teoría de los tres colores o teoría tricromática ya que los tipos de conos sensibles a longitudes de onda largas, medias, y cortas están también designados como conos rojos, verdes y azules.

2.3.1 Espacios de color y distancias de color

El color es un fenómeno percibido y no una dimensión física como la longitud o la temperatura, aunque la radiación electromagnética de la longitud de onda del espectro visible es medible como una cantidad física. La identificación del color a través de los datos del espectro no es útil para etiquetar un color. Una forma adecuada de representación debe ser encontrada para el almacenamiento, visualización y procesamiento de imágenes a color. Estas representaciones deben ser adecuadas de acuerdo con los requerimientos matemáticos de un algoritmo para el procesamiento de imágenes a color, a las condiciones técnicas de una cámara, impresoras, o monitores, y también a la percepción visual del color. Estas demandas no se pueden cumplir completamente de forma simultánea. Por esta razón, son utilizadas

diferentes representaciones para procesar una imagen a color de acuerdo con el objetivo del procesamiento. Los espacios de color indican el sistema de coordenadas para el color, en el cual están representados los valores de la imagen a color. La diferencia entre dos valores de la imagen en un espacio de color es llamado distancia del color.

2.3.2 Sistema de color estándar

El modelo de la mezcla aditiva de color es utilizado cuando luz con diferentes longitudes de onda llegan a un lugar idéntico en la retina o en la imagen del sensor. Debido a la primera Ley de *Grassmann*, para la mezcla aditiva de color, cualquier radiación visible que penetre en el ojo que produzca una sensación de color, sea cromática o acromática se puede relacionar únicamente a un conjunto particular de tres estímulos para los colores primarios, siempre que cada estímulo de color primario sea independiente. Se entiende por mezcla aditiva de color a la combinación de dos estímulos que actúan de forma que entran en el ojo simultáneamente e inciden en la misma zona de la retina. Para especificar una mezcla de color son necesarias tres variables independientes. De esta condición se deriva el nombre de “triestímulo” y de “colorimetría tricromática” y el principio según el cual todos los tonos de color pueden igualarse con una adecuada mezcla de tres estímulos diferentes, siendo la única condición a la hora de elegirlos que ninguno de ellos pueda obtenerse (igualarse) como mezcla de otros dos. Esto quiere decir que ninguno de los tres iluminantes o valores elegidos pueda obtenerse por mezcla de los otros dos. La primera Ley de *Grassmann* para la mezcla de color se puede escribir matemáticamente como:

$$\mathbf{M} = R.\mathbf{R} + G.\mathbf{G} + B.\mathbf{B}, \quad (5)$$

Donde R , G y B son la luminancia, en lúmenes, de tres fuentes de referencia (colores primarios) \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} necesarias para producir una mezcla de color \mathbf{M} . Lo esencial de esta Ley es que existe una y sólo una combinación de tres primarios que igualan cualquier color percibido.

La expresión (5) también es válida para un determinado conjunto \mathbf{M} de n colores. Por lo tanto se puede reescribir como:

$$\mathbf{M} = \{M_i | i = 1, \dots, n\} \text{ con } \mathbf{M}_i = R_i.\mathbf{R} + G_i.\mathbf{G} + B_i.\mathbf{B}, \quad (6)$$

Los estímulos que evocan la misma apariencia de color producen resultados idénticos en mezclas aditivas de colores. Este segundo principio significa que estímulos con características físicas diferentes, por ejemplo con distribuciones espectrales de radiancia (flujo radiante), pueden igualar el mismo color. Estos estímulos que físicamente son diferentes permiten obtener la misma igualación de color, son llamados metámeros y el fenómeno llamado metamerismo [68] se presenta cuando una misma igualación de color consiste en diferentes componentes de la mezcla. Matemáticamente se puede expresar como:

$$\mathbf{M}_1 = R_1.\mathbf{R} + G_1.\mathbf{G} + B_1.\mathbf{B},$$

$$\mathbf{M}_2 = R_2 \cdot \mathbf{R} + G_2 \cdot \mathbf{G} + B_2 \cdot \mathbf{B},$$

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_2,$$

$$R_1 \cdot \mathbf{R} + G_1 \cdot \mathbf{G} + B_1 \cdot \mathbf{B} = R_2 \cdot \mathbf{R} + G_2 \cdot \mathbf{G} + B_2 \cdot \mathbf{B}, \quad (7)$$

En una expresión de color la igualdad no varía si ambos miembros se multiplican por una constante K (Ley de la proporcionalidad). Esto indica que una vez igualado un estímulo las proporciones de cada componente de la mezcla aditiva no cambian cuando lo hace la luminancia del estímulo de color.

Si se suman dos colores, evaluados con los mismos estímulos de referencia, la suma algebraica de ambos, es equivalente a la suma algebraica de las cantidades de los estímulos de referencia necesarios para igualar los colores en cuestión (Ley de aditividad). Matemáticamente se puede expresar como:

$$\mathbf{M}_1 = R_1 \cdot \mathbf{R} + G_1 \cdot \mathbf{G} + B_1 \cdot \mathbf{B},$$

$$\mathbf{M}_2 = R_2 \cdot \mathbf{R} + G_2 \cdot \mathbf{G} + B_2 \cdot \mathbf{B},$$

$$\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 = (R_1 + R_2) \cdot \mathbf{R} + (G_1 + G_2) \cdot \mathbf{G} + (B_1 + B_2) \cdot \mathbf{B}, \quad (8)$$

Así, sobre la base de esta propiedad se constituye toda la colorimetría actual. Este conjunto de propiedades se conoce como leyes de las mezclas cromáticas o leyes de *Grassman*.

2.3.3 Mezcla aditiva de colores

Cuando sobre el ojo humano incide una determinada radiación, sea una única frecuencia o sea un conjunto de varias frecuencias, es posible percibir algo que denominamos color. Si modificamos la radiación, añadiéndole una o varias frecuencias más, entonces se realiza una mezcla aditiva, ya que sobre el ojo incide, aparte de la primera radiación, las radiaciones nuevas que se han añadido. Ahora, para reproducir un color es necesario mezclar tres colores. La mezcla debe hacerse en una proporción adecuada de los tres colores, y los tres números que expresan la proporción de la mezcla deberán servir para caracterizar el color reproducido. A partir de esta idea, se ha desarrollado un sistema de coordenadas en el que cada color real (tanto monocromático como de espectro continuo) estará definido por tres números.

Se eligen tres estímulos primarios, preferiblemente espectrales. Se escoge un color de un extremo del espectro (violeta o azul), uno del centro (verde) y uno del otro extremo (rojo). Por consiguiente, se pueden representar por $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ y $B(\lambda)$.

Ahora si se combinan dos fuentes de luz con densidades espectrales de potencia (luminancia).

Sean las dos fuentes $\mathbf{M}_1(\lambda)$ y $\mathbf{M}_2(\lambda)$, la luz resultante, $\mathbf{M}(\lambda)$, se obtiene como:

$$\mathbf{M}(\lambda) = \mathbf{M}_1(\lambda) + \mathbf{M}_2(\lambda), \quad (9)$$

Debido a la suma de las fuentes, este método recibe el nombre de “Sistema Aditivo de Color”. Si sumamos fuentes luminosas con diferentes longitudes de onda (λ), es posible generar diferentes colores, denominados primarios del sistema de mezcla aditiva de color, los cuales son el Rojo, el Verde y el Azul. La razón por la que se utilizan estos colores es que al ser combinados de forma adecuada, es posible conseguir una gama de colores distintos, mucho más amplia que para otras combinaciones de colores [69].

Según la teoría tricromática de la visión del color, un observador puede igualar un estímulo de color mediante una mezcla aditiva de tres colores primarios. Por tanto, un estímulo cromático se puede especificar mediante la cantidad de colores primarios que un observador necesitará para igualar o hacer corresponder ese estímulo. La sensibilidad del ojo humano varía de acuerdo a la persona, con frecuencia causando que el color parezca diferentes según cada individuo. Esta subjetividad lleva a inconsistencias cuando se evalúa el color. A raíz de esto, se establecieron funciones para estandarizar cómo es medido el color de un objeto, incluyendo el campo de visión. Así, un observador estándar, es el resultado de experimentos en los que se pidió a los sujetos del mismo que establecieran una igualdad entre longitudes de onda monocromáticas con mezclas de los tres colores primarios aditivos.

La sensibilidad del color por parte del ojo humano cambia dependiendo del ángulo de vista. Por esta razón, en 1927 se realizó un experimento de igualación de color para determinar cómo una persona promedio percibe el color. Este experimento consistió en que varios sujetos observaran a través de un agujero e igualar cada color en el espectro combinando varias intensidades de luces rojas, verdes y azules. El agujero sólo permitía un ángulo de visión de 2° , ya que se creía que la córnea sensible al color estaba localizada en un arco de 2° en la fovea, región de la retina. En base a las respuestas de este experimento, se juntaron los valores para indicar cómo el ojo humano promedio, percibe los colores en el espectro con un ángulo de visión de 2° . Así la CIE en 1931, definió originalmente el observador estándar utilizando un campo de vista de 2° (Observador estándar de 2°), éste se debe utilizar para ángulos de visualización de 1 a 4° . En 1964, la CIE definió un observador estándar adicional, esta vez basado en un campo de vista de 10° (Observador estándar suplementario de 10°), se debe emplear para ángulos de visualización de más de 4° .

Un observador estándar, indica cuánto de cada primario necesita un observador para igualar cada longitud de onda. Las funciones de coincidencia de color son los valores triestímulos del espectro de igual energía en función de la longitud de onda. Estas funciones se han concebido para que correspondan con la sensibilidad del ojo humano. Por esta razón se han especificado conjuntos independientes de las funciones de coincidencia de tres colores para el observador estándar de 2° y para el observador estándar suplementario de 10° . Cada curva representa uno de los tres colores primarios de luz. La longitud de onda y la potencia espectral relativa de los valores primarios se pueden observar en la Figura 6.

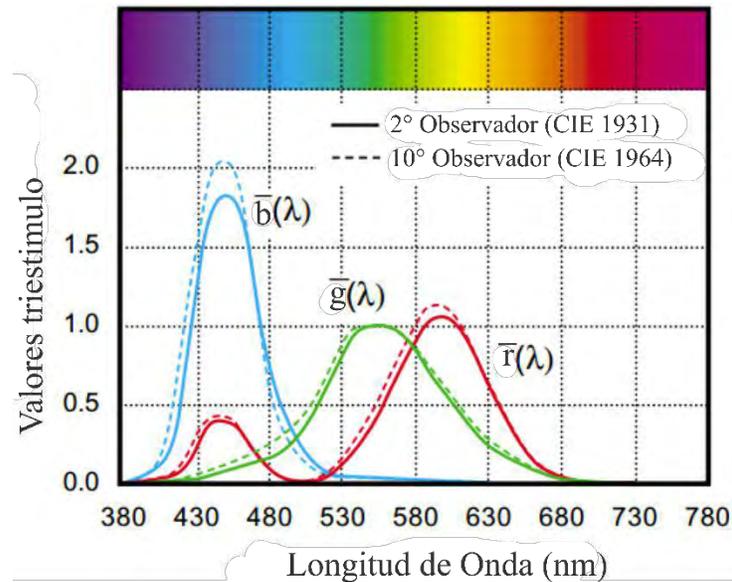


Figura 6. Representación de las funciones para las combinaciones de color de la CIE (funciones de correspondencia).

El color depende de la distribución espectral de la luz. Entonces, si prevalecen longitudes de onda largas del espectro visible, la luz se percibirá color rojo, si prevalecen las del medio el espectro de luz se percibirá verde o si está concentrado en las bajas longitudes de onda se percibirá azul. Ahora si se combinan todas las longitudes de onda del espectro visible, en aproximadamente cantidades iguales, el ojo percibe una luz color blanca, como la luz del sol [70].

Los colores del espectro visible y sus infinitas posibilidades de mezcla, se pueden representar matemáticamente. Existen varios sistemas de representación entre los que se cuentan el “*Sistema Munsell*”, el “*CIE L*a*b**”, el “*CIE L*c*h*” y el “*CIE XYZ*”.

El sistema *Munsell*, es una forma precisa de especificar y mostrar las relaciones entre los colores. Conocido como el árbol del color, fue desarrollado por Munsell en 1936. En este sistema el color del objeto a través de las tres coordenadas características que informan de la longitud de onda predominante. Se emplean las tres dimensiones físicas del color: valor, tono y saturación. Este sistema permite clasificar y ordenar los colores en una secuencia lógica, además permite que un color pueda describirse con exactitud, analizando sus diferencias con otros colores de modo que se puedan comprender y especificar. Se trata de un sistema de coordenadas similar a una esfera, en el que los colores se definen físicamente por su espectro y se describe en un modelo tridimensional.

Munsell establece en su teoría diez tonos: Rojo, Amarillo-Rojo, Amarillo-Verde, Verde, Azul-Verde, Azul, Púrpura-Azul, Púrpura y Rojo-Púrpura. Los tonos se disponen de forma ordenada alrededor del perímetro del cilindro por tanto que la saturación del color aumenta a lo largo de un radio que se aleja desde el eje central, estando los colores más puros en la periferia. En este sistema hay un eje acromático que se extiende verticalmente a lo largo del eje sólido del color; por tanto, la coordenada de valor L varía a lo largo de la longitud del

cilindro desde el negro en el extremo inferior, al que se le da un valor de 0, hasta el blanco en el extremo superior, al que se le da un valor de 10, pasando por el gris neutro y en el centro los 9 niveles van ascendiendo a los largo de este eje sólido del color. En la Figura 7 se puede observar la representación gráfica del sistema *Munsell*.

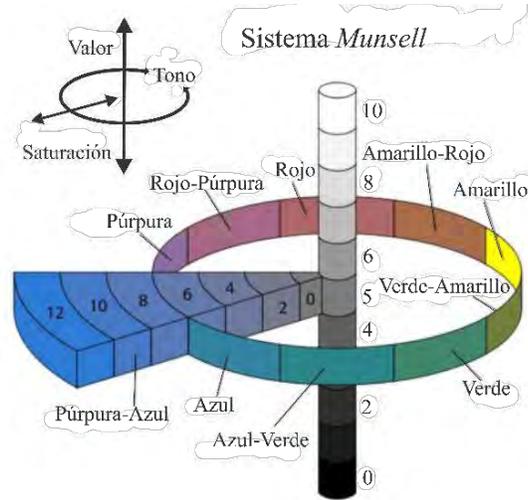


Figura 7. Sistema *Munsell*.

El espacio de color $L^*a^*b^*$ contiene todos los colores que podemos observar, están incluidos los colores que se utilizan cuando se trabaja en los modos *RGB* y *CMYK*. Cuando un color se expresa en *CIE L*a*b**, la L^* define la claridad, a^* denota el valor rojo/verde y b^* denota el valor amarillo/azul. Para la determinación de los espacios de color $L^*a^*b^*$ se tienen las siguientes expresiones:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/\beta} - 16 \quad \text{si} \left(\frac{Y}{Y_n} \right) > 0.008856, \quad (10)$$

$$L^* = 903.29 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/\beta} - 16 \quad \text{si} \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \leq 0.008856, \quad (11)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{Y}{X_n} \right)^{1/\beta} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/\beta} \right], \quad (12)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/\beta} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/\beta} \right], \quad (13)$$

Donde: X, Y, Z son los valores triestímulo *CIE* calculados para el objeto a caracterizar. X_n, Y_n, Z_n , son los valores X, Y, Z para el blanco de referencia elegido. En la Figura 8 se puede observar el diagrama para graficar el color para $L^*a^*b^*$. El eje a^* corre de izquierda a derecha. Una medición de color en la dirección $+a^*$ muestra un desplazamiento hacia el rojo. En el eje b^* un movimiento hacia $+b^*$ representa un cambio hacia el amarillo. El centro del

eje L^* muestra $L=0$ (negro o absorción total) en el fondo. En el centro de este plano es neutro o gris.

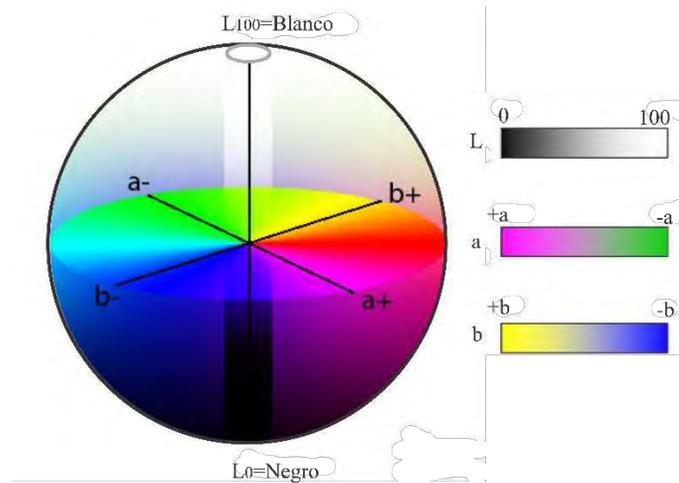


Figura 8. Diagrama de color $CIE L^*a^*b^*$.

El $CIE L^*a^*b^*$ es el modelo cromático utilizado normalmente para describir todos los colores que puede percibir el ojo humano y fue desarrollado por la CIE.

En el sistema de medición $CIE XYZ$, Y significa la luminosidad, Z es aproximadamente igual al estímulo de azul y X es una mezcla tendiente a la curva de sensibilidad del rojo al verde. En la actualidad, este sistema se utiliza como referencia para definir los colores que son percibidos el ojo humano y otros espacios de color. El modelo RGB se basa en colores primarios aditivos. Por el contrario, el $CIE XYZ$ se basa en tres primarios imaginarios con caracterización espectral (X , Y , Z), que son los que representan el color (ondas electromagnéticas). Éstos son combinados para formar todos los colores visibles por el observador estándar.

Cuando se especificó el sistema CIE se decidió utilizar tres primarios imaginarios tales que los valores triestímulos X , Y , Z fueran siempre positivos para todos los estímulos reales posibles. La CIE diseñó su sistema de forma que uno de sus valores triestímulos – el valor Y – sea directamente proporcional a la luminancia de total de la mezcla aditiva, esto es, con una sensibilidad espectral correspondiente a la sensibilidad luminosa del ojo humano. La luminancia Y de una fuente luminosa se obtiene de forma continua por integración de la distribución espectral de potencia respecto a su función de mezcla de color para un observador estándar. Cuando a la luminancia Y se añaden las otras dos componentes X y Z (sin luminancia), calculadas por medio de la integración de las otras dos funciones de obtención del color, se obtienen las componentes conocidas como valores triestímulos XYZ que tienen la propiedad de llevar incluidas las características espectrales de la percepción del color [71].

Es conveniente tener una representación del color “puro” en ausencia de la luminancia. La CIE estandarizó un procedimiento para obtener dos valores cromáticos x e y a partir de los valores triestímulos XYZ , que se obtienen por medio de una transformación proyectiva.

La cromaticidad de un color se determina a través de dos parámetros derivados x e y , dos de los tres valores normalizados, en función de los tres valores X , Y y Z :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (14)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (15)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y, \quad (16)$$

Así, un color puede mostrarse en un sistema cartesiano o diagrama de cromaticidad como un punto de coordenadas (x,y) tal como se puede observar en la Figura 9. El eje horizontal x muestra la cantidad de rojo de los colores. El eje vertical y indica la cantidad de verde de los colores. Las longitudes de onda puras se encuentran en los bordes de la “herradura”. El borde recto inferior representa los colores obtenidos mezclando longitudes de onda roja y azul en ambos extremos del espectro [72].

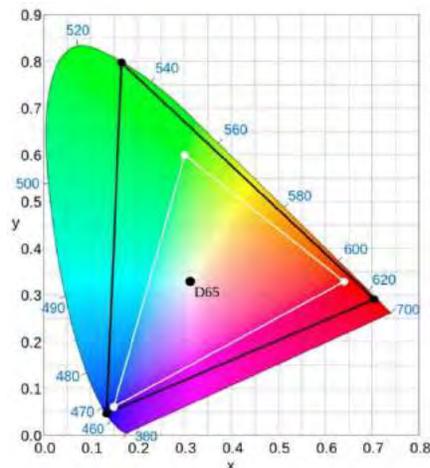


Figura 9. Diagrama de cromaticidad del espacio de color CIE xy .

3 Proyección de franjas con desplazamiento de fase

La proyección de franjas es una de las técnicas ópticas no invasivas, en la cual se utiliza luz estructurada para proyectar sobre un objeto de prueba un patrón de franjas, bien sea de tipo cosenoidal, rejilla de Ronchi o rejilla binaria. Generalmente esta técnica es ampliamente utilizada para medir la forma 3D de un objeto y es fuertemente aplicada a nivel industrial para automatizar procesos de producción. En este capítulo se presenta una revisión de la técnica de proyección de franjas con luz estructurada, se deducen las expresiones para determinar la altura de un objeto a partir de la fase desenvuelta y se mencionan algunas ventajas y desventajas de la técnica de desplazamiento de fase, la cual se implementó en el desarrollo de éste trabajo. Finalmente, se mencionan algunos algoritmos utilizados para el desenvolvimiento de fase y se describen algunos pasos.

3.1 Proyección de franjas utilizando una fuente de luz colimada

Este método consiste en proyectar una rejilla con perfil cosenoidal sobre la superficie. Esto se puede realizar a través de la interferencia entre dos ondas mutuamente coherentes o con la imagen de una rejilla [73]. Por simplicidad, se considera el caso de la interferencia entre dos ondas planas como se puede observar en la Figura 10.

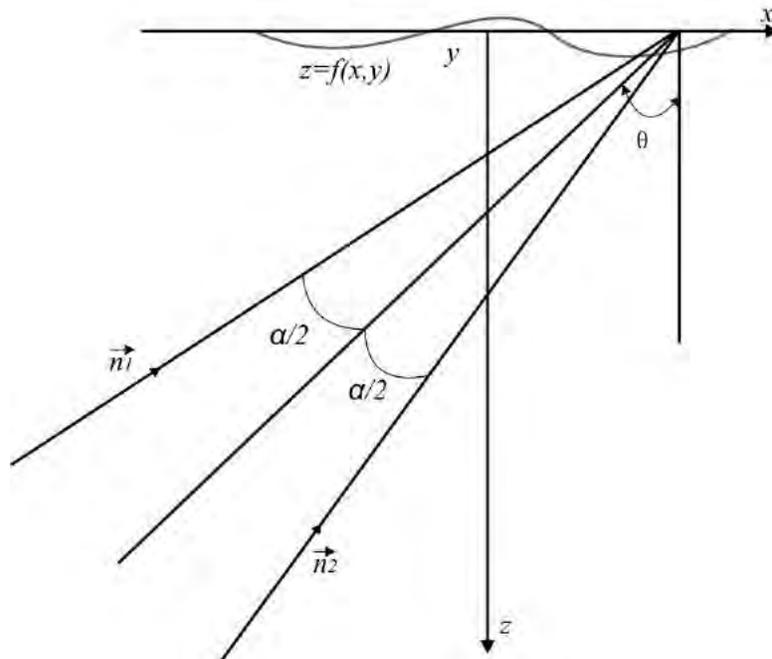


Figura 10. Proyección de franjas a través de la interferencia entre dos frentes de onda planos.

El patrón resultante entre la superposición de dos frentes de onda sobre la superficie del objeto está dado por:

$$I = 2(1 + \cos\varphi), \quad (17)$$

Este patrón representa una rejilla con perfil cosenoidal con líneas paralelas al eje y y con modulación de fase por variaciones en la altura z .

Los vectores de propagación \mathbf{n}_1 y \mathbf{n}_2 inciden sobre el plano xy formando los ángulos $(\theta - \alpha/2)$ y $(\theta + \alpha/2)$ con respecto al eje z .

Ahora se tiene que:

$$\varphi = k(\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2) \cdot \mathbf{r} = \frac{2\pi}{d}(x \cos \theta + z \sin \theta), \quad (18)$$

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)}, \quad (19)$$

El periodo de la rejilla está dado por:

$$d_x = \frac{d}{\cos \theta}, \quad (20)$$

Ahora se tiene el periodo en términos de la frecuencia como:

$$f_x = \frac{1}{d_x} = \frac{\cos \theta}{d}, \quad (21)$$

Se asume que se captura una imagen I_1 del objeto dado por $z_1 = f(x, y)$ y después se captura una imagen I_2 para el plano de referencia dada por la superficie $z_2 = f(x, y)$. Entonces se puede encontrar la diferencia entre las dos imágenes.

$$I_1 - I_2 = 2(1 + \cos \varphi_1) - 2(1 + \cos \varphi_2), \quad (22)$$

$$I_1 - I_2 = 4 \sin\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2}\right), \quad (23)$$

Observando la expresión (18) se tiene que:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{d}(x_1 \cos \theta_1 + z_1 \sin \theta_1), \quad (24)$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{d}(x_2 \cos \theta_2 + z_2 \sin \theta_2), \quad (25)$$

Se tiene que los ángulos de incidencia son iguales $\theta_1=\theta_2=\theta$, para cambios solamente en z , $x_1=x_2=x$. Así

$$I_1 - I_2 = 4 \operatorname{sen} \left[\frac{\pi}{d} (z_2 - z_1) \operatorname{sen} \theta \right] * \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi}{d} \left(x \cos \theta + \frac{z_2 + z_1}{2} \operatorname{sen} \theta \right) \right] \quad (26)$$

Esta función representa las franjas proyectadas originalmente moduladas en amplitud por el factor

$$4 \operatorname{sen} \left[\frac{\pi}{d} (z_2 - z_1) \operatorname{sen} \theta \right] \quad (27)$$

Esta función de modulación tiene un mínimo cuando:

$$\frac{\pi}{d} (z_2 - z_1) \operatorname{sen} \theta = n\pi \quad n = 0,1,2,3,\dots \quad (28)$$

Cuando:

$$\Delta z_n = z_2 - z_1 \quad n = \frac{\varphi}{2\pi} \quad (29)$$

La expresión se puede escribir como:

$$\frac{\pi}{d} \Delta z_n \operatorname{sen} \theta = \frac{\pi \varphi}{2\pi} \quad (30)$$

Finalmente se tiene que:

$$z = \frac{\varphi}{2\pi} \frac{d}{\operatorname{sen} \theta} \quad (31)$$

Esta expresión representa la topografía del objeto cuando se ilumina utilizando luz colimada [74].

La calibración de un sistema de proyección de franjas es un método para minimizar el error para la reconstrucción 3D de un objeto. Permite incrementar la precisión de los sistemas de proyección de franjas digitales que utilizan la técnica de desplazamiento de fase [75]. En los sistemas de proyección de franjas, la intensidad de la imagen y la distribución de cada patrón de franjas cosenoidales proyectados sobre la superficie a medir pueden ser fuertemente afectados por la aberración de la lente. En la técnica de proyección de franjas la adquisición de la imagen del patrón de franjas deformado por el objeto es afectada por la aberración de la lente. Por lo tanto la diferencia de fase sin escalar es afectada de manera significativa por los errores en la fuente de iluminación y la no linealidad de la diferencia de fase óptica existente entre los perfiles de la superficie [76].

3.2 Técnica de desplazamiento de fase

Un patrón de franjas es considerado como una fluctuación de una señal cosenoidal en el espacio bidimensional. El análisis de los patrones de franjas, a través de la intensidad, permite la completa recuperación de las características originales que están implícitas en el patrón de franjas. Las técnicas interferométricas de desplazamiento de fase, permiten medir cambios de intensidad para diferentes desplazamientos de fase. La fase desconocida del patrón de franjas, es recuperada utilizando diferentes técnicas [77, 78].

Un patrón de franjas idealmente se puede modelar como:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y)], \quad (32)$$

Donde $a(x,y)$ representa el fondo y contiene las variaciones en la iluminación del objeto, cambios en la reflectividad y ruido dependiente del tiempo debido a componentes electrónicas que interfieren en la captura de la imagen, $b(x,y)$ es un factor proporcional a la modulación o el contraste de las franjas $\varphi(x,y)$ es la función que representa la fase desconocida. El patrón de franjas es registrado por una cámara CCD y las variaciones de intensidad son digitalizadas en una matriz de $M \times N$ píxeles que son cuantizados en valores de niveles de gris.

$$\varphi(x, y) = 2\pi f_o(x, y) + \phi(x, y), \quad (33)$$

Donde $f_o(x,y)$ es la frecuencia de la señal portadora y $\phi(x,y)$ es un término asociado con la fase, el cual permite estimar la forma tridimensional del objeto.

Se puede observar que la expresión (32) contiene tres incógnitas, por lo que se requieren como mínimo tres interferogramas (mediciones de intensidad) para determinar la fase.

Los tres patrones de intensidad son proyectados utilizando tres valores diferentes para el desplazamiento de fase, entonces es necesario adquirir tres imágenes de las franjas con un desplazamiento de fase de $2\pi/3$ [79, 80, 81].

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos\left[\varphi(x, y) - \frac{2\pi}{3}\right], \quad (34)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y)], \quad (35)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos\left[\varphi(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right], \quad (36)$$

Ahora para describir la forma de obtener la fase envuelta se tiene la siguiente expresión:

$$I(x, y, t) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + w_o t], \quad (37)$$

En este caso $w_o t$ es la portadora temporal de la modulación. Ahora en el dominio de Fourier se tiene:

$$I(x, y, w) = a(x, y) + \frac{b(x, y)}{2} [\exp(i\varphi(x, y))\delta(w - w_o) + \exp(-i\varphi(x, y))\delta(w + w_o)], \quad (38)$$

En la Figura 11 se puede observar el espectro de Fourier para un interferograma de acuerdo al que se presenta en la expresión (39) para un valor de $w_o = 2\pi/3$.

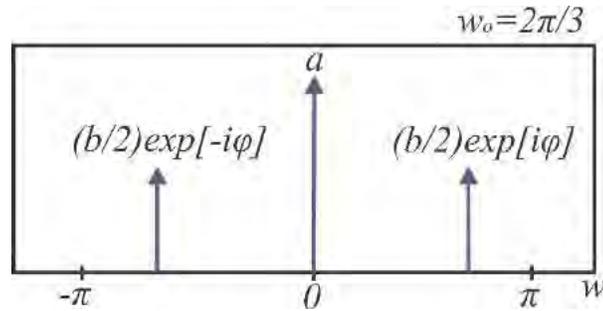


Figura 11. Espectro de Fourier para un interferograma con perfil cosenoidal con desplazamiento de fase de $2\pi/3$.

De donde la fase se obtiene a partir del algoritmo de *Phase Shifting*, el cual se describe a partir de la respuesta al impulso (39) o su transformada de Fourier para un filtro lineal en cuadratura (40).

$$h(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n \delta(t - n), \quad (39)$$

$$F[h(t)] = H(w) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n \exp(-iwn), \quad (40)$$

La transformada de Fourier para un filtro lineal en cuadratura tiene las siguientes condiciones, las cuales se pueden observar en la Figura 12.

$$H(0) = H(-w_o) = 0, \quad H(w_o) \neq 0, \quad (41)$$

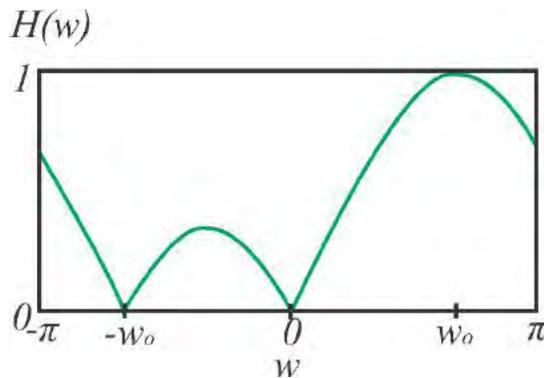


Figura 12. Función de transferencia para un filtro lineal en cuadratura

Aplicando el teorema de la convolución entre el interferograma y el filtro finalmente se obtiene el algoritmo de tres pasos (48):

$$I(w)H(w) = \frac{1}{2}b(x, y)H(w_o)\exp[i\varphi(x, y)]\delta(w - w_o), \quad (42)$$

Donde:

$$A_o = \frac{1}{2}b(x, y)|H(w_o)|\exp\{i\text{angle}[H(w_o)]\}, \quad (43)$$

De acuerdo a las condiciones anteriores, el filtro lineal de cuadratura es válido para una señal interferométrica y es posible obtener la fase aplicando el siguiente algoritmo.

$$\frac{1}{2}b(x, y)|H(w_o)|\exp\{i\text{angle}[H(w_o)]\} = I_o - (1 + \exp(-iw_o))I_1 + \exp(-iw_o)I_2, \quad (44)$$

Donde $w_o = 2\pi/3$, la expresión (48) estima la fase óptica, la cual finalmente se obtiene calculando el ángulo de la expresión compleja.

A partir de las expresiones anteriores se obtiene el mapa de fase del objeto (45) y el mapa de fase para el plano de referencia (50), como se puede observar en la Figura 13 para un objeto dado.

$$I_{Obj} = I_{Obj0} - I_{Obj1} - \exp(iw_o)I_{Obj1} + \exp(iw_o)I_{Obj2}, \quad (45)$$

$$I_{Ref} = I_{Ref0} - I_{Ref1} - \exp(iw_o)I_{Ref1} + \exp(iw_o)I_{Ref2}, \quad (46)$$

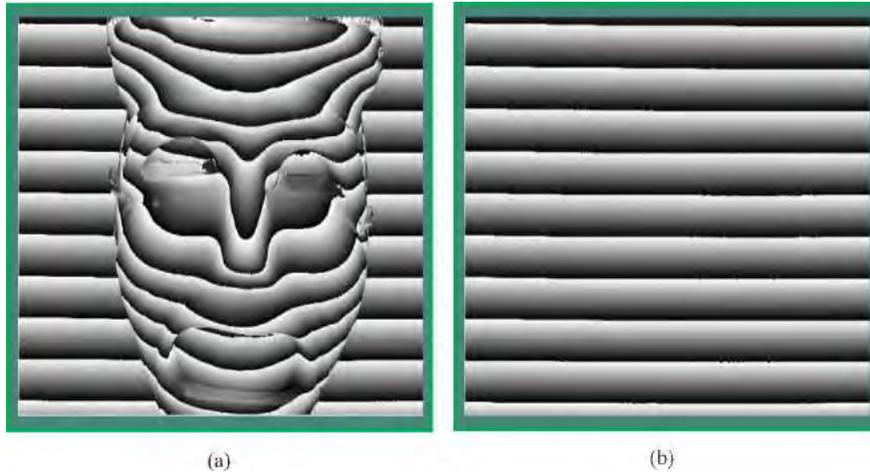


Figura 13. (a) Mapa de fase para un objeto de prueba y (b) mapa de fase para el plano de referencia

Finalmente la expresión (47) representa la fase envuelta del objeto que se obtiene a partir de la multiplicación entre el mapa de fase del objeto y la conjugada del mapa de fase para el plano de referencia. En la Figura 14 se presenta el mapa de la fase final envuelta.

$$\varphi(x, y) = \left| I_{Obj} * \left(I_{Ref}^* \right) \right|, \quad (47)$$

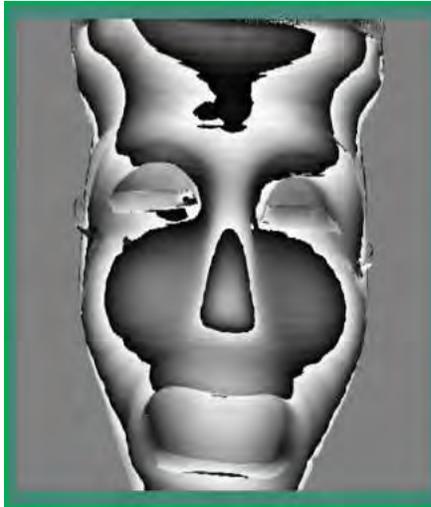


Figura 14. Mapa de fase envuelta para un objeto de prueba

3.2.1 Ventajas y desventajas del método de desplazamiento de fase

Algunas de las ventajas de la técnica de desplazamiento de fase son: facilidad computacional, permite la operación píxel por píxel para obtener el valor de la fase, evitando que se pierda resolución espacial, es posible aplicarlo para todo tipo de franjas y entrega fase envuelta. Otra ventaja de esta técnica es que permite obtener mayor exactitud en la medición, ya que es insensible a las variaciones de intensidad. Es importante tener en cuenta que la precisión de esta técnica se puede hacer mayor, incrementando el número de interferogramas. Pero adquirir varias imágenes depende de las condiciones externas a las que está sometido el sistema, ya que se pueden tener errores en el desplazamiento de fase capturado por la cámara, debido a factores externos tales como vibraciones en el sistema. El desplazamiento de fase no es recomendable aplicarlo para objetos en movimiento, por lo cual se recomienda aplicar el método de Fourier-Takeda [82, 83], ya que este solamente necesita la adquisición de una imagen para obtener la fase. Algunas desventajas de la técnica es que tiene un alto grado de dificultad en eventos transitorios, así como mayor sensibilidad al ruido.

3.2.2 Desenvolvimiento de fase

El método de desplazamiento de fase, entrega la fase envuelta con valores entre 0 y 2π , ya que requieren de la función arcotangente para extraer la fase envuelta presente en los interferogramas. Entonces es necesario aplicar un algoritmo para desenvolver la fase.

Una discontinuidad en la fase se presenta cada vez que se tiene un cambio de 2π . Así, si se tiene un incremento en la fase, la pendiente de la curva es positiva y si la fase decrece, su pendiente será negativa [37].

Para corregir los saltos de fase de 2π , es necesario tener en cuenta que la diferencia de fase para dos puntos medidos integrando la fase a lo largo de una trayectoria marcada para

estos puntos, debe ser independiente de la ruta seleccionada, mientras que no se tengan discontinuidades de fase [84].

En la Figura 15, se presenta la distribución unidimensional de un mapa de fase envuelta. Es básicamente una serie de muestras digitales en un matriz.

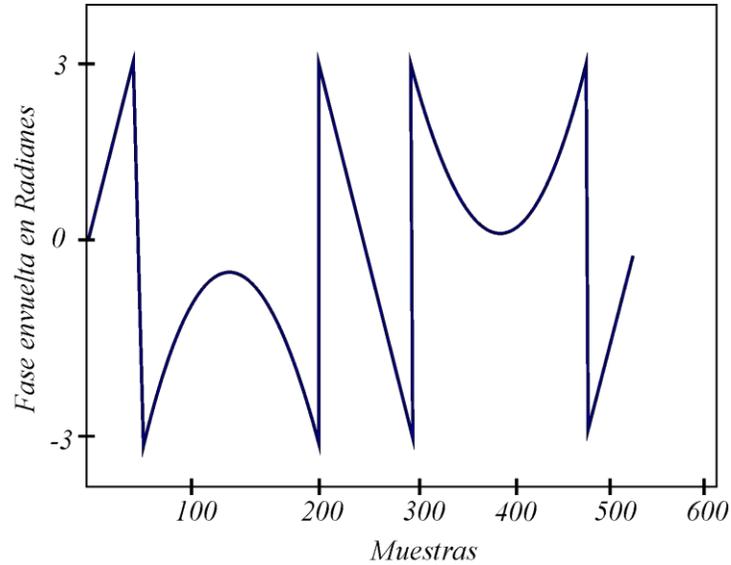


Figura 15. Distribución del Mapa de fase envuelto en una sola dimensión.

Para iniciar con el desenvolvimiento de fase en una dimensión es necesario seguir algunos pasos:

Paso 1: Se inicia desde la izquierda tomando la segunda muestra del mapa de la fase envuelta.

Paso 2: Luego se calcula la diferencia entre la muestra actual y su vecino del lado izquierdo.

Paso 3: Ahora si la diferencia de fase entre sus dos valores es mayor que π , entonces es necesario restar el valor de 2π a la muestra actual y a las demás muestras ubicadas a la derecha de ésta.

Paso 4: Ahora si la diferencia de fase entre sus dos valores es mayor que $-\pi$, entonces es necesario sumar el valor de 2π a la muestra actual y a las demás muestras ubicadas a la derecha de ésta.

Paso 5: Luego es necesario preguntar si todas las muestras que se encuentran en la fila correspondiente a la matriz de la fase envuelta fueron procesadas. Si no es el caso, entonces es necesario avanzar una muestra a la derecha y regresar al Paso 2. Si todas las muestras de la fila han sido procesadas es necesario parar el procedimiento.

En las Figura 16 y Figura 17 se puede observar cómo se va realizando el proceso de desenvolver la fase a partir del mapa de fase envuelta que se presentó en la Figura 15. Los cambios que se van realizando permiten obtener al final un perfil cosenoidal.

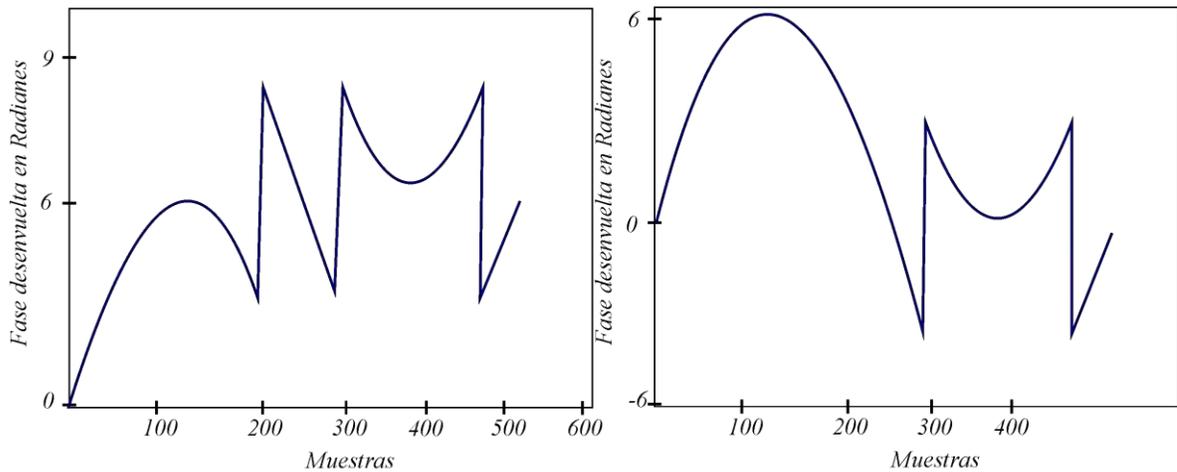


Figura 16. Progreso del desenvolvimiento de la fase en una sola dimensión.

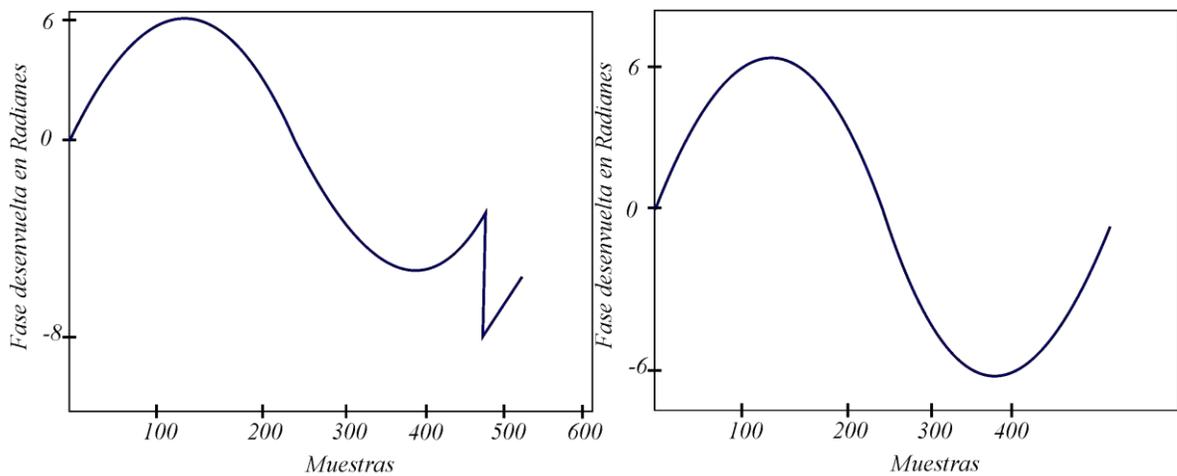


Figura 17. Progreso del desenvolvimiento de la fase en una sola dimensión y fase final desenvuelta.

Teniendo en cuenta los pasos anteriores, se realiza un algoritmo para desenvolver la fase. Ahora, cuando el algoritmo no encuentra un valor significativo entre la diferencia de los dos píxeles, éste simplemente pasa al píxel siguiente y continua el proceso. Sin embargo, si se encuentra un salto de fase, el cual puede representar una discontinuidad en los datos, aproximándose a un valor de 2π , este valor desplazará los siguientes datos bien sea un valor por arriba o un valor por abajo.

Este algoritmo puede ser fácilmente adaptado para funcionar en dos dimensiones. Para esto, se aplica de forma individual a los píxeles de cada fila en la imagen y luego finalmente se aplica este una sola vez para la columna resultante de todas las operaciones entre filas. Este algoritmo solamente funciona cuando se tiene la fase libre de ruido, cuando se tiene un

muestreo adecuado, cuando no hay zonas que contengan datos inválidos y cuando está libre de saltos o discontinuidades. A continuación se presenta la descripción de cada uno de estos:

- **Ruido en los datos:** En la práctica, todos los patrones de franjas contienen ruido, en algunos casos, ruido producido por técnicas de moteado (speckle), en donde el nivel de ruido puede ser muy alto. Pero en algunos casos los niveles de ruido en los patrones de franjas son tales que por lo general se requiere de un algoritmo para desenvolverse con técnicas incorporadas para ser inmunes al ruido.

El desenvolvimiento es una operación de diferenciación, es básicamente una diferenciación de los datos, por lo cual puede amplificar el ruido.

- **Discontinuidades:** En este caso la información de lo que se está midiendo utilizando el análisis de franjas, en algunos casos puede contener en sí discontinuidades reales. El peligro es que el algoritmo de desenvolvimiento de fase intentará de forma incorrecta resolver y remover este tipo de discontinuidades en los datos, considerando que son datos de fase envuelta más que características de una variable física que se está midiendo.
- **Áreas de datos inválidos:** En este punto es necesario enfrentar el problema cuando pueden existir zonas dentro de la imagen de las franjas que no tengan información asociado con las franjas.
- **Submuestreo:** Debido a su susceptibilidad al ruido, el proceso de desenvolvimiento de fase funciona contra dificultades causadas por una baja frecuencia de muestreo antes del límite teórico de Nyquist. En la práctica si la frecuencia de muestreo cae por debajo de 10 píxeles por franja, esperaremos tener incorporado dentro de nuestro algoritmo para desenvolverse alguna provisión para actuar en contra de los errores provocados por el submuestreo.

Existen algoritmos para desenvolverse fase que son bastante efectivos, pero tardan mucho; otros tal vez son un poco menos exitosos pero mucho más rápidos en funcionamiento. Un concepto importante que se debe considerar en el contexto de desenvolverse fase es la robustez. La robustez es la capacidad que tiene un algoritmo para producir satisfactoriamente datos con un alto nivel de confiabilidad

3.2.3 Algoritmos para el desenvolvimiento de fase

Los algoritmos para el desenvolvimiento de fase están divididos en dos grupos principales: Algoritmos que tratan de seguir la ruta para desenvolverse de manera que se puedan evitar áreas de la imagen donde hay inconsistencias y los algoritmos basados en regiones en donde se crea que los datos son consistentes.

Para el primer grupo de algoritmos es necesario realizar una relación entre un píxel y sus vecinos; en el segundo grupo se debe considerar un grupo de píxeles que estén dentro de cierta área [85]. Estos algoritmos ofrecen un enfoque bastante diferente al empleado por los algoritmos que siguen una ruta o un camino. En lugar de centrarse solamente en un par de píxeles, estas técnicas buscan una solución diferente, que es en cierto sentido, nivel global,

basándose en su totalidad en el patrón. Muchos de estos métodos están basados en técnicas de minimización, tales como mínimos cuadrados.

Es posible pensar que estos métodos permiten encontrar la fase desenvuelta de tal manera que es necesario utilizar una función de error dada por:

$$\varepsilon_p = \|\text{solución} - \text{problema}\|^p, \quad (48)$$

Siempre y cuando la distribución de la fase envuelta no este submuestreada, el gradiente local de la fase desenvuelta debe ser igual al gradiente local de la fase envuelta, tal como:

$$\Delta\phi(x, y) = w\{\Delta\phi(x, y)\}, \quad (49)$$

Donde Δ tiene que ver con la diferenciación y w es el operador de envolvimiento.

Combinando las expresiones (48) y (49), se puede obtener el método de minimización:

$$\varepsilon^p = \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} |\Delta^x \phi(i, j) - w\{\Delta^x \phi(i, j)\}|^p + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} |\Delta^y \phi(i, j) - w\{\Delta^y \phi(i, j)\}|^p, \quad (50)$$

Donde $\Delta^x \phi(i, j)$ y $\Delta^y \phi(i, j)$ son los gradientes de la fase desenvuelta en las direcciones x e y respectivamente.

$$\Delta^x \phi(i, j) = \phi(i+1, j) - \phi(i, j), \quad (51)$$

$$\Delta^y \phi(i, j) = \phi(i, j+1) - \phi(i, j), \quad (52)$$

La definición de las derivadas de la fase envuelta está definida similarmente en los datos envueltos.

El proceso para desenvolver la fase consiste en integrar las diferencias de fase a lo largo de un recorrido lineal, siempre que la fase se encuentre libre de ruido. En cada píxel el gradiente de la fase es calculado a través de una diferenciación (53), donde n representa el número de píxeles.

$$\Delta\phi = \phi_n - \phi_{n-1}, \quad (53)$$

Si el valor absoluto del gradiente de la fase excede cierto umbral, para este caso π , entonces se asume un cambio brusco en las franjas, es decir, en los bordes de la fase envuelta la franjas que se está analizando tiene un salto de 2π . En este caso, la discontinuidad se elimina sumando o restando el valor de 2π , lo que depende del signo que tenga el gradiente de la fase.

Así, si se tiene un gradiente con pendiente positiva, entonces se le suma 2π , pero si se tienen un gradiente con pendiente negativa, se resta 2π . Si la diferencia entre los dos puntos que se están analizando, no supera el valor umbral de π , se realiza la suma de la diferencia del valor actual más el valor del punto anterior de la fase envuelta.

El algoritmo de seguimiento de camino enfocado en seguir una trayectoria marcada por una línea recta hacia delante del desenvolvimiento de fase, consiste en utilizar una descripción en una dimensión y aplicarla a un problema en dos dimensiones.

El proceso utilizado para desenvolver la fase en este trabajo consistió en realizar la integración de las diferencias de fase a lo largo de un recorrido lineal. Primero se inicia desenvolviendo la primera fila de la matriz que representa la fase, después es necesario tomar el ultimo valor calculado para utilizarlo como condición inicial para continuar desenvolviendo la siguiente fila de la matriz en dirección positiva y así sucesivamente hasta completar todas las filas de la matriz. La expresión que describe este proceso está dada por la función para desenvolver:

$$V(x) = \left[x - 2\pi \operatorname{int}\left(\frac{x}{\pi}\right) \right]^2 = \tan^{-1} \left[\frac{\operatorname{sen}(x)}{\operatorname{cos}(x)} \right] \quad [-\pi, \pi], \quad (54)$$

$$\phi(x_{i+1}, y_o) = \phi(x_i, y_o) + V[\phi_w(x_{i+1}, y_o) - \phi(x_i, y_o)] \quad 1 \leq i \leq M \quad \phi(x_o, y_o) = \phi_o, \quad (55)$$

4 Desarrollo experimental y análisis de resultados

La visión artificial incluye la captura, el procesado y el análisis de imágenes, facilitando la evaluación de las características de objetos de manera rápida, objetiva y no destructiva. El color es una de las características más importantes de una imagen debido a su correspondencia con la visión humana, pero además, a partir de una imagen se puede obtener información de la morfología y la apariencia.

En esta sección se presentan los resultados y los procedimientos utilizados para realizar la reconstrucción de la fase para diferentes objetos. El proceso de la digitalización tridimensional se basa en la técnica de proyección de franjas [86, 87].

Los experimentos realizados consisten en:

- Evaluar la topografía mediante la proyección de franjas en niveles de gris.
- Evaluar la topografía usando colores RGB de las franjas, así como estudiar la influencia del tipo de iluminación (también RGB).
- Implementar la técnica de desplazamiento de fase simultáneo usando franjas RGB.
- Implementar la técnica de proyección de franjas para obtener información topográfica a 360 grados.
- Obtener la topografía y el uso de técnicas de colorimetría para la valoración del color real de frutas y hortalizas.

Se utiliza como objeto de referencia, un objeto de sencilla geometría cuyas dimensiones son obtenidas fácilmente mediante una cinta métrica. Las dimensiones 3D de este objeto son obtenidas ópticamente y comparadas con las obtenidas de la forma descrita. Se presentará el error asociado a la técnica de proyección de franjas en las diferentes variantes estudiadas.

4.1 Sistema óptico basado en la técnica de proyección de franjas

En la Figura 18, se presenta una foto del arreglo experimental implementado correspondiente a la técnica de proyección de franjas. Generalmente en los arreglos de proyección de franjas, el proyector y la cámara están en el plano xz , y las franjas proyectadas son paralelas al eje y , como se observa en la Figura 10. Así, la cámara se encuentra posicionada en eje óptico y el proyector tal que su eje óptico hace un ángulo de incidencia diferente de cero respecto al eje óptico del sistema de proyección de franjas.

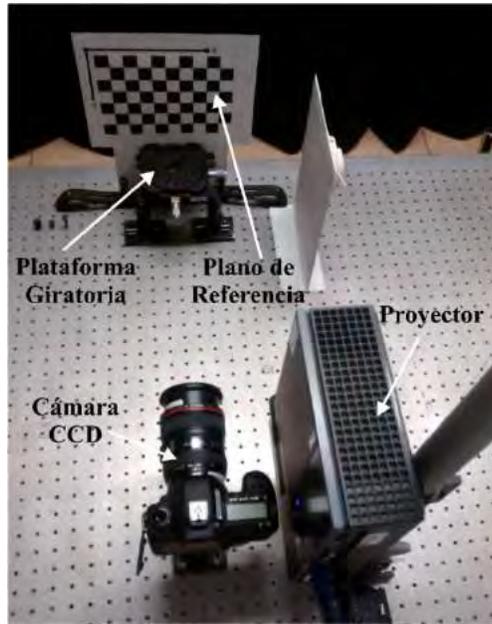


Figura 18. Arreglo experimental del sistema de proyección de franjas.

4.2 Alineación del sistema de proyección de franjas

La alineación del proyector con respecto a la cámara, se realizó proyectando una cruz color negro sobre el plano de referencia. Luego utilizando el software “EOS Utility”, proporcionado por el fabricante de la cámara, el cual permite visualizar y capturar las fotografías de forma remota desde la computadora, se configuró el software, para que en la ventana de visualización de la imagen adquirida, apareciera una división de la imagen, justo en el centro, con el fin de hacer superponer la cruz proyectada sobre el plano de referencia con el centro de la cámara. El proceso de alineación consistió en ajustar de forma manual tanto el proyector como la cámara, modificando tanto su inclinación como la posición con respecto al eje x y al eje y .

El proyector se encarga de realizar la proyección de las franjas sobre el objeto mediante un sistema óptico que tiene en su interior, Figura 19, [88]. Los factores que influyen en la selección de un proyector son: la potencia luminosa, la frecuencia y la calidad de la óptica.

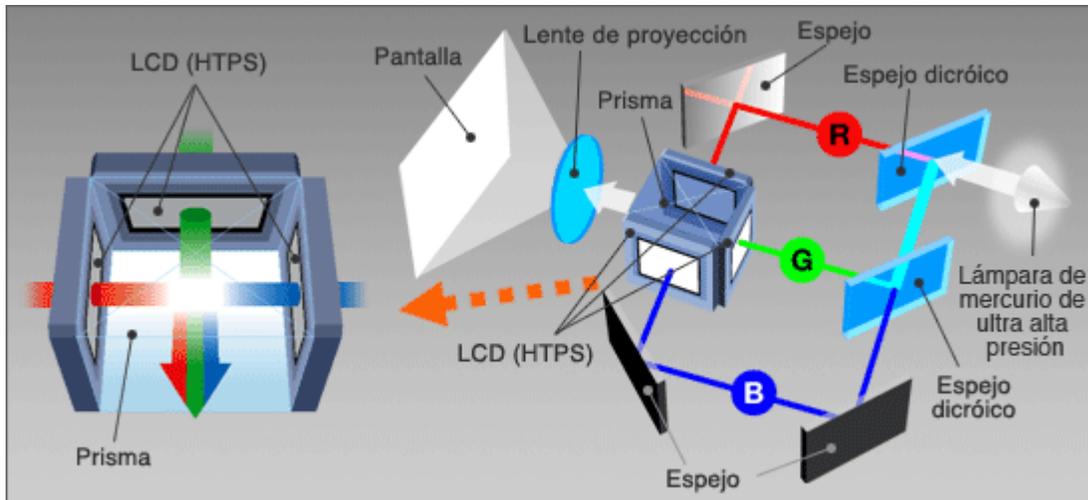


Figura 19. Componentes internos de un proyector digital.

En este trabajo se utilizó un proyector DELL 1609WX, con una fuente de luz blanca, con una distancia de proyección desde 1m hasta 12m y con una resolución máxima de 1200x800 píxeles. La cámara CCD se encarga de realizar el proceso de captura de las imágenes de las franjas deformadas sobre el objeto. La cámara empleada fue una Canon EOS 5D Mark II, la cual tiene las siguientes características:

Tipo de sensor: CMOS de fotograma completo (36 mm x 24 mm), 21.1 megapíxeles, relación de aspecto 3:2, filtro de paso bajo incorporado, sistema integrado de limpieza del sensor y filtro incorporado para colores primarios.

Enfoque: Tipo TTL-CT-SIR con un sensor CMOS, AF de 9 puntos (más 6 puntos de AF auxiliares), selección automática y manual.

Control de exposición: Medición TTL a plena abertura con SPC en 35 zonas; medición evaluativa (relacionada con cualquier punto de AF), medición parcial (aproximadamente 8% del visor en el centro), medición puntual (aproximadamente 3.5% del visor en el centro) y medición promediada con preponderancia central. Rango de medición EV 1-20 (a 20°C con objetivo de 50 mm f/1.4 ISO 100), compensación de la exposición +/-2 EV en incrementos de 1/2 ó 1/3 de puntos, sensibilidad ISO Auto (100-3200), 100-6400 (en incrementos de 1/3 de paso o de 1 paso).

Obturador: plano focal controlado electrónicamente, velocidad de 30-1/8000 seg (incrementos de 1/3 de punto).

Balance de blancos: automático con el sensor de imagen, configuración automática, luz de día, sombra, nublado, tungsteno, luz blanca, fluorescente, flash, personalizado, ajuste de temperatura de color, compensación de balance de blancos: Azul/ámbar +/-9 y Magenta/verde +/-9. Intervalo de balance de blancos +/-3 puntos en incrementos de un punto, 3 imágenes sucesivas por cada disparo del obturador.

Tipo de visor: Pentaprisma, cobertura vertical/horizontal de aproximadamente 98%, ampliación de aproximadamente 0.71x, área ocular aproximadamente de 21mm (desde el

centro de la lente del ocular), corrección dióptrica de -3 a +1 (1/m) (dioptrías), medio espejo de retorno rápido (transmisión: relación de reflexión de 40:60, sin bloqueo del espejo con EF de 600 mm f/4 o más cortos), vista preliminar de profundidad de campo.

Monitor LCD: ángulo de visión (horizontal/vertical) de aproximadamente 170°.

Flash: flash automático E-TTL, sincronización 1/200s, compensación de la exposición de flash +/-2 EV en incrementos de 1/3 de punto.

Modo de captura: Modo automático (imágenes fijas y videos), Creative Auto, AE programada, AE con prioridad al obturador, AE con prioridad a la abertura, manual (imágenes fijas y vídeos), personalizados (x3), espacio de color sRGB y Adobe RGB, procesamiento de imágenes con Prioridad tonal a las altas luces, optimizador Automático de la iluminación (4 ajustes), reducción de ruido en exposición larga, reducción de ruido en velocidad ISO alta (4 ajustes), corrección Automática de la iluminación periférica del objetivo.

Tipo de archivo: JPEG: fina, normal, RAW: RAW, sRAW1, sRAW1 (14 bits, Canon RAW original, 2ª edición), tamaño de la imagen; para JPEG: (L) 5616 x 3744, (M) 4080 x 2720, (S) 2784 x 1856, para RAW: (RAW) 5616 x 3744, (sRAW 1) 3861 x 2574, (sRAW 2) 2784 x 1856.

4.3 Calibración de color para el proyector

Antes de empezar con la reconstrucción de un objeto de prueba, primero se realizó la calibración de color para el sistema de proyección de franjas con la ayuda de un colorímetro. Un colorímetro es un dispositivo triestímulo que utiliza filtros de color rojo, verde y azul para imitar la respuesta que tiene el ojo humano con la luz y el color. La calibración de color con un colorímetro requiere de una configuración inicial del software, la alineación del medidor (colorímetro) con el centro de la proyección, el ajuste manual del brillo y contraste, la proyección y medición de cada uno de los colores que componen el perfil ICC [89]. En la Figura 20, se presentan los pasos básicos para la calibración del color. La medición de cada uno de los valores del color que aparecen en la pantalla de proyección y el ajuste de los valores teóricos deberá finalizar de forma satisfactoria, para finalmente, crear y guardar el perfil del proyector.

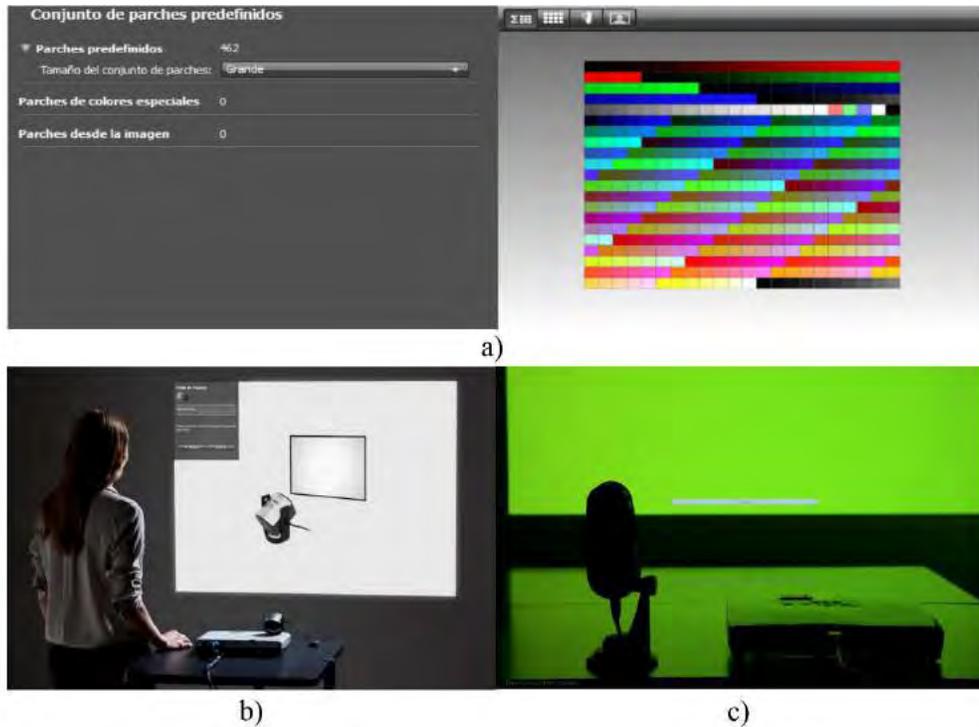


Figura 20. Calibración del proyector utilizando un colorímetro II profiler XRite: a) Configuración del perfil, b) Configuración brillo y contraste, c) Calibración del proyector.

La proyección de franjas a color y la asociación del color de un objeto, requieren de la calibración de los colores del proyector. Utilizando un colorímetro X-Rite II Profiler, se realizó la calibración de color para el proyector. En la Figura 21, se puede observar la configuración del arreglo utilizado.

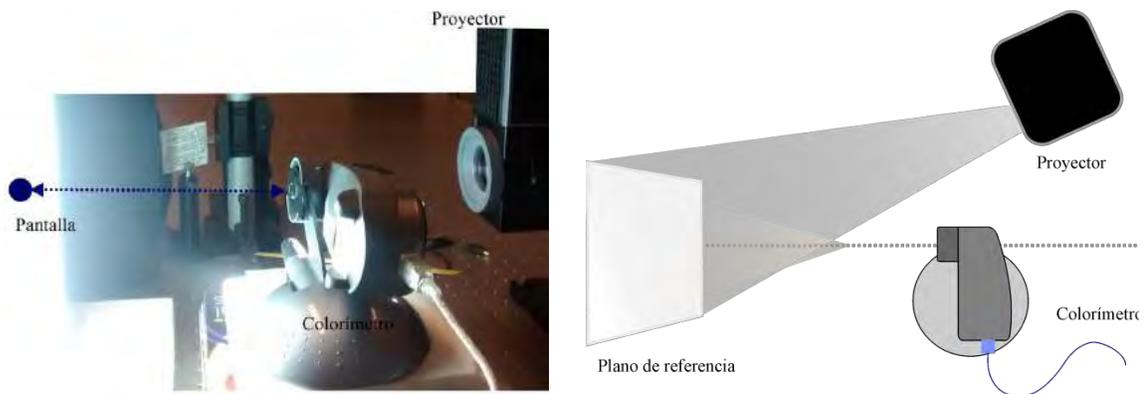


Figura 21. Calibración del proyector con el colorímetro X-Rite II Profiler.

Primero se ubicó el colorímetro en el centro de la pantalla de proyección y se desplazó en el eje z unos cuantos centímetros para evitar sombras. El software X-Rite realiza la proyección de diferentes colores del espectro visible y se encarga de la formulación del color en pantallas a color, de acuerdo a las normas del Consorcio Internacional del Color (ICC) para dispositivos estándar. Cada color tiene una apariencia diferente, basada en tres

elementos: tonalidad (*hue*), croma (*chroma*) y valor (*value*) o tonalidad (*lightness*). *Hue* indica la forma en como nosotros percibimos el color de un objeto, bien sea rojo, naranja, verde azul, etc. *Chroma* se encarga de describir la intensidad u opacidad de un color. *Lightness* es la intensidad luminosa de un color, se encarga de escribir el grado de luminosidad. Así, los colores se pueden clasificar como oscuros o claros cuando se comparan su valor [90].

4.4 Calibración de color de la cámara

El proceso de calibración de la cámara, permite extraer información a partir de imágenes en dos dimensiones de un objeto en 3D. La calibración permite realizar de forma efectiva el seguimiento del color de un objeto. Teniendo en cuenta que la apertura del diafragma permite controlar la cantidad de luz que entra en el CCD y que es inversamente proporcional a la profundidad de campo, se llevaron a cabo algunas pruebas de la abertura del diafragma, extendiendo un compromiso con la cantidad de luz que entraría en el CCD y a la nitidez de la imagen. Para la selección del tiempo de exposición se realizó la proyección de tres patrones de franjas a color (rojo, verde y azul) para diferentes valores de amplitud y fondo. Se implementó una herramienta para generar las franjas en el software LabView 2013, la cual se puede observar en la Figura 22. A través de la interfaz, se puede seleccionar la resolución del proyector, el periodo de las franjas, el color (franjas rojas, franjas verdes o franjas azules), la intensidad y el contraste.

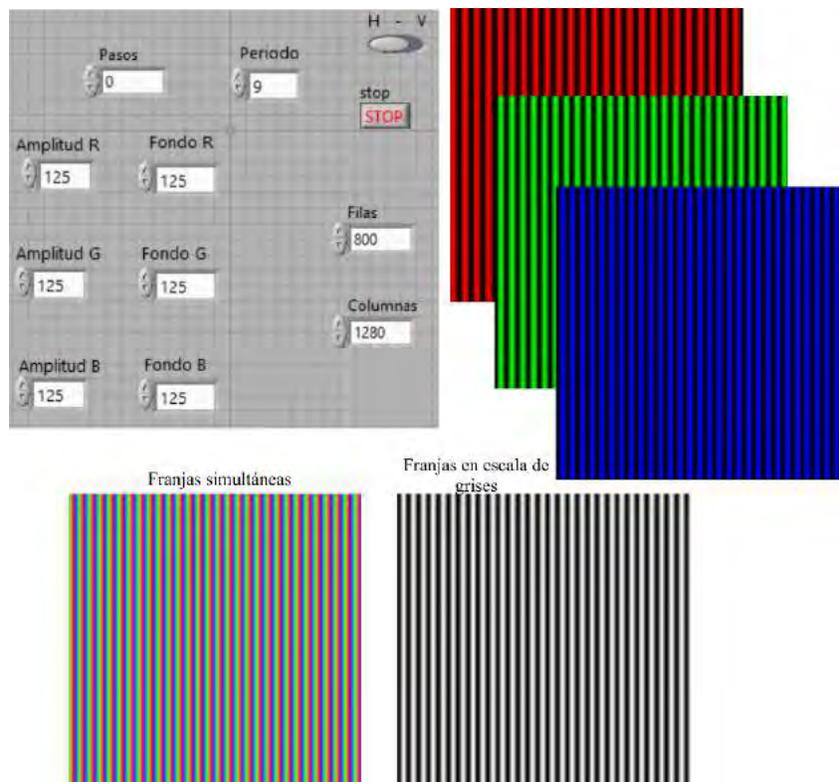


Figura 22. Interfaz desarrollada en LabView 2013, para generar franjas a color con perfil cosenoidal.

En la Figura 23 se presenta el diagrama en bloques para generar las franjas con perfil cosenoidal. En el caso de la proyección simultánea, cada una de las funciones coseno tenía un desfase de 120° .

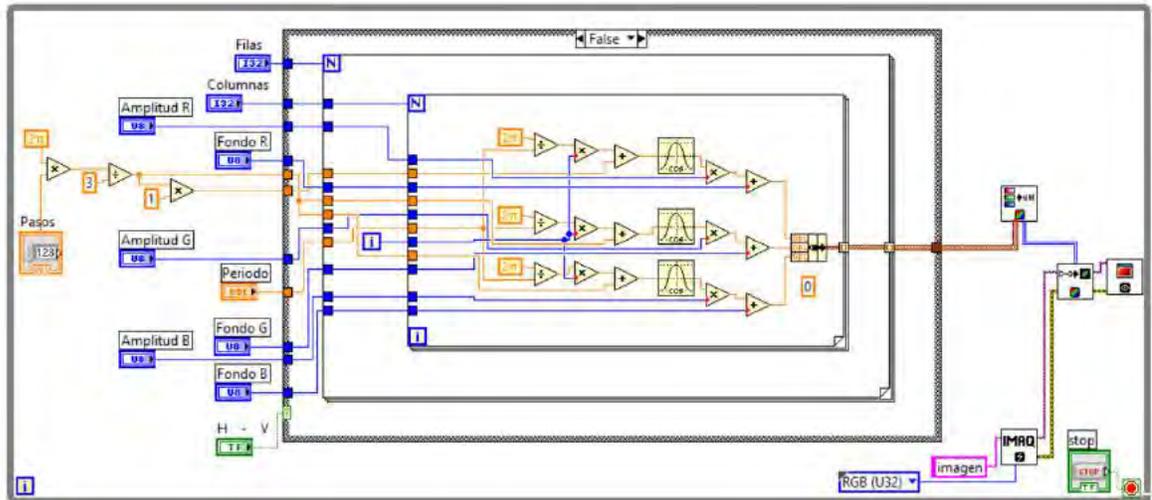


Figura 23. Diagrama en bloques implementado en LabView 2013 para generar franjas a color con perfil cosenoidal.

Utilizando la herramienta para generar las franjas, se modifican los valores de intensidad y contraste de las franjas, se encuentra el tiempo de exposición, la apertura y el ISO para los cuales, el perfil de los patrones de franjas proyectados era de tipo cosenoidal. Un valor del tiempo de exposición de $1/6s$, un ISO 100, y una apertura de F22. Además la resolución de la imagen según el formato L+RAW de 5616×3744 píxeles.

Después de ajustar los parámetros de la cámara, se realizó una calibración de color utilizando una carta fotográfica de colores de referencia estándar industrial para la creación de perfiles DNG y para la evaluación de colores específicos.

Para calibrar los colores de la cámara, primero se ubicó la carta de colores sobre el plano de referencia, se realizó la proyección de un patrón color blanco sobre la carta de colores y finalmente se tomó la fotografía. En la Figura 24, se puede observar la forma en cómo se calibró el color de la cámara. Utilizando el software Adobe Lightroom se realizó el balance de blancos para la fotografía de la carta de color y se procedió a guardar el archivo con formato DNG. Es necesario cambiar el formato de la fotografía, porque el formato DNG, es el tipo de archivo que utiliza el software de calibración ColorChecker Passport. Este software permite la calibración del color en cámaras, creando un perfil DNG incluyendo las especificaciones de los parámetros internos de la cámara y las condiciones de iluminación para su uso en el procesamiento de imágenes en formato Raw (datos binarios).

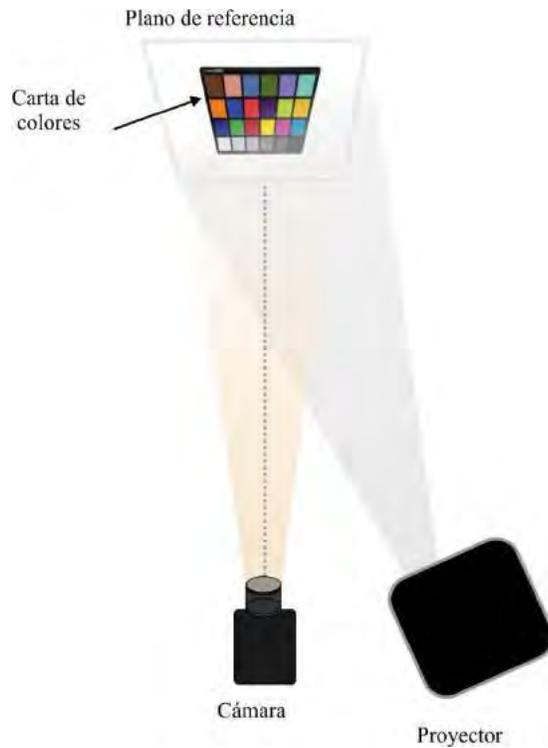


Figura 24. Calibración de los colores de la cámara utilizando la paleta de color (ColorChecker Clasic).

4.5 Obtención de la topografía del objeto en unidades de longitud

Para el caso de iluminación colimada, la coordenada z asociada con la topografía del objeto, es calculada en cada punto mediante la ecuación:

$$z(x, y) = \frac{\varphi}{2\pi} \frac{p}{\tan \theta}, \quad (56)$$

Donde p es el periodo del patrón de franjas proyectado sobre el plano de referencia, θ es el ángulo de proyección de las franjas y φ es la diferencia de fase entre el objeto y el plano de referencia. De la figura 7 se observa que el ángulo de proyección θ está dada por:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{d}{L}, \quad (57)$$

Como la imagen capturada por la cámara está en píxeles es necesario obtener una reconstrucción tridimensional real de un objeto, en unidades de longitud. Para encontrar el periodo de las franjas, se proyectó un patrón de franjas con periodo constante sobre un tablero de calibración con geometría conocida (alto y ancho) y se realizó la captura de una fotografía con las franjas proyectadas en escala de grises, sobre el tablero.

De la fotografía se encontró cuantos píxeles tenía de alto y de ancho un cuadro del tablero de 2mm x 2mm, luego se encontró cuantos píxeles se tenían entre dos máximos de las franjas. Con estos valores se realizó la conversión de píxeles a unidades de longitud.

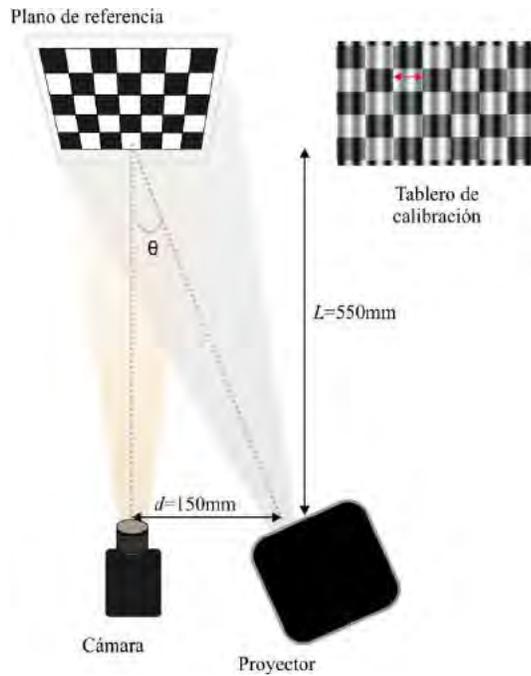


Figura 25. Arreglo utilizado para obtener la profundidad del objeto en unidades de longitud.

Cada uno de los cuadrados del tablero de calibración tenía las siguientes medidas:

Alto= 21 mm

Ancho= 21 mm

Para el caso del cuadrado del tablero se tenía en la imagen que:

21 mm= 172 píxeles

Separación entre dos máximos= 20 píxeles

Tamaño del píxel [mm/píxel]=21/172

Finalmente, con los valores anteriores se encontró el periodo de las franjas:

Periodo [mm]=2.4419

$\theta=15.63^\circ$

Para encontrar el error asociado a la medición de la topografía, se usó como objeto de prueba, un objeto de referencia de color blanco cuyas dimensiones son obtenidas con una máquina de coordenadas, Figura 26.

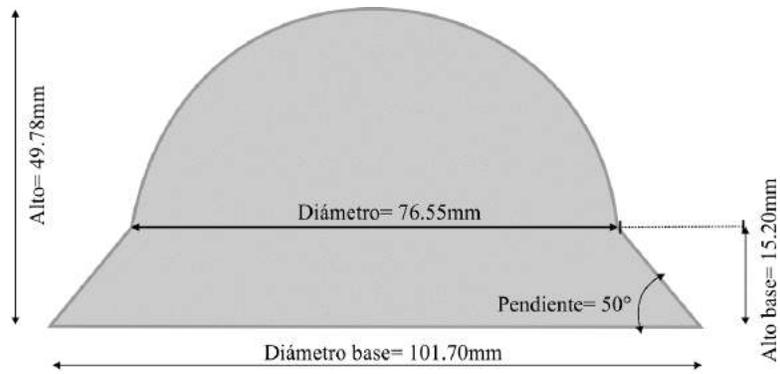


Figura 26. Medidas reales del objeto de prueba, obtenidas con una máquina de coordenadas.

4.6 Experimento 1: Proyección de franjas en niveles de grises

Haciendo uso del sistema de proyección de franjas se obtiene la topografía del objeto de referencia, Figura 27.



Figura 27. Objeto de referencia.

Primero se ajustó el contraste de las franjas y la amplitud, analizando el histograma y el perfil de un patrón de franjas capturado por la cámara, hasta lograr un perfil cosenoidal en el patrón de franjas proyectado. La obtención de la fase se llevó a cabo mediante un algoritmo de desplazamiento de fase de tres pasos. Cada patrón de franjas proyectado tenía un desplazamiento de $2\pi/3$. Las imágenes capturadas por la cámara fueron procesadas en el software Adobe Lightroom, en donde se cortaron de igual tamaño y se realizó un cambio de formato Raw a Tif, para no perder resolución en la imagen.

Después de realizar el cambio de formato, se implementó un algoritmo en el software MATLAB® 2016 para recuperar la topografía del objeto. En la Figura 28, se describe paso a paso el proceso que se realiza con los patrones de franjas, hasta finalmente obtener la topografía del objeto.

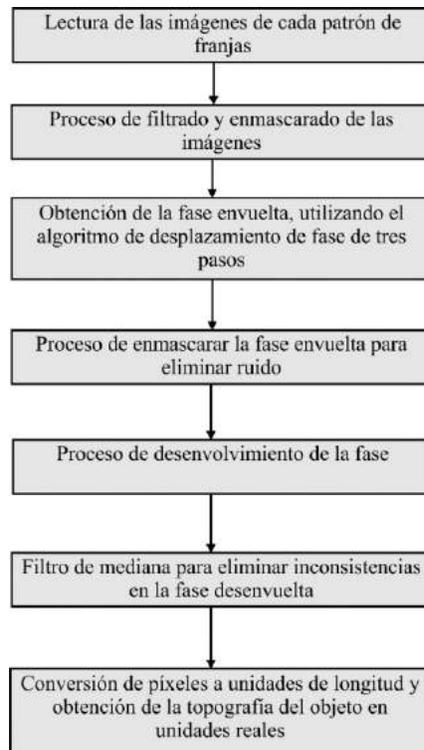


Figura 28. Diagrama de bloques del algoritmo implementado para obtener la fase utilizando la técnica de desplazamiento de fase.

En la Figura 29, se presentan los tres patrones de franjas proyectadas sobre el objeto de interés. Tanto los patrones de franjas proyectados en el plano de referencia como en el objeto de interés fueron procesados utilizando el algoritmo de la Figura 28, en el cual se aplicaron máscaras binarias y filtros de convolución a cada una de las imágenes para obtener una fase consistente y libre de ruido. La Figura 30 muestra la fase envuelta del objeto y el perfil de la fase en $y=450$. Se observa que la fase presenta una buena relación señal a ruido, por lo cual se procede a realizar su desenvolvimiento. En la Figura 31, se puede observar la topografía del objeto en unidades de longitud. Después de encontrar la topografía del objeto de referencia ópticamente, se realizó la comparación con las medidas obtenidas mediante una máquina de coordenadas.

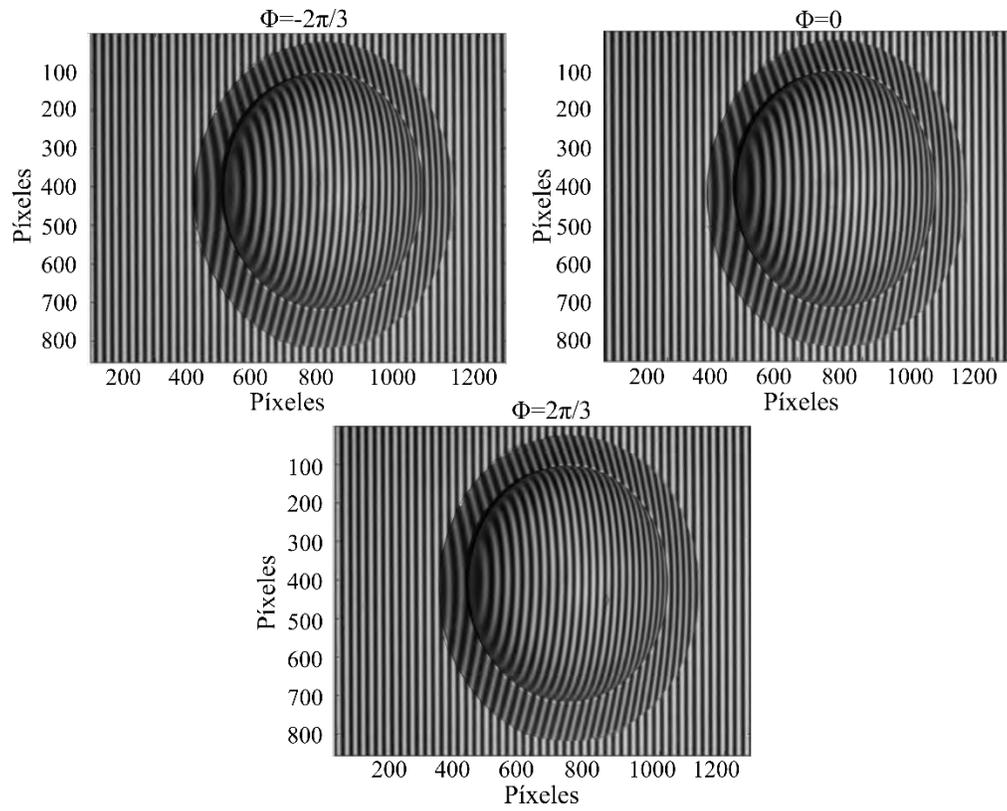


Figura 29. Patrones de franjas en escala de grises sobre un objeto circular.

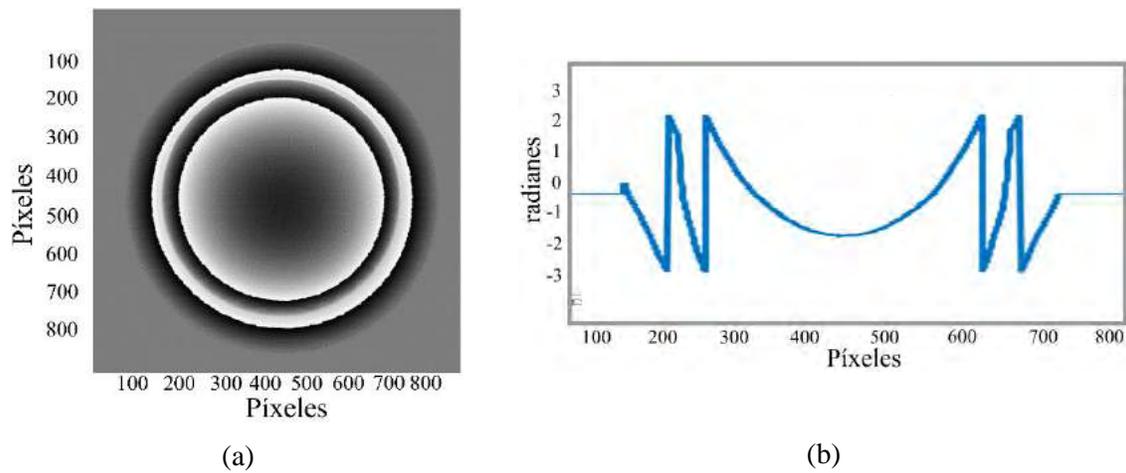


Figura 30. (a) Fase envuelta del objeto y (b) perfil de la fase envuelta en $y=450$, franjas en escala de grises.

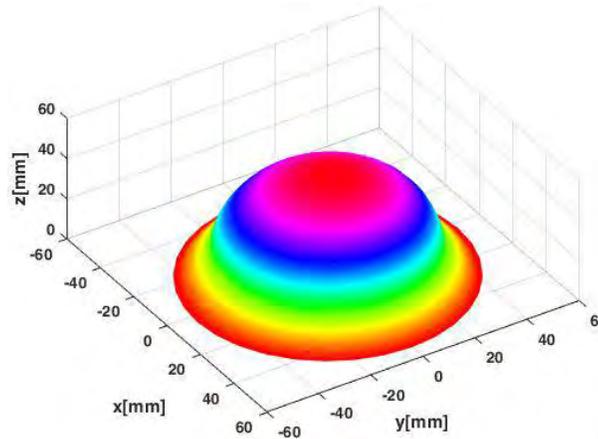


Figura 31. Topografía del objeto de prueba para proyección de franjas en escala de grises.

En la Tabla 1, se presenta una comparación de las medidas reales del objeto de referencia que se presenta en la Figura 26, con las medidas experimentales de la topografía de la Figura 31 obtenidas con la técnica de proyección de franjas. Se obtienen errores relativos en las siguientes mediciones correspondientes a la altura máxima, diámetro basal y pendiente de la base donde está montada la semiesfera, de 0.34%, 4.90% y 3.98% respectivamente.

4.7 Experimento 2: Proyección de franjas a color

La proyección de franjas a color es algo similar a la proyección de franjas en escala de grises, pero es necesario utilizar el concepto de imagen a color. Cuando trabajamos con una imagen a color, hay que considerar que la información correspondiente está distribuida en los tres canales con la misma cantidad de filas y columnas cada uno. Estos tres canales corresponden a los tres colores primarios; rojo, verde y azul. Así, la información contenida en el primer canal (primera capa), contiene los valores de la intensidad para el rojo, el segundo canal (segunda capa), contiene los valores de intensidad para el verde y finalmente el tercer canal (tercera capa), contiene los valores de intensidad para el azul. Conociendo el concepto de imagen a color, se generan patrones de franjas a color (rojas, verdes y azules) seleccionando el canal adecuado de acuerdo al color de las franjas, (ver Figura 22).

Para encontrar la fase envuelta del objeto a partir de la proyección de franjas a color, se implementó un nuevo algoritmo para procesar imágenes a color, teniendo en cuenta las capas que forman una imagen RGB. En la Figura 32, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo propuesto. En este algoritmo, se realiza una separación de las intensidades de las tres capas, para finalmente mantener la información del canal correspondiente al color de la proyección. Finalmente, la imagen RGB original, pasa a ser una imagen en escala de grises y el procesamiento que se realiza para la obtención de la fase es igual al escrito en el algoritmo de la Figura 28.

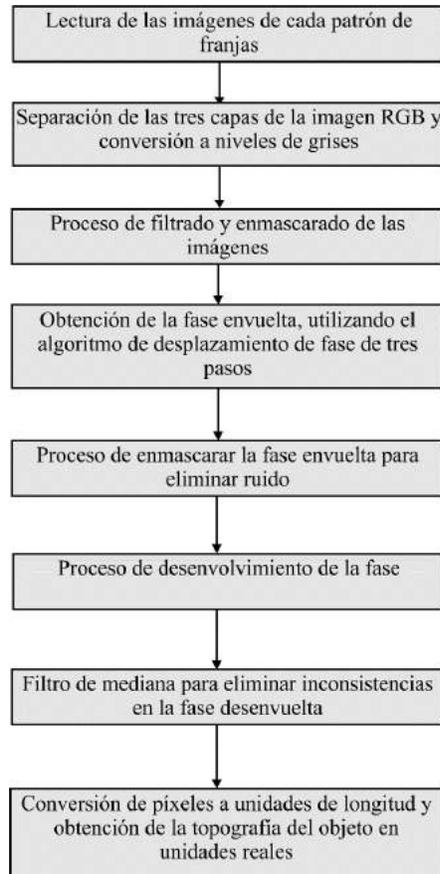


Figura 32. Diagrama de bloques del algoritmo para obtener la fase a partir de franjas a color (rojas, verdes y azules), utilizando la técnica de desplazamiento de fase.

De acuerdo al concepto mencionado anteriormente sobre las imágenes a color, la generación de cada patrón de franjas a color, se realizó de acuerdo a las siguientes instrucciones y utilizando la herramienta desarrollada en LabView para proyectar las franjas y ajustar los parámetros de intensidad y fondo en tiempo real.

Para generar franjas color rojo, es necesario deshabilitar el canal dos y el canal tres de la imagen.

$$I_R(:, :, 1) = I_R(x, y), \quad I_R(:, :, 2) = 0, \quad I_R(:, :, 3) = 0, \quad (58)$$

$$I_R(x, y) = a_R(x, y) + b_R(x, y) \cos(\varphi(x, y)), \quad (59)$$

En la Figura 33, se presentan las tres imágenes de los patrones de franjas proyectados sobre la superficie del objeto de prueba. Estas imágenes fueron procesadas en el software Adobe Lightroom, en donde se realizó un recorte de la imagen y un cambio de formato.

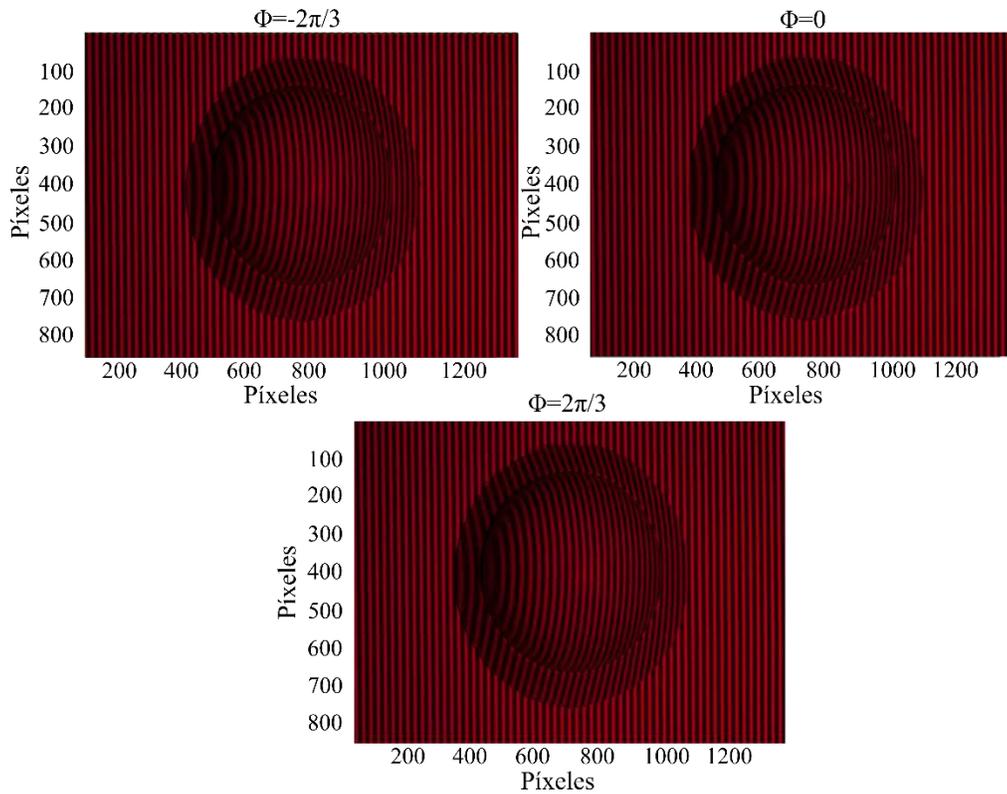


Figura 33. Patrones de franjas en color rojo sobre un objeto circular, desplazados en fase $2\pi/3$.

Después de procesar las imágenes a color, se obtuvo la fase envuelta del objeto, utilizando el algoritmo de *Phase Shifting* para tres pasos. En la Figura 34 se presenta la fase envuelta para el objeto de referencia, a partir de la proyección de franjas en color rojo.

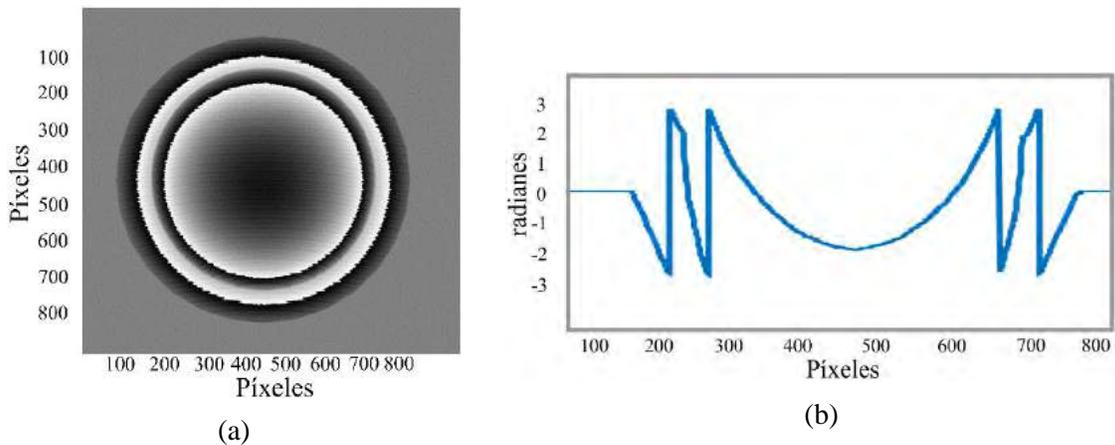


Figura 34. (a) Fase envuelta del objeto y (b) perfil de la fase envuelta para $y=450$, franjas color rojo.

Después de tener la fase envuelta, se realizó el proceso de desenvolvimiento de la fase para obtener la topografía del objeto, la cual se presenta en la Figura 35. Como anteriormente se presentó un análisis de error para las medidas de la topografía del objeto con proyección

de franjas en escala de grises, se realiza una comparación entre estas medidas y las medidas de la topografía utilizando proyección de franjas a color.

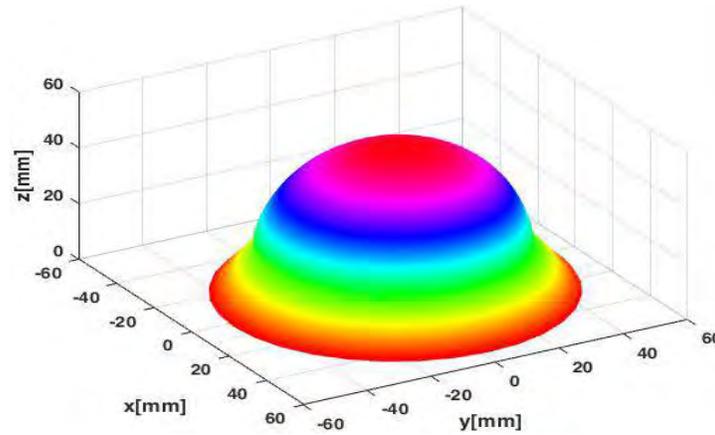


Figura 35. Topografía del objeto de prueba para proyección de franjas en color rojo.

De la Tabla 1, se puede observar que el error relativo para la altura es de 3.46% y al compararse con el error relativo para la proyección en escala de grises, se puede inferir que la proyección de franjas a color es mucho más sensible a variaciones en las componentes electrónicas del sistema (cámara y proyector).

Para generar franjas color verde, es necesario deshabilitar el canal uno y el canal tres de la imagen.

$$I_G(:, :, 1) = 0, \quad I_G(:, :, 2) = I_G(x, y), \quad I_G(:, :, 3) = 0, \quad (60)$$

$$I_G(x, y) = a_G(x, y) + b_G(x, y) \cos(\varphi(x, y)), \quad (61)$$

A partir de las expresiones anteriores, se generaron patrones de franjas, utilizando el método de *Phase Shifting* de tres pasos. Se encontraron los valores del fondo y amplitud, para los cuales el perfil de las franjas tenía la forma de una señal cosenoidal. En la Figura 36, se presentan las imágenes de las franjas proyectadas sobre la superficie del objeto de prueba.

Para recuperar la fase envuelta del objeto, se procesaron las imágenes de los patrones de franjas para el color verde, en el algoritmo de la Figura 32 y se obtuvo la fase envuelta del objeto con un poco de ruido, Ocasionado por la contaminación lumínica del canal verde. En la Figura 37 se puede observar la fase y el perfil de la fase.

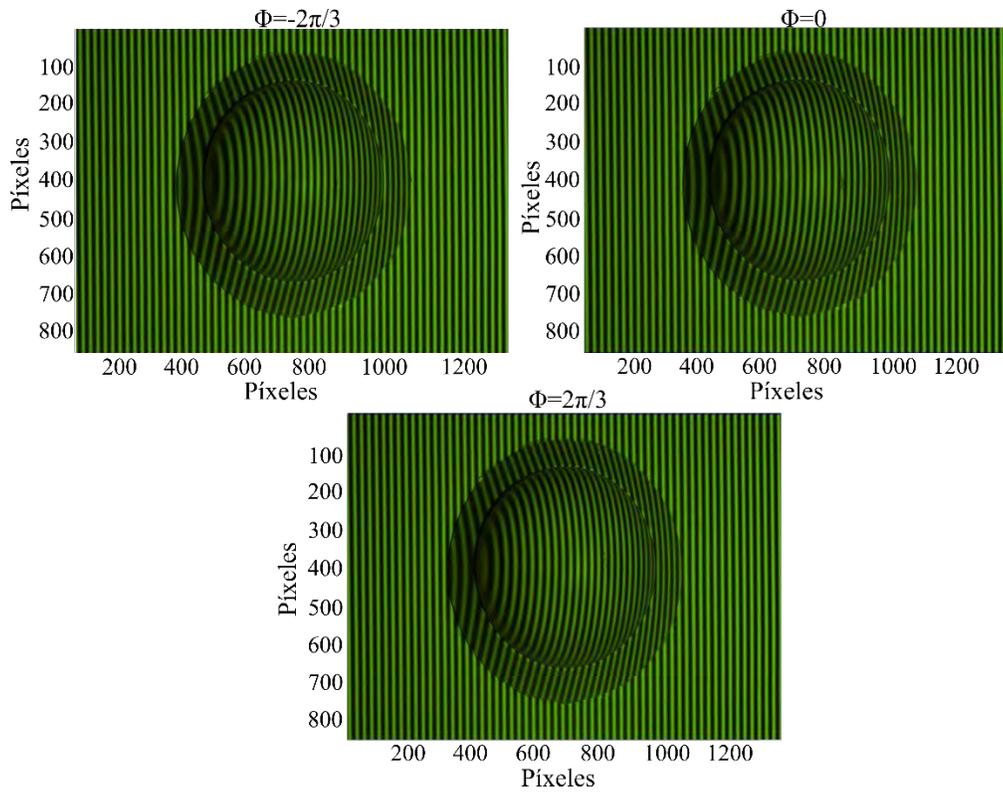


Figura 36. Patrones de franjas en color verde sobre un objeto circular, desplazados en fase $2\pi/3$.

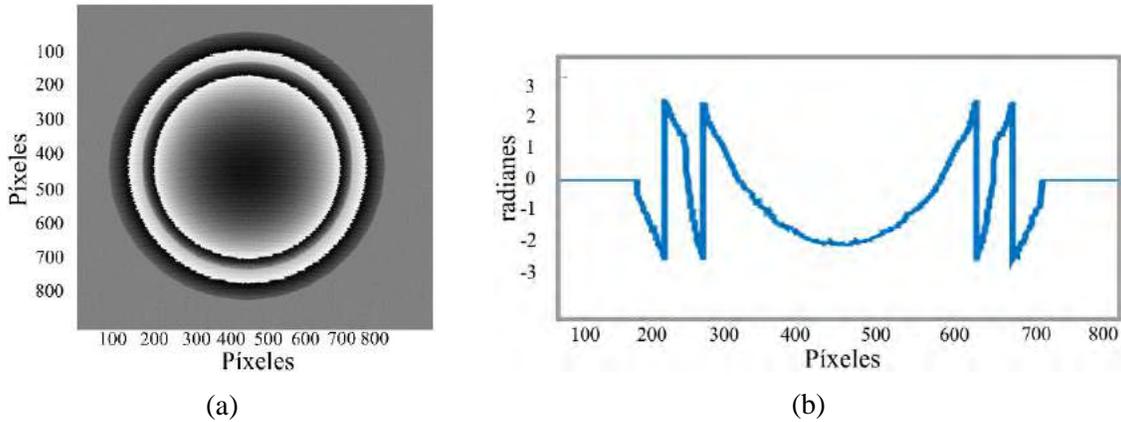


Figura 37. (a) Fase envuelta del objeto y (b) perfil de la fase envuelta para $y=450$, franjas color verde.

Una vez que se tiene la fase envuelta del objeto, se realiza el proceso de desenvolvimiento para obtener la topografía del objeto en unidades de longitud. En la Figura 38 se puede observar la topografía del objeto para proyección de franjas color verde.

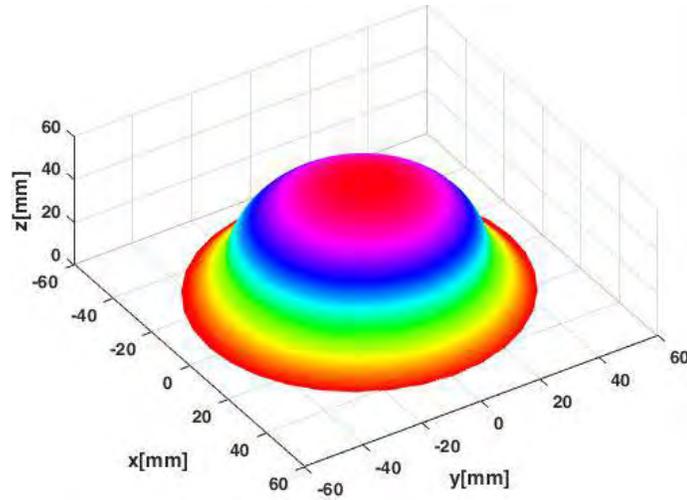


Figura 38. Topografía del objeto de prueba para proyección de franjas en color verde.

Las medidas que se presentan en la Tabla 1, muestran que el error relativo para la topografía del objeto con proyección de franjas en color verde, es mucho mayor comparado con los resultados de la proyección de franjas en escala de grises y la proyección de franjas en color rojo.

Para generar franjas color azul, es necesario deshabilitar el canal uno y el canal dos de la imagen.

$$I_B(:, :, 1) = 0, \quad I_B(:, :, 2) = 0, \quad I_B(:, :, 3) = I_B(x, y), \quad (62)$$

$$I_B(x, y) = a_B(x, y) + b_B(x, y) \cos(\varphi(x, y)), \quad (63)$$

A partir de las expresiones anteriores, se encontraron los valores para la intensidad y el fondo, de tal forma que el perfil de la fotografía de las franjas proyectadas se comportara como una señal cosenoidal. En la Figura 39 se pueden observar las imágenes de las franjas proyectadas en color azul sobre el objeto de prueba.

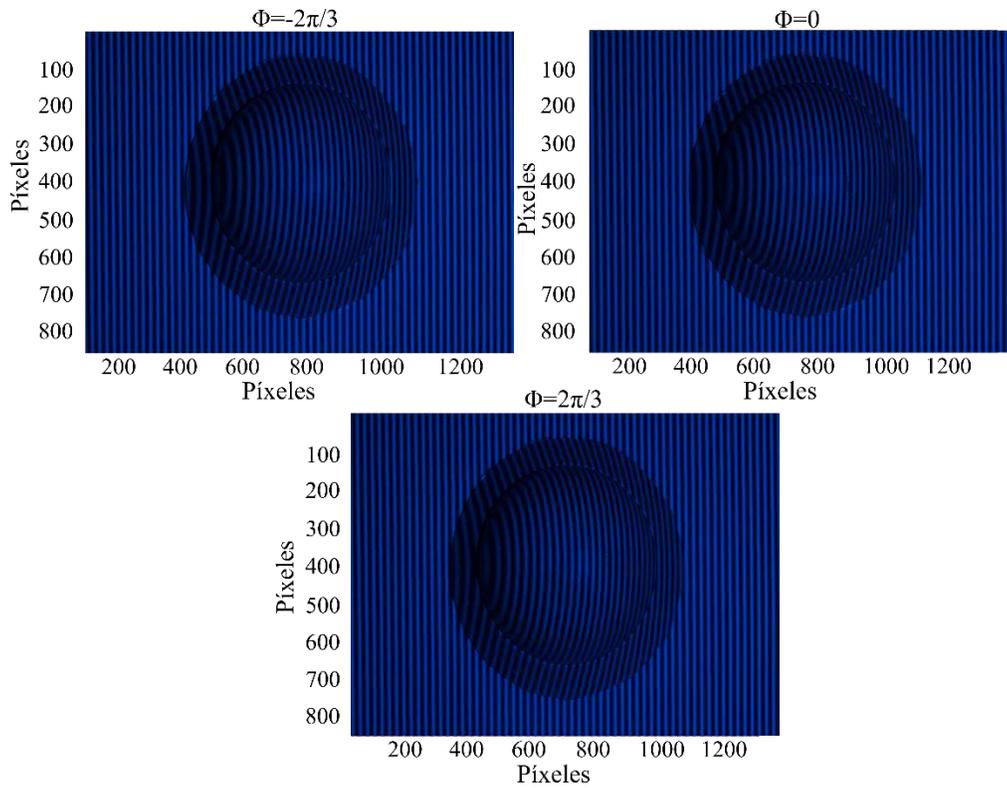


Figura 39. Patrones de franjas en color verde sobre un objeto circular, desplazados en fase $2\pi/3$.

Para estos patrones de franjas, se obtuvo la fase envuelta del objeto por medio del algoritmo de la Figura 32. Para las franjas en color azul, solamente se utilizó la intensidad del canal tres correspondiente al color azul y los valores de intensidad de los otros dos canales, se hicieron cero, de esta forma se elimina un poco la contaminación generada por las componentes electrónicas de los elementos del sistema de proyección. En la Figura 40 se puede observar la fase envuelta del objeto y un perfil de la fase, en este caso el perfil de la fase envuelta presenta menor ruido que el perfil de la fase envuelta para las franjas en color verde.

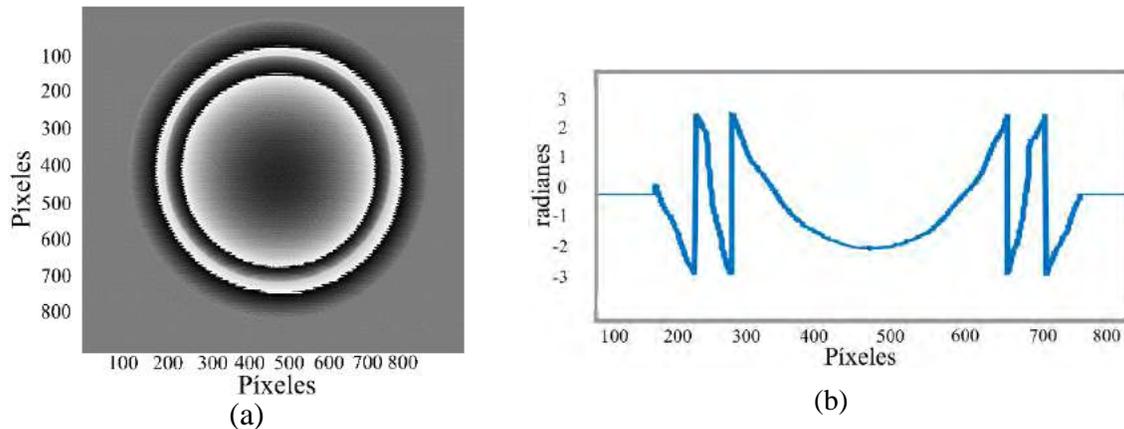


Figura 40. (a) Fase envuelta del objeto y (b) perfil de la fase envuelta para $y=450$, franjas color azul.

Mediante el algoritmo descrito en la Figura 32, el cual permite procesar las imágenes y obtener la fase desenvuelta, se obtiene la topografía del objeto para la proyección de franjas en color azul. En la Figura 41 se puede observar la topografía del objeto en unidades de longitud.

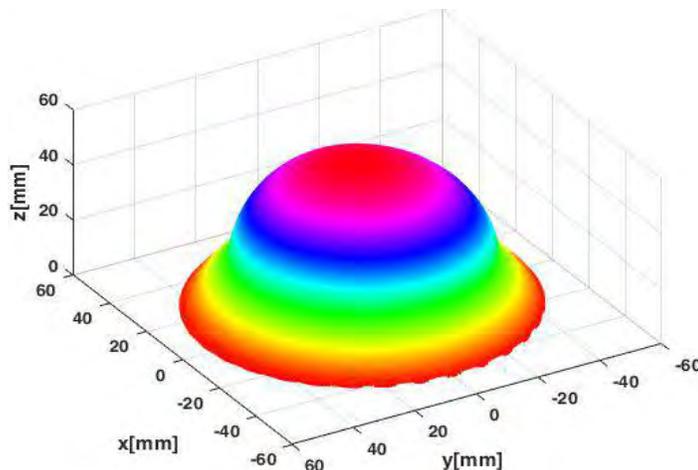


Figura 41. Topografía del objeto de prueba para proyección de franjas en color azul.

De acuerdo a las medidas reales del objeto de prueba y a las medidas obtenidas con la proyección de franjas en color azul, se realiza un análisis de error, el cual se presenta en la Tabla 1. Estos valores de error, son un poco menor a los valores para la proyección color verde, pero comparados con la proyección en escala de grises, siguen siendo un poco altos.

Después de realizar la proyección de franjas a color, utilizando el algoritmo de *Phase Shifting* de tres pasos, en donde cada patrón de franjas proyectado, tenía un desplazamiento de fase de $2\pi/3$, para un total de tres patrones de franjas. Se realizó un nuevo experimento, en el cual se quería encontrar la fase envuelta a partir de una única proyección de franjas a color. A continuación se describe la técnica utilizada para obtener la fase a partir de una proyección simultánea a color.

4.8 Experimento 3: Proyección simultánea de franjas a color (desplazamiento de fase simultáneo)

Como se mencionó anteriormente, una imagen a color está compuesta por tres canales (rojo, verde y azul). El método de proyección simultánea de franjas a color se puede observar en la Figura 42. La diferencia de fase entre dos canales consecutivos (canal rojo y canal verde) es de $2\pi/3$. Para obtener la fase a partir de una única proyección, se implementó la técnica de desplazamiento de fase de tres pasos. A continuación se presentan las expresiones para representar la intensidad de cada pixel (x, y) .

$$I_R(x, y) = a_R(x, y) + b_R(x, y) \cos\left(\varphi(x, y) - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (64)$$

$$I_G(x, y) = a_G(x, y) + b_G(x, y) \cos(\varphi(x, y)), \quad (65)$$

$$I_B(x, y) = a_B(x, y) + b_B(x, y) \cos\left(\varphi(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (66)$$

Primero se generó un patrón de franjas en color rojo con un desplazamiento de fase inicial de $-2\pi/3$ como se puede observar en (64). Luego se generó otro patrón de franjas, pero en color verde y sin desplazamiento de fase como se presenta en (65) y finalmente se generó un patrón de franjas para el color azul con un desplazamiento de $2\pi/3$ como se puede observar en (66). Es necesario tener en cuenta que para formar una proyección simultánea, el periodo mínimo de las franjas, debe ser 3 píxeles para que siempre se conserve el desplazamiento de fase de $2\pi/3$ y no se traslapen las franjas. Por medio de la expresión (67), se generó la proyección de las franjas para los tres colores de forma simultánea.

$$I_{RGB}(:, :, 1) = I_R(x, y) \quad I_{RGB}(:, :, 2) = I_G(x, y) \quad I_{RGB}(:, :, 3) = I_B(x, y), \quad (67)$$

Para encontrar los valores del fondo y la intensidad del patrón de franjas, se proyectaron diferentes patrones y para cada uno se observó su perfil, para lograr obtener una imagen de las franjas con un perfil cosenoidal. En la Figura 42 se puede observar la proyección de las franjas de forma simultánea sobre el objeto de referencia y sobre el plano de referencia.

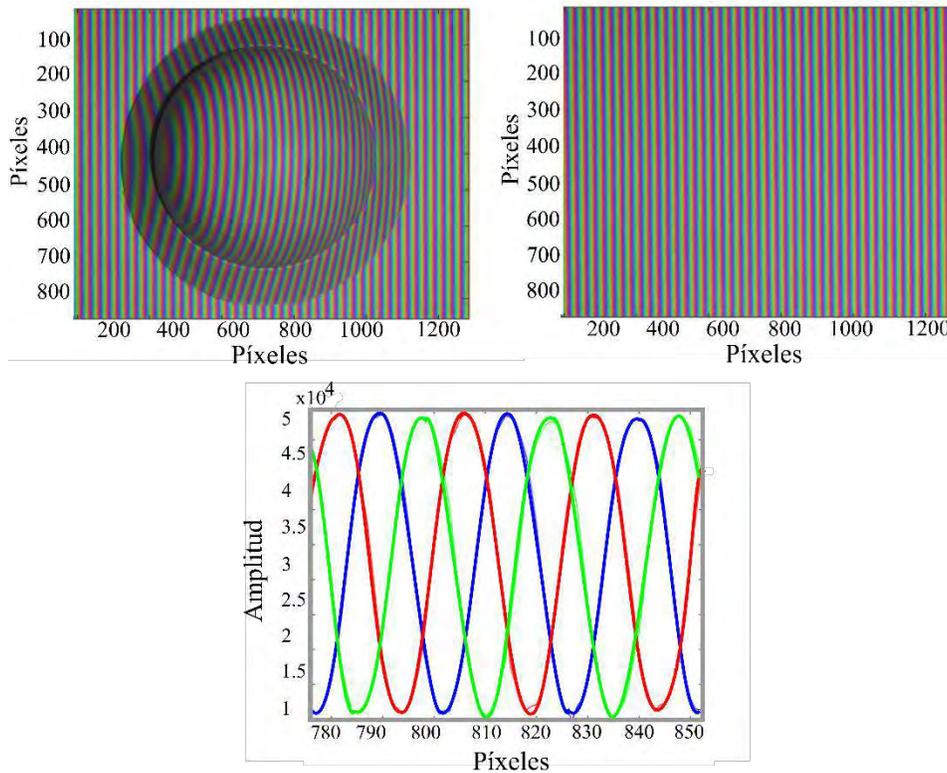


Figura 42. Patrón de franjas RGB, proyección simultánea sobre un objeto circular.

Es importante observar, que las técnicas descritas anteriormente, en donde se proyectaron franjas a color, necesitaban de tres patrones de franjas proyectados sobre el objeto y tres patrones de franjas proyectados sobre el plano de referencia para obtener la fase envuelta utilizando el algoritmo *Phase Shifting* de tres pasos. Realizando la proyección de franjas simultáneas a color, solamente se requiere una proyección para obtener el desplazamiento de fase a partir del algoritmo de tres pasos. Así para una imagen de las franjas a color, se pueden obtener tres imágenes en escala de grises con un desplazamiento de $2\pi/3$. A partir de la obtención de las tres imágenes, se obtiene la fase envuelta para la proyección simultánea de la franjas a color. En la Figura 43, se puede observar la fase desenvuelta del objeto y el perfil de la fase. Se tiene la presencia de ruido en la fase, el cual es debido a las componentes electrónicas tanto del proyector como de la cámara.

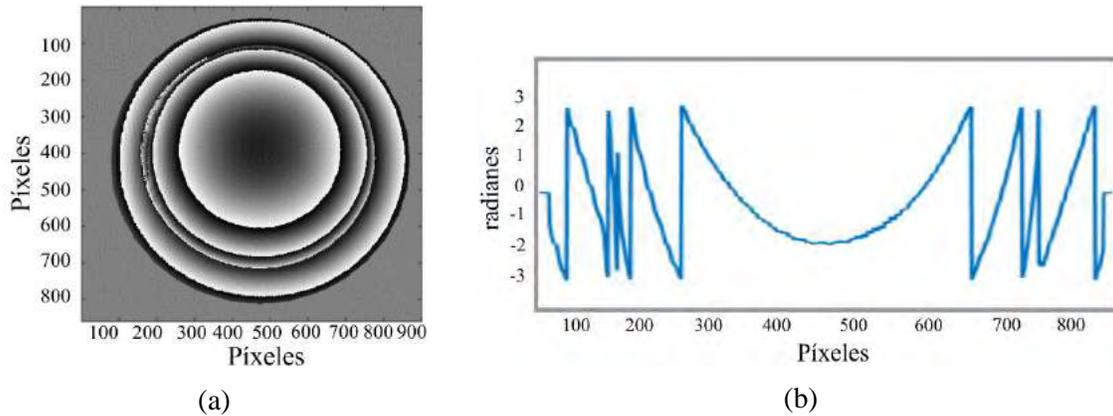


Figura 43. (a) Fase envuelta del objeto circular para proyección simultánea en RGB y (b) perfil de la fase envuelta para $y=450$.

Después de encontrar la fase envuelta y de aplicar algunos filtros la fase envuelta, se realizó el desenvolvimiento de la fase para obtener la topografía del objeto en unidades de longitud. En la Figura 44, se presenta la topografía del objeto de prueba para proyección simultánea.

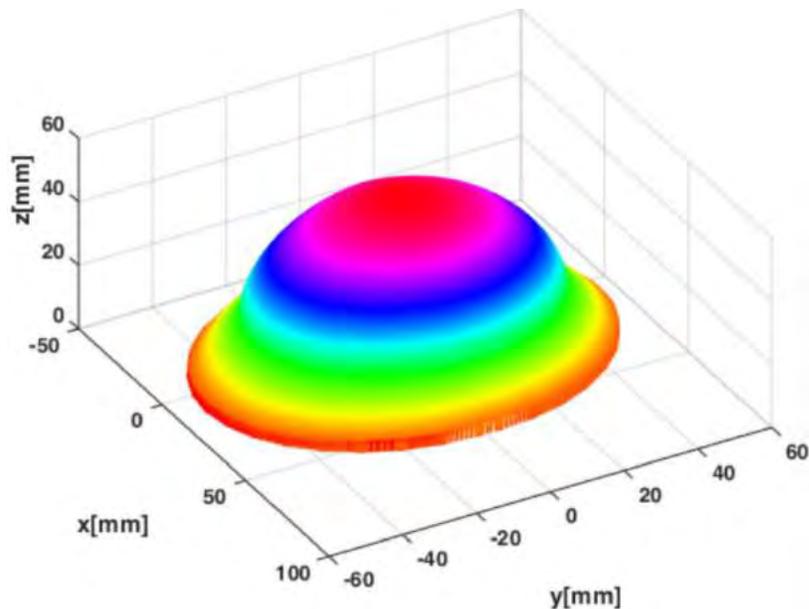


Figura 44. Topografía del objeto circular para proyección de franjas simultánea en RGB.

A partir de las medidas experimentales para la técnica de proyección simultánea se realizó una comparación con las medidas reales y se encontró el error en cada una de las medidas del objeto. Las medidas reales, experimentales y el error para cada medida se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Medidas obtenidas con la máquina de coordenadas y experimentales para el objeto circular, utilizando proyección de franjas en escala de grises, rojas, verdes, azules y simultáneas.

Objeto circular	Alto (mm)	Error (%)
Uso de la máquina de coordenadas	49.78	
Proyección de franjas en niveles de gris	49.61	0.34
Proyección de franjas rojas	49.06	1.45
Proyección de franjas verdes	48.17	3.23
Proyección de franjas azules	48.14	3.30
Proyección simultánea de franjas (RGB)	49.62	0.32

4.9 Experimento 4: Influencia del color de la iluminación en la medición de topografía

Otro experimento realizado consistió en proyectar un patrón de franjas en niveles de gris sobre la superficie del objeto de referencia (objeto color blanco mate) e iluminarlo utilizando dos fuentes de luz, las cuales fueron construidas utilizando Leds RGB. En la Figura 45 se puede observar la ubicación de las dos fuentes de color en el arreglo. El experimento consistió en proyectar los patrones de franjas y al mismo tiempo iluminar la superficie del objeto con las fuentes de luz. Se hicieron tres pruebas que corresponde cada una de ellas a la iluminación en rojo, verde y azul. Las fotografías del plano de referencia se tomaron sin la iluminación de color, ya que el objetivo del experimento era observar como interfiere el color del objeto en la recuperación de la topografía del objeto bajo estudio.

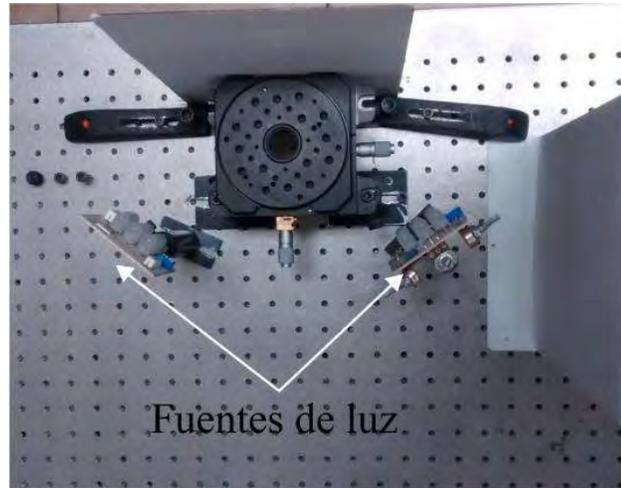


Figura 45. Arreglo experimental de proyección de franjas con dos fuentes de iluminación (color rojo, verde y azul).

En la Figura 46 se pueden observar las imágenes de los patrones de franjas proyectados sobre la superficie del objeto con iluminación color rojo. Luego en la Figura 47 se presenta la fase envuelta, en la Figura 48 se puede observar la topografía del objeto y finalmente en la Tabla 2 se puede observar el error en cada medida.

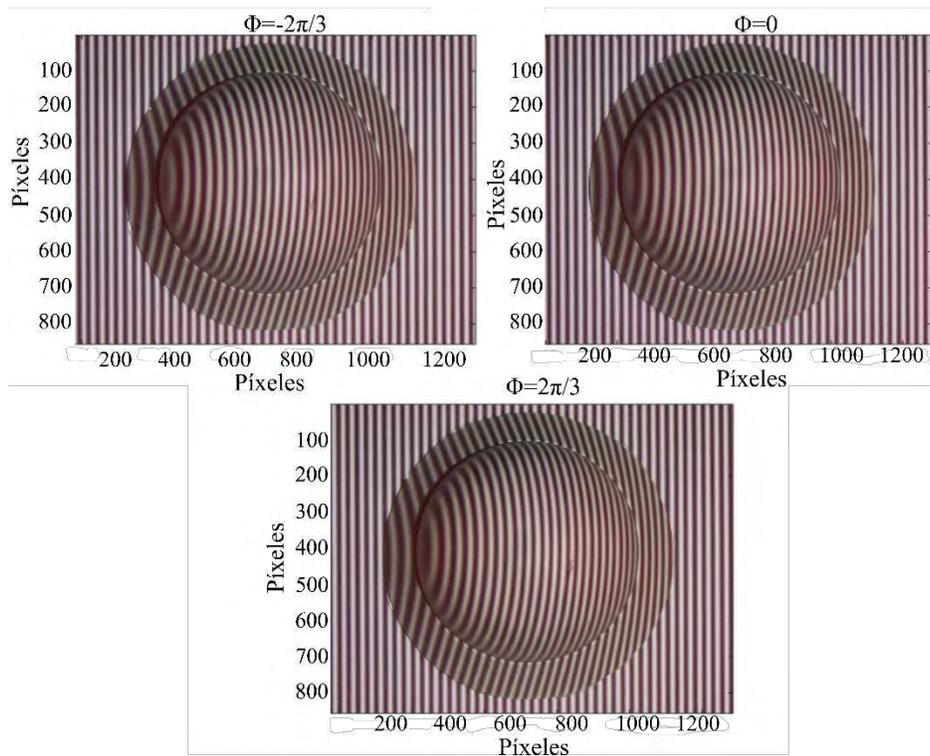


Figura 46. Proyección de franjas en escala de grises con iluminación color rojo.

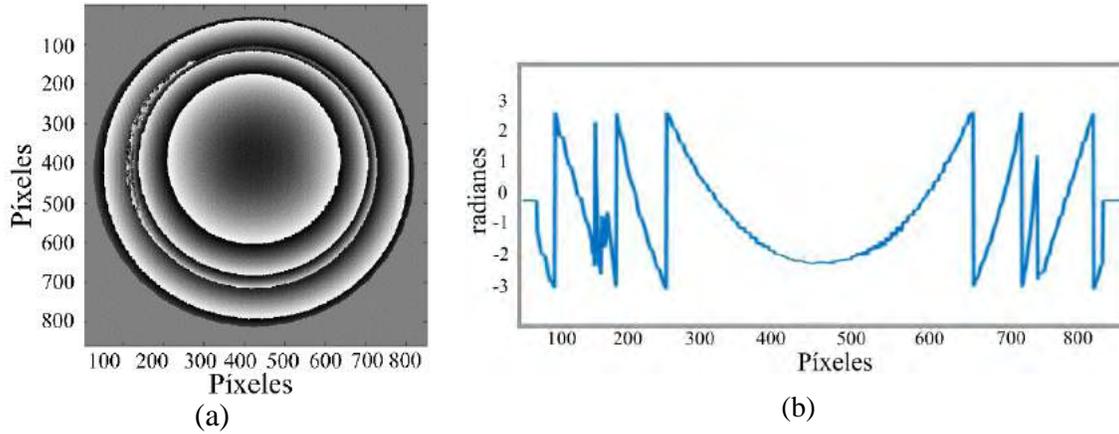


Figura 47. (a) Fase envuelta del objeto circular y (b) perfil de la fase, para la proyección en escala de grises y con iluminación color rojo para $y=450$.

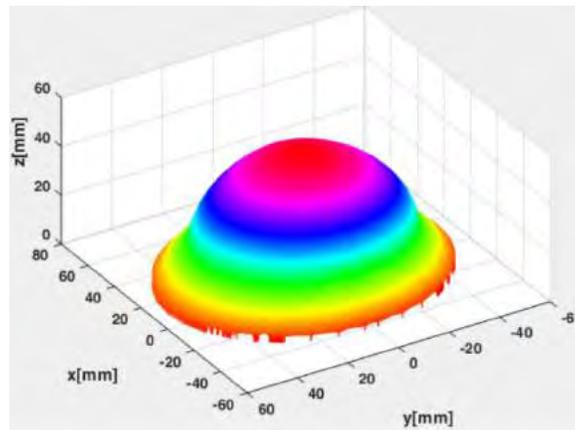


Figura 48. Topografía del objeto circular para proyección de franjas en escala de grises con iluminación color rojo.

En las Figura 49, Figura 50 y Figura 51 se muestran los resultados para el caso de iluminación color verde.

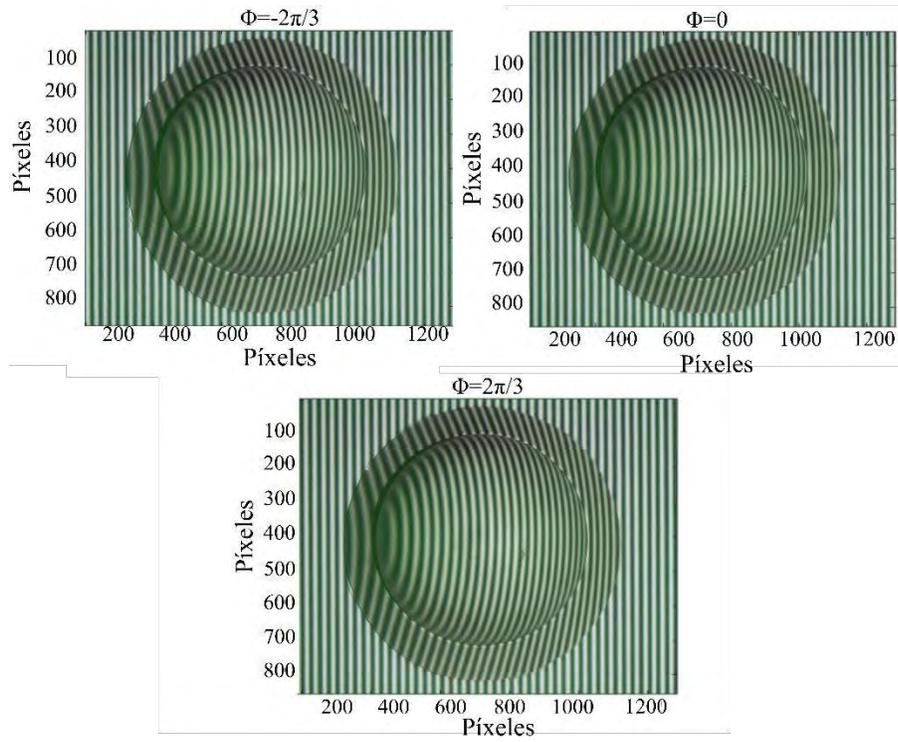


Figura 49. Proyección de franjas en escala de grises con iluminación color verde.

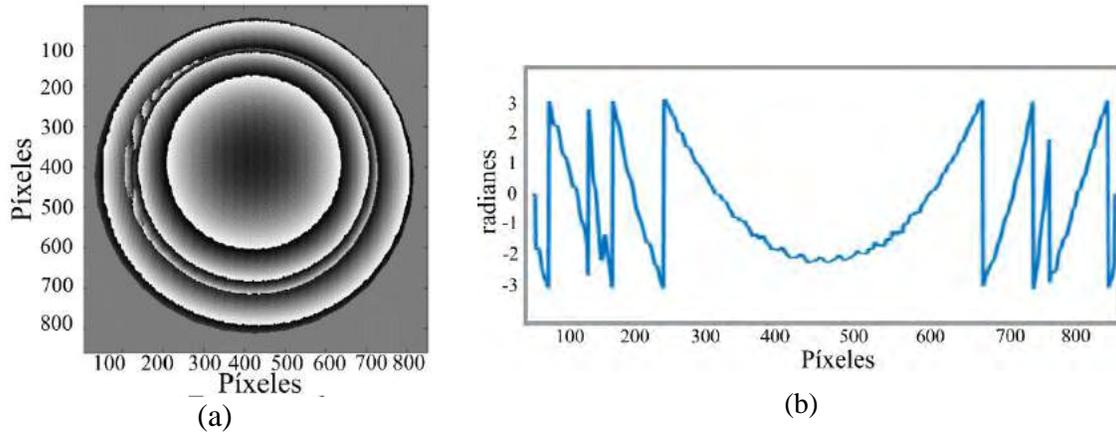


Figura 50. (a) Fase envuelta del objeto circular y (b) perfil de la fase, para la proyección en escala de grises y con iluminación color verde para $y=450$.

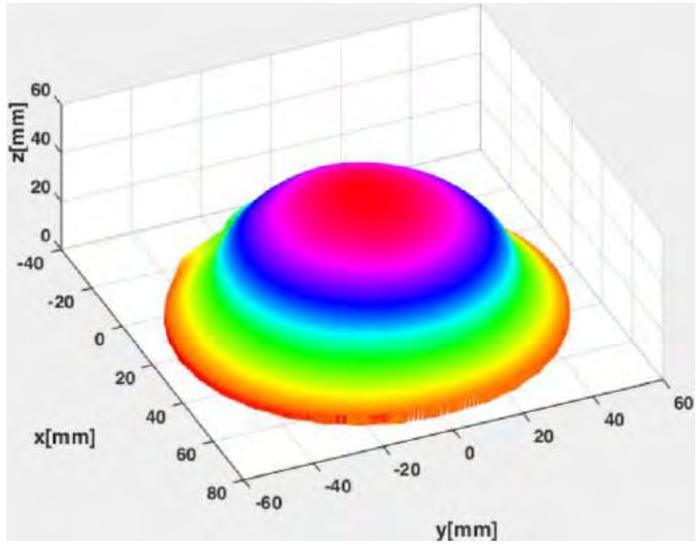


Figura 51. Topografía del objeto circular para proyección de franjas en escala de grises con iluminación color verde.

Finalmente la Figura 52, Figura 53 y Figura 54, muestran los resultados obtenidos para el caso de iluminación azul.

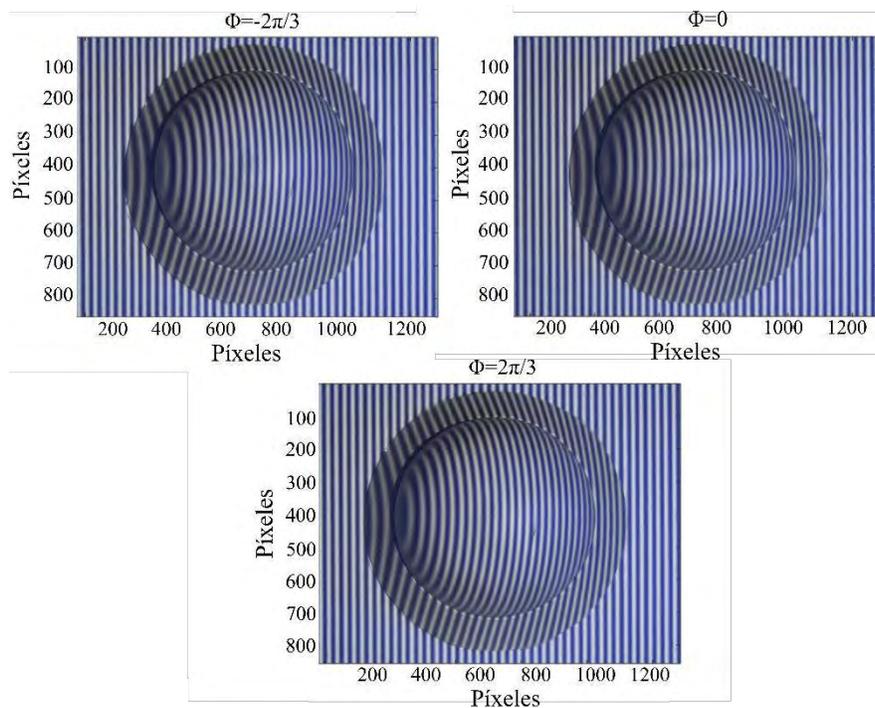


Figura 52. Proyección de franjas en escala de grises con iluminación color azul.

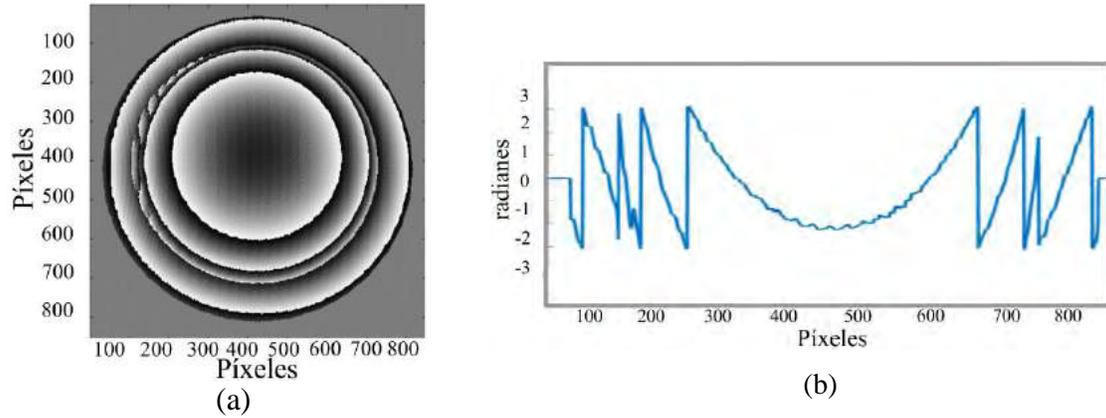


Figura 53. (a) Fase envuelta del objeto circular y (b) perfil de la fase, para la proyección en escala de grises y con iluminación color azul para $y=450$.

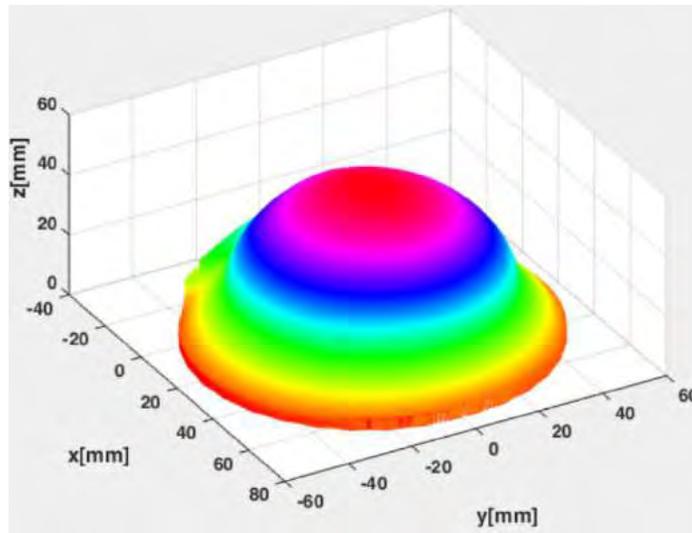


Figura 54. Topografía del objeto circular para proyección de franjas en escala de grises con iluminación color azul.

Tabla 2. Medidas reales y experimentales para el objeto circular, utilizando proyección de franjas en escala de grises con iluminación color rojo, verde y azul.

Objeto circular	Alto (mm)	Error (%)
Uso de la máquina de coordenadas	49.78	
Proyección de franjas en niveles de gris	49.61	0.34
Uso de iluminación rojo	49.60	0.36
Uso de iluminación verde	49.55	0.46
Uso de iluminación azul	49.59	0.38

4.10 Experimento 5: Proyección simultánea de franjas a color (desplazamiento de fase simultáneo) en la obtención de topografía de un objeto de prueba

A continuación se presentan los resultados para un segundo objeto de prueba, aplicando la técnica de proyección de franjas simultánea. En la Figura 55 se observan las franjas proyectadas sobre el objeto y sobre el plano de referencia. Con estas dos imágenes, se utiliza el algoritmo de *Phase Shifting* de tres pasos y se obtiene la fase envuelta del objeto, la cual se presenta en la Figura 56. Finalmente en la Figura 57 se puede observar la topografía del objeto después de aplicar un algoritmo para desenvolver la fase.

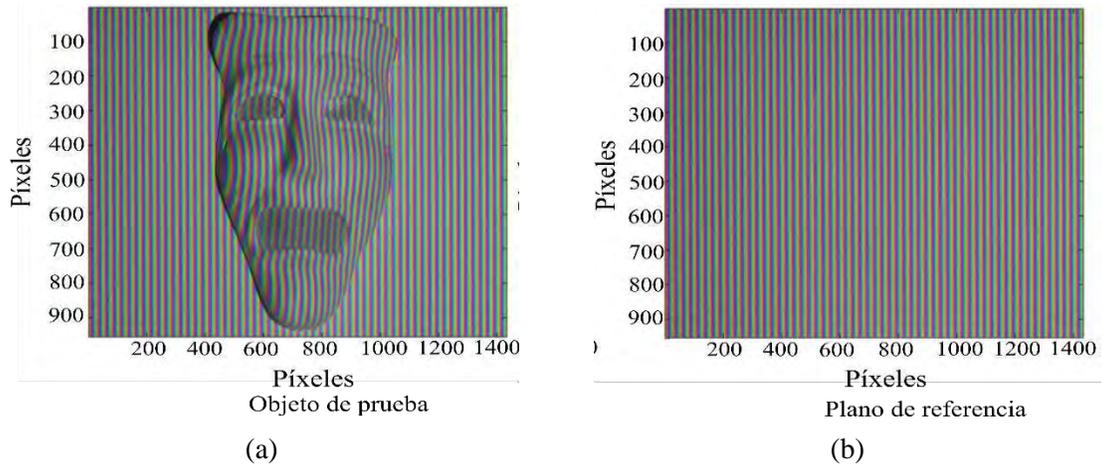


Figura 55. (a) Patrón de franjas proyectado sobre la máscara de teatro y (b) sobre el plano de referencia, para proyección simultánea.

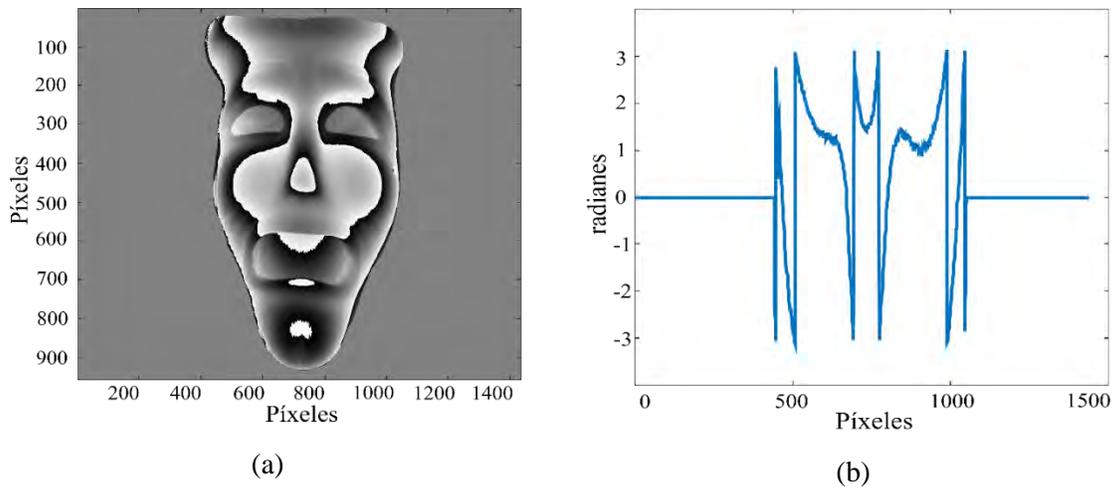


Figura 56. (a) Fase envuelta de máscara de teatro y (b) perfil de la fase envuelta, para proyección simultánea.

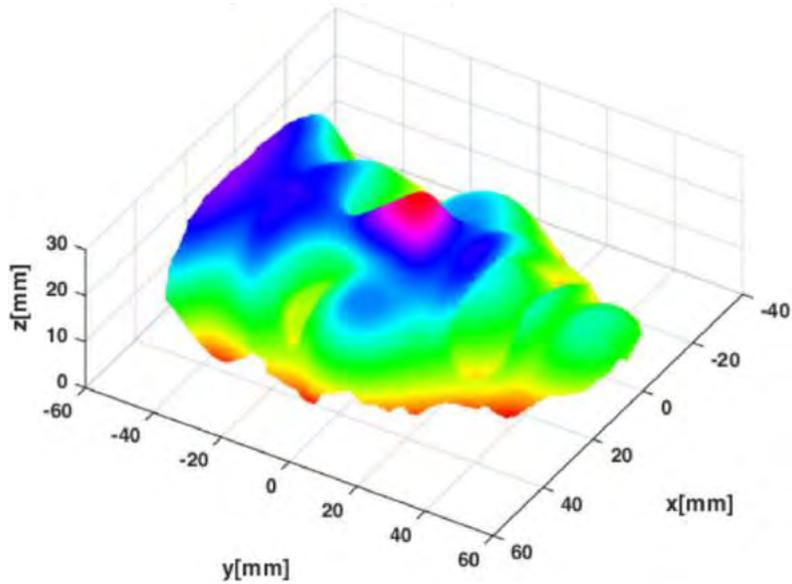


Figura 57. Topografía de la máscara de teatro para proyección simultánea.

4.11 Experimento 6: obtención de la topografía y asociación del color real en frutas

En este experimento se presentan resultados para el escaneo tridimensional de algunas manzanas. De la Figura 58 a la Figura 60 se presentan los resultados obtenidos para el caso de una manzana amarilla. La Figura 61 a la Figura 63 muestran los resultados para el caso de una manzana roja. En ambos casos se proyectaron franjas en niveles de grises y la técnica de desplazamiento de fase de tres pasos ya descrita anteriormente.

Para la asociación de la textura y el color las muestras de manzana fueron iluminadas con luz blanca y a incidencia normal es decir la fuente de iluminación estaba colocada en el eje óptico, sin la presencia de las franjas proyectadas. Se captura una imagen y ésta es superpuesta con la topografía obtenida (Figura 60 y Figura 63).

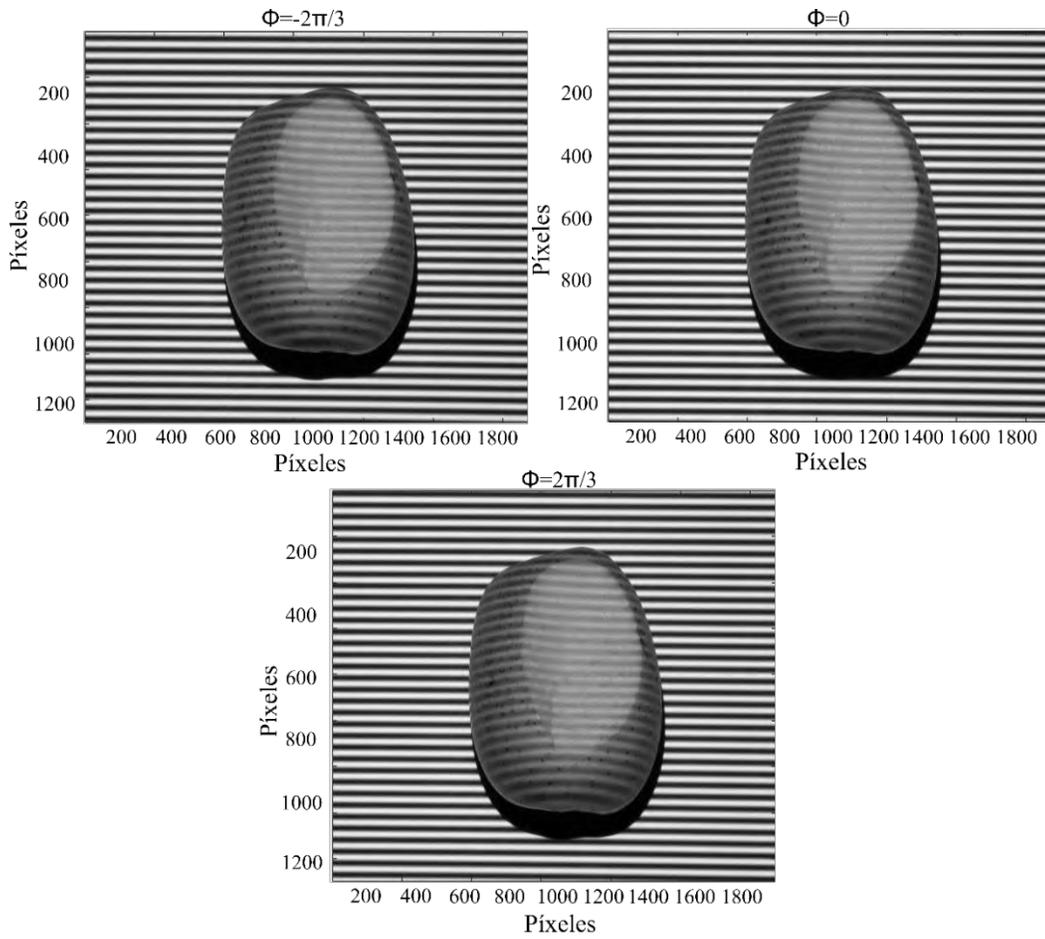


Figura 58. Proyección de franjas en escala de grises para un desplazamiento tres pasos ($2\pi/3$), sobre una manzana color amarillo con corte en la superficie.

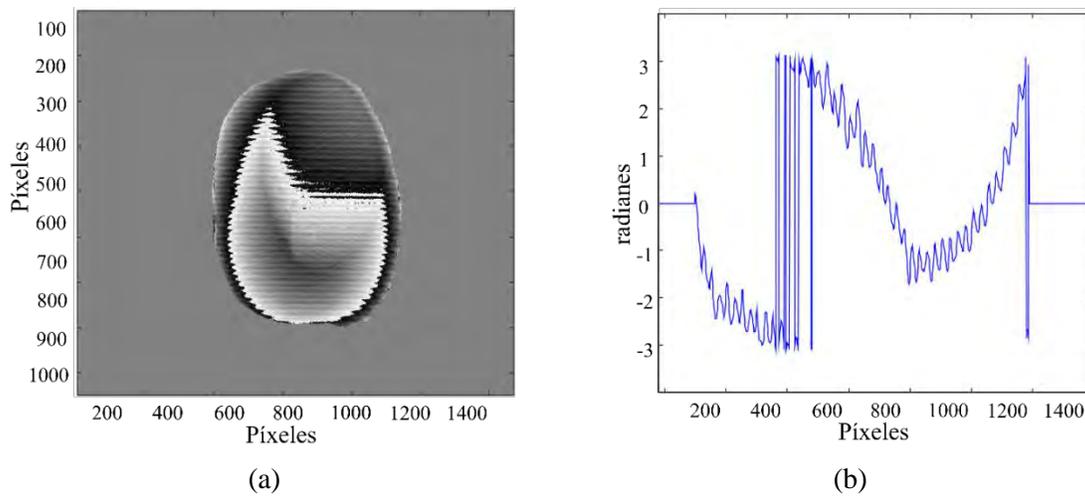


Figura 59. Fase envuelta y perfil de la fase envuelta para una manzana verde con corte en la superficie.

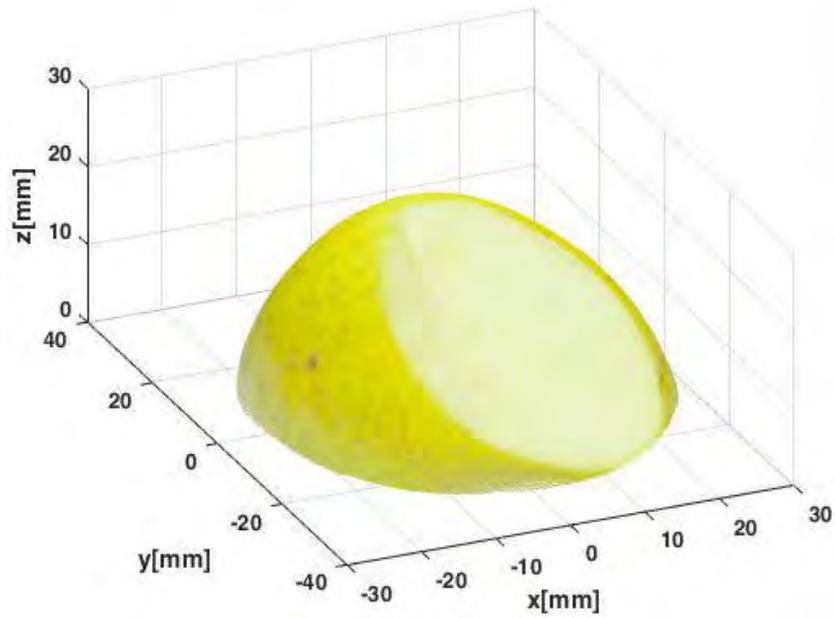


Figura 60. Topografía con color real y textura para una manzana verde con corte en la superficie.

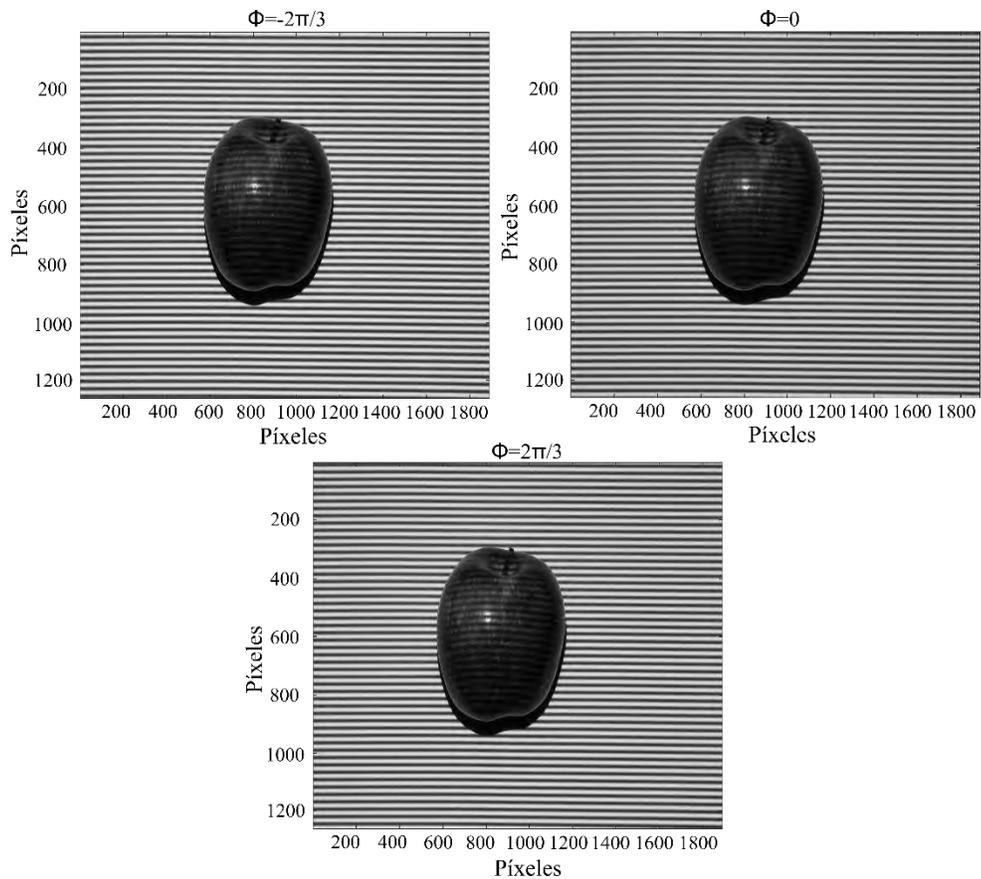


Figura 61. Proyección de franjas en escala de grises para un desplazamiento de tres pasos, sobre una manzana color roja.

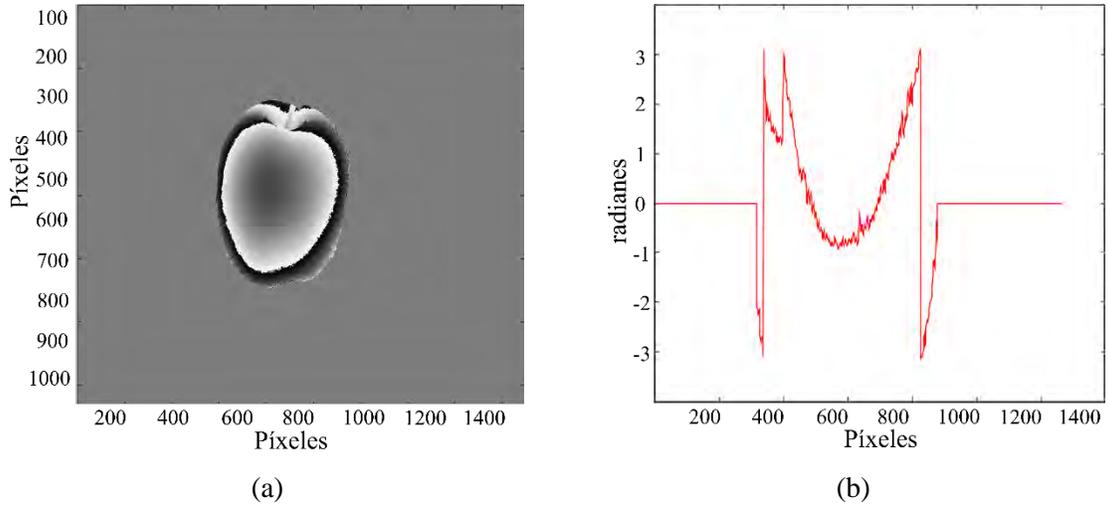


Figura 62. (a) Fase envuelta y (b) perfil de la fase envuelta para una manzana roja para $y=900$.

A partir de la fase envuelta para la manzana roja, se inició con el proceso de desenvolvimiento de la fase y se realizó el cambio a unidades de longitud, de acuerdo al periodo de las franjas, el ángulo de proyección y al tamaño del píxel. Después para asociar el color real, se construyó una nube de puntos para representar la forma de la manzana y asociar su color. En la Figura 63 se presenta la nube de puntos que representa la forma en 3D de la manzana con su color real.

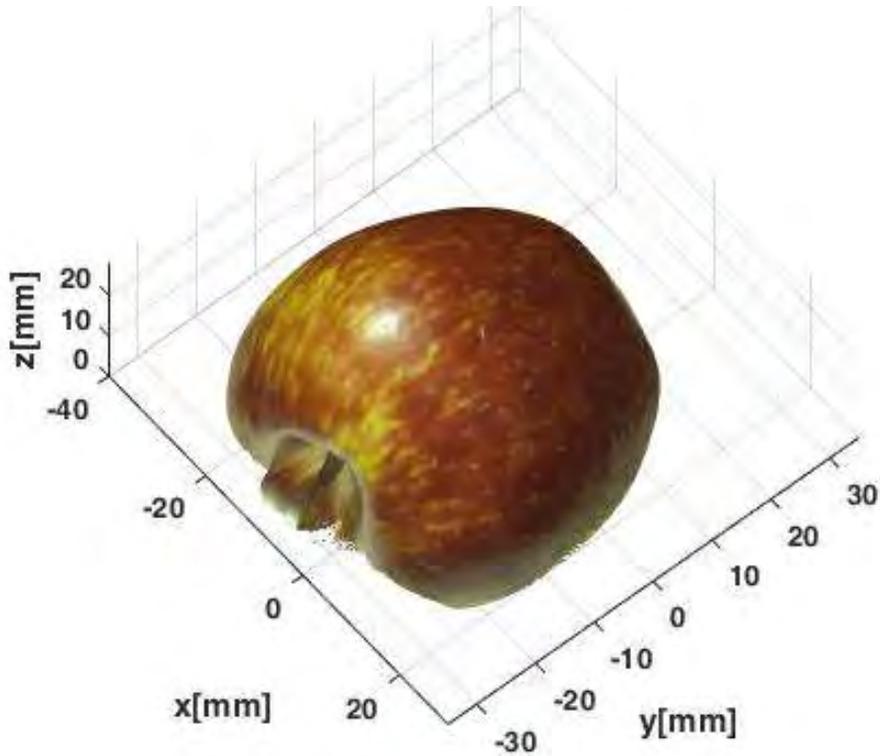


Figura 63. Topografía con color real y textura para una manzana roja.

4.12 Experimento 7: obtención de la topografía a 360 grados de una hortaliza y su asociación del color

Resulta interesante en algunos casos, obtener información de la topografía a 360 grados. En este experimento se presentan resultados para un objeto de prueba correspondiente a una zanahoria. En la Figura 64 se muestran los patrones de franjas deformados por la zanahoria.

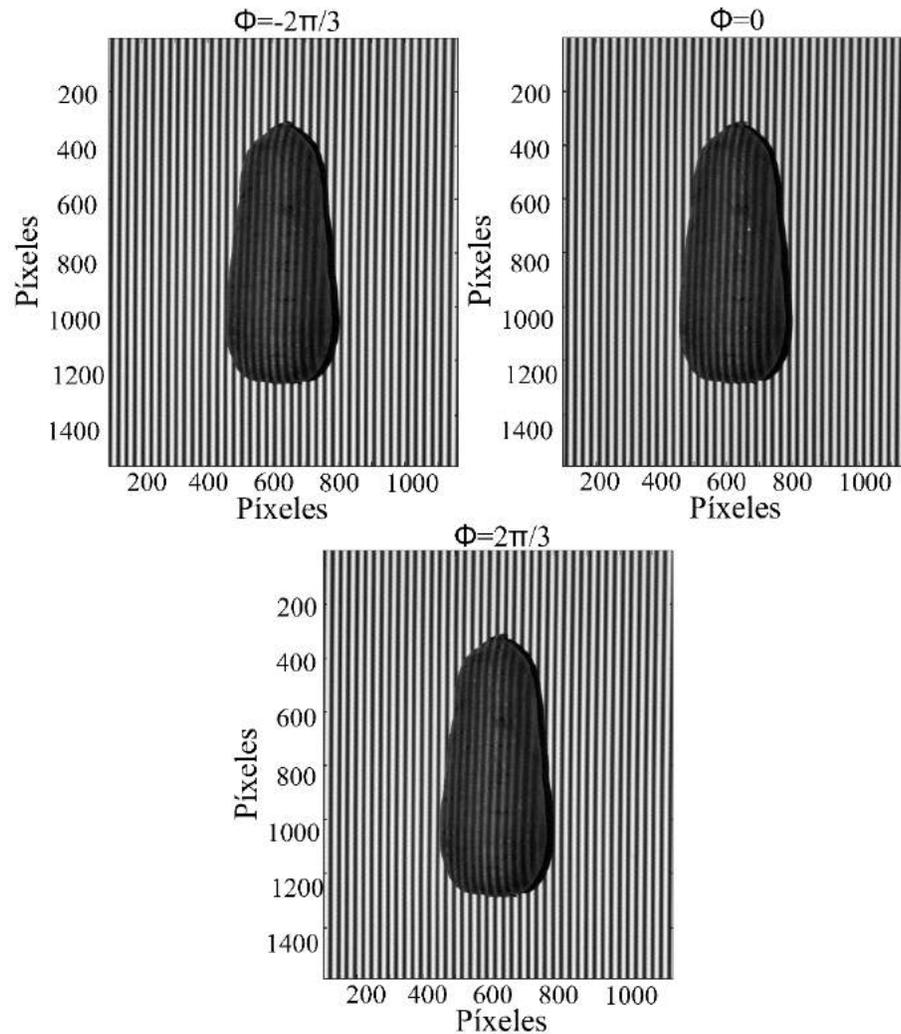


Figura 64. Patrones de franjas proyectados sobre la zanahoria, para un desplazamiento de fase de $2\pi/3$.

En la Figura 65 se puede observar la fase y el perfil de la fase envuelta para un recorrido en dirección vertical.

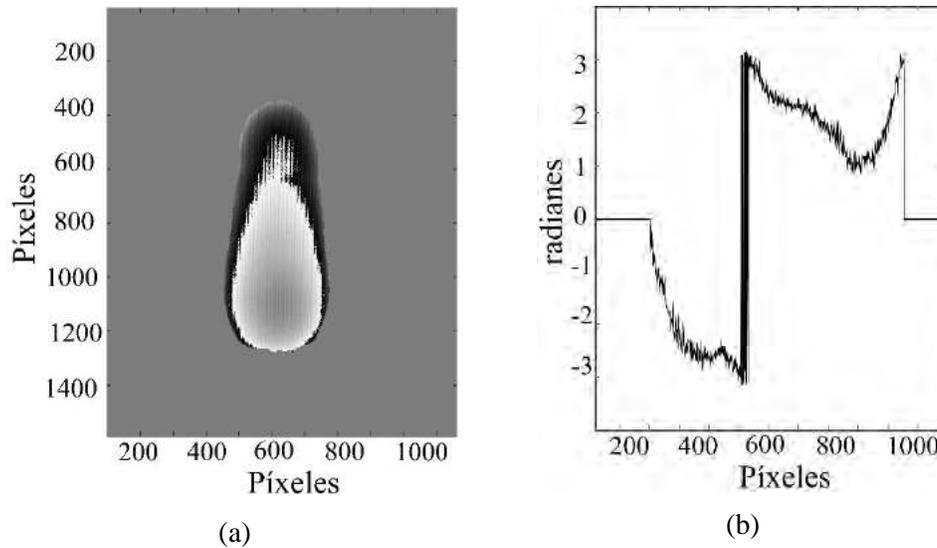


Figura 65. (a) Fase envuelta para la zanahoria y (b) perfil de la fase, para proyección de franjas en escala de grises.

Una vez que se tienen la topografía de la zanahoria en unidades de longitud, es necesario realizar la transformación de matrices a nube de puntos para asociar el color a toda la nube de puntos que representa la topografía de la zanahoria. En la Figura 66 se puede observar la reconstrucción de la zanahoria con la asociación de su color y textura sobre la superficie.

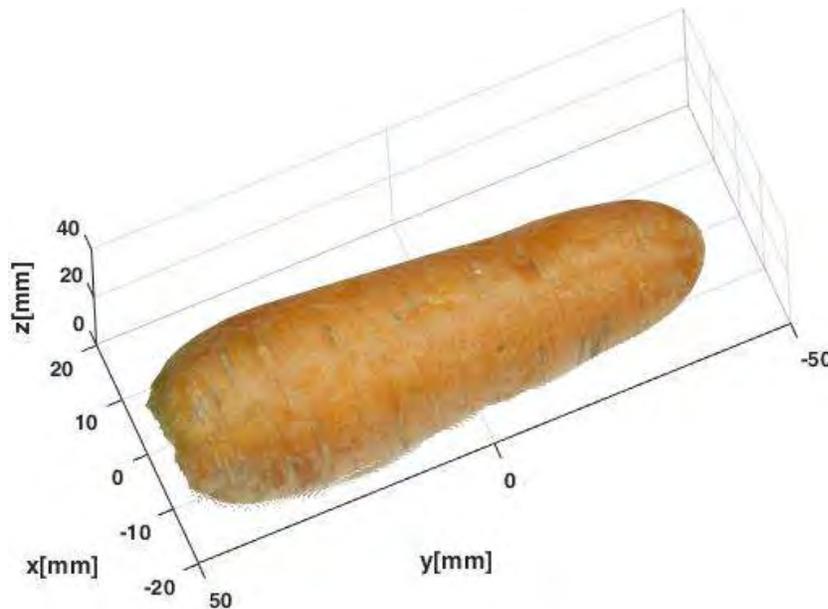


Figura 66. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura, a partir de proyección de franjas en escala de grises.

Uno de los factores que más influye en la calidad y el precio de frutas y hortalizas es la presencia de defectos en la piel de estas, dado que la mayoría de los consumidores suelen asociar calidad con buen aspecto y ausencia total de defectos. Por esta razón el color es uno

de los atributos más importantes a estudiar en las frutas y hortalizas, ya que al observar la apariencia de una fruta podemos determinar si está en buen estado y es posible consumirla. Un ejemplo de calidad en hortalizas se presenta en la Figura 67, en donde se ha realizado un seguimiento a la zanahoria después de pasar dos días sin refrigeración.

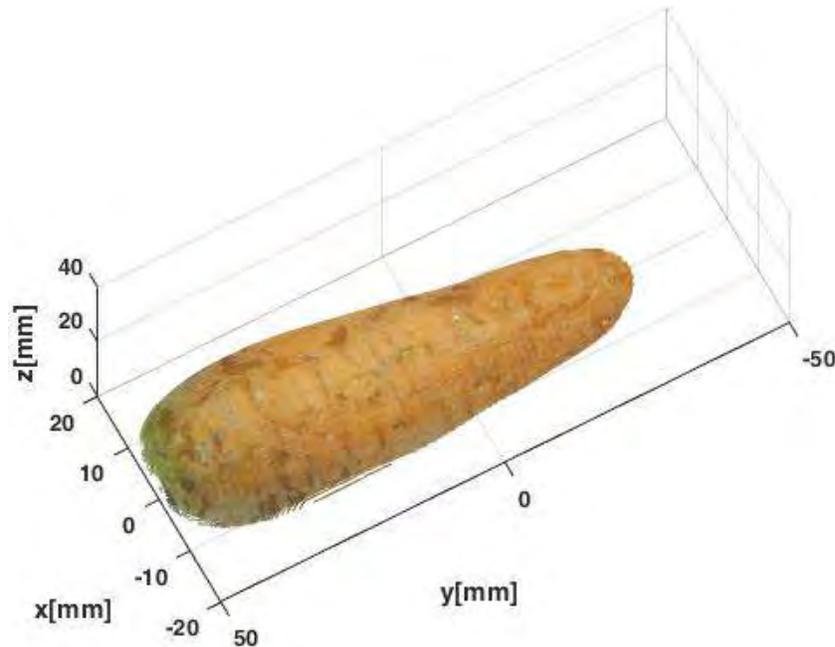


Figura 67. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura después de dos días sin refrigeración.

La topografía de la zanahoria también se obtuvo proyectando franjas a color. Es importante aclarar que la proyección de franjas a color sobre un objeto que tiene color, requiere de mucho más tiempo, ya que es necesario encontrar los valores del fondo y de la intensidad de las franjas para cada color. Se observó que la intensidad de las franjas para el color rojo debía ser menor comparada con los otros dos colores, ya que al proyectar las franjas rojas sobre el objeto y analizar el perfil de la fotografía, se tenía una pérdida de información debido a la saturación de los datos, generada por el exceso de intensidad de las franjas.

Primero se proyectaron franjas color rojo sobre la superficie de la zanahoria y sobre la superficie del plano de referencia. En la Figura 68 se puede observar la deformación de las franjas sobre la superficie de la zanahoria para proyección de franjas color rojo. Procesando estas imágenes se encontró la fase envuelta, la cual se puede observar en la Figura 69, junto con su perfil para un desplazamiento en dirección vertical sobre la fase envuelta.

En la Figura 70, se puede observar la topografía de la zanahoria con color y textura, después de desenvolver la fase, obtener las dimensiones en unidades de longitud, convertir a nubes de puntos y asociar el color sobre la superficie de la zanahoria.

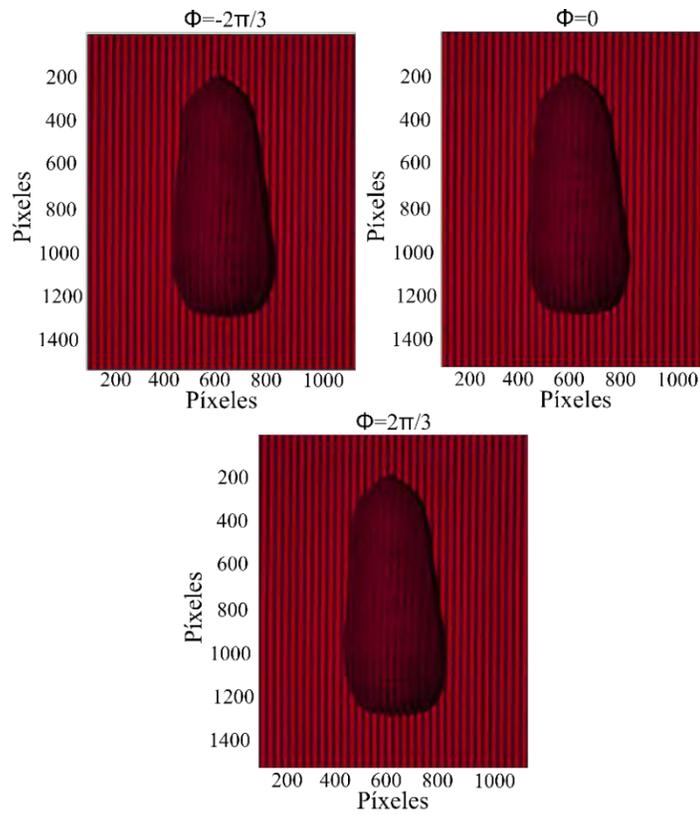


Figura 68. Proyección de franjas en color rojo sobre una zanahoria, utilizando tres pasos.

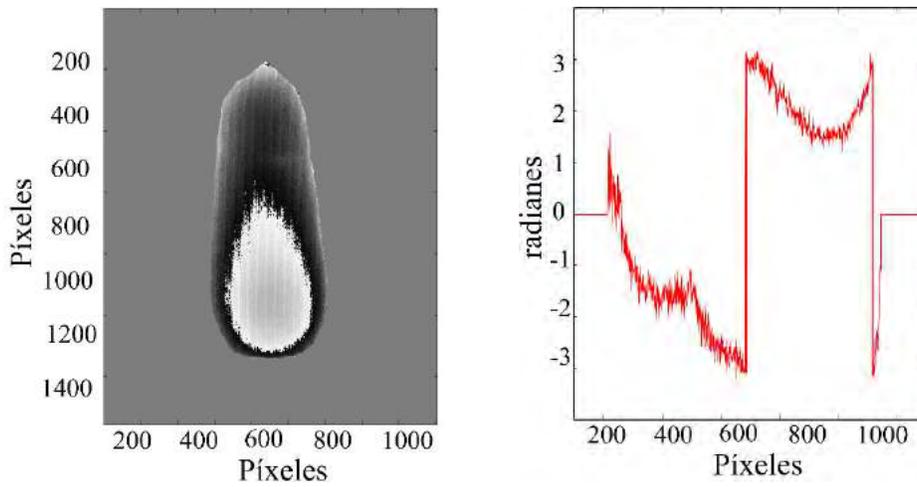


Figura 69. (a) Fase envuelta del objeto para proyección de franjas en color rojo utilizando el algoritmo de tres pasos y (b) perfil de la fase envuelta del objeto.

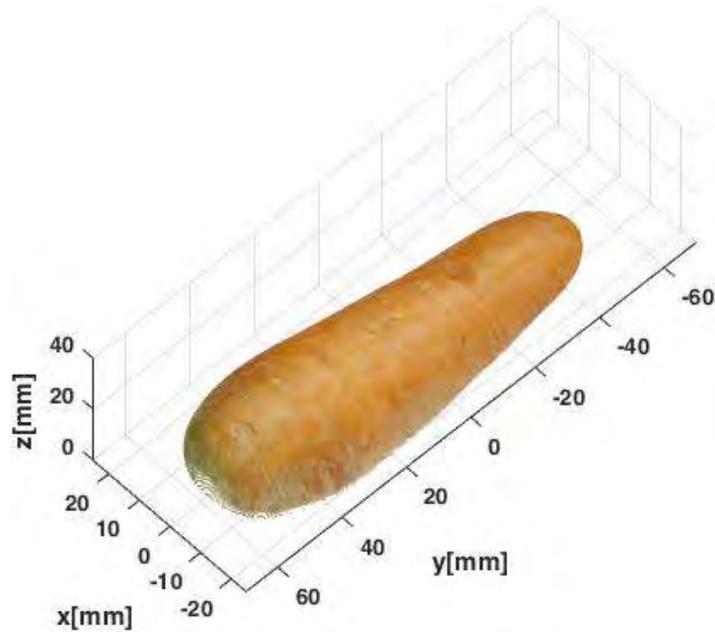


Figura 70. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura, a partir de proyección de franjas color rojo.

Luego se proyectaron franjas color verde sobre la zanahoria y sobre el plano de referencia. Estas imágenes se presentan en la Figura 71. La fase envuelta junto con el perfil de la fase en dirección vertical se observa en la Figura 72. Después se realizó el proceso de desenvolvimiento para obtener la topografía de la zanahoria y posteriormente asociar el color. En la Figura 72 se presenta la topografía con la asociación de color a partir de la proyección de franjas en color verde.

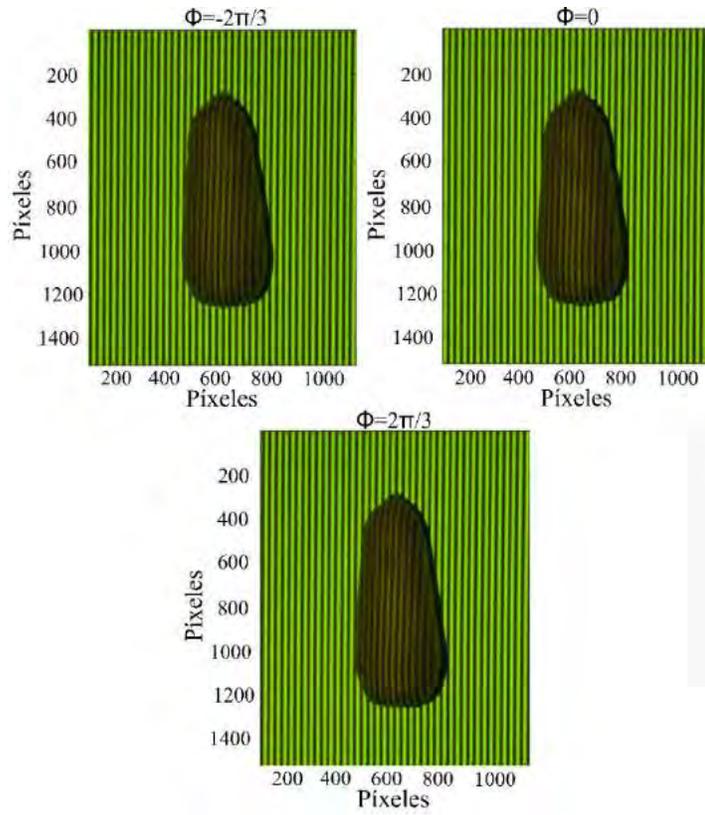


Figura 71. Proyección de franjas en color verde sobre una zanahoria, utilizando tres pasos.

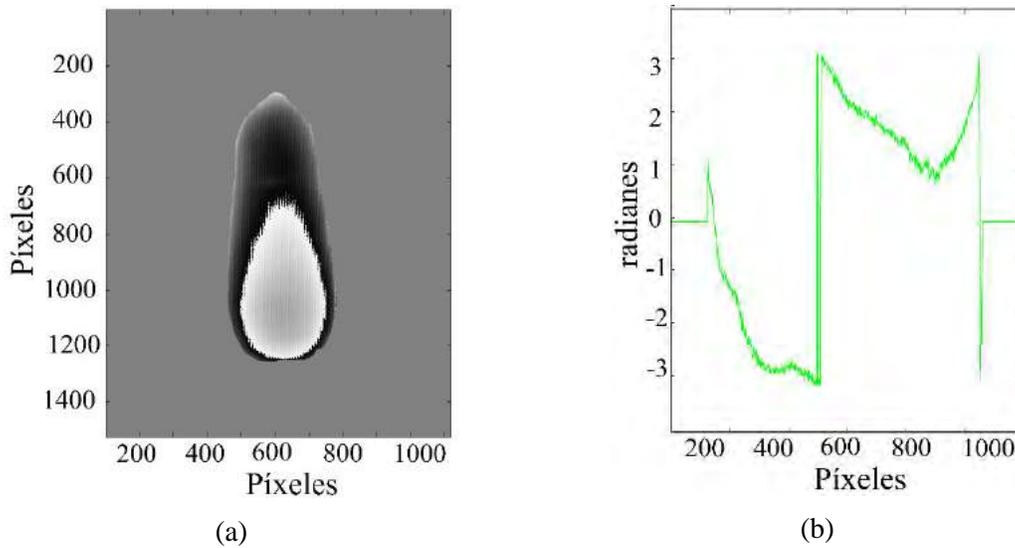


Figura 72. (a) Fase envuelta del objeto para proyección de franjas en color verde utilizando el algoritmo de tres pasos y (b) perfil de la fase envuelta del objeto.

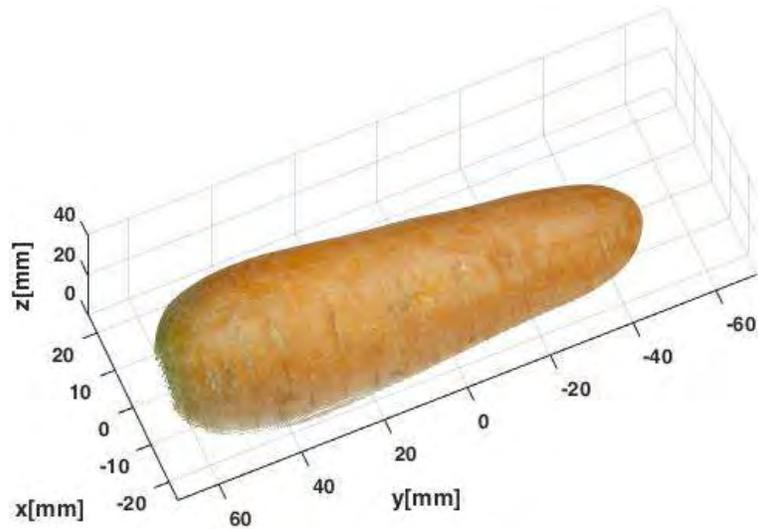


Figura 73. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura, a partir de proyección de franjas color verde.

Finalmente se proyectaron franjas color azul, las imágenes de la deformación de las franjas sobre la zanahoria se pueden observar en la Figura 74. La fase envuelta y el perfil de la fase en dirección vertical se observa en la Figura 75. Por último en la Figura 76 se observa la topografía con color para la zanahoria a partir de la proyección de franjas color azul.

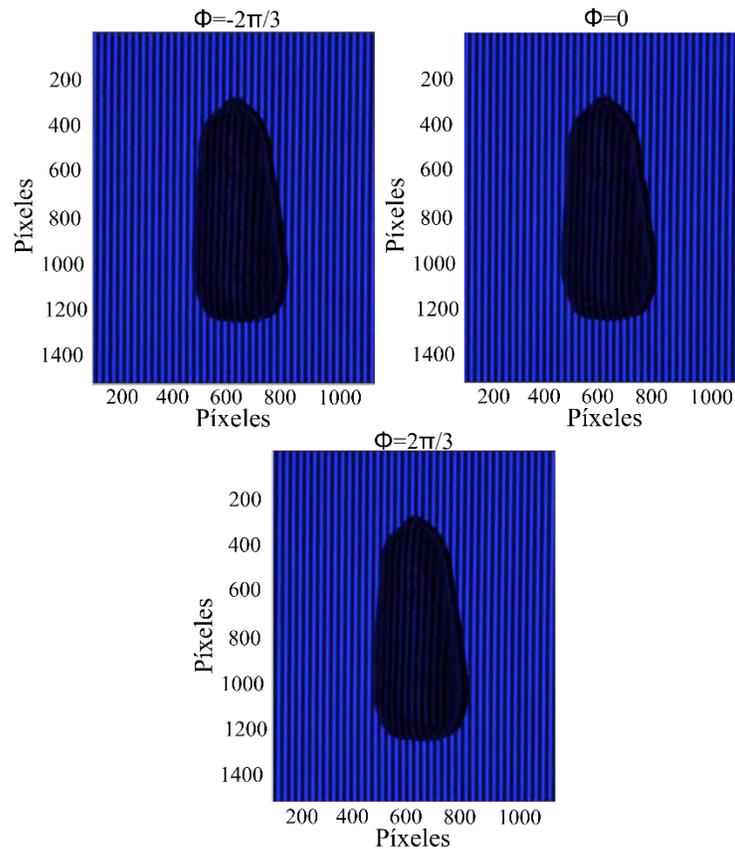


Figura 74. Proyección de franjas en color azul sobre una zanahoria, utilizando tres pasos.

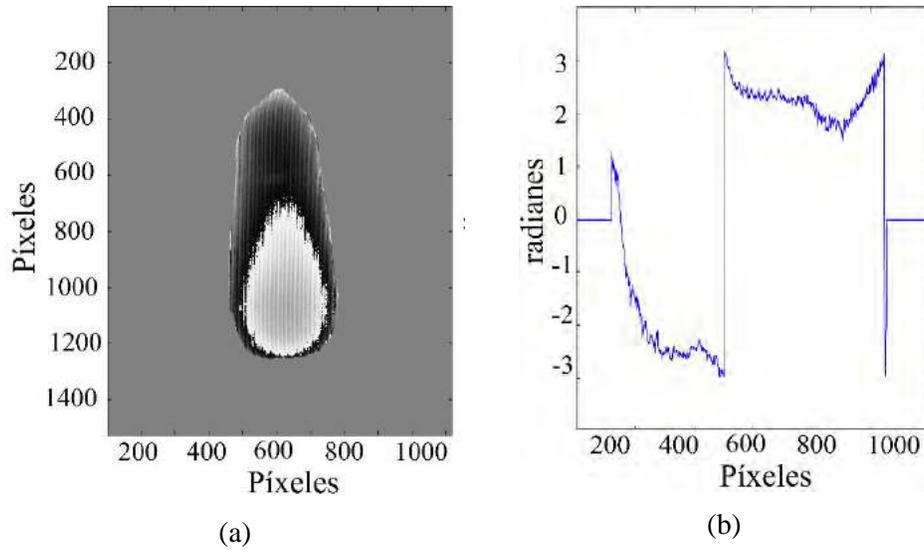


Figura 75. (a) Fase envuelta del objeto para proyección de franjas en color azul utilizando el algoritmo de tres pasos y (b) perfil de la fase envuelta del objeto.

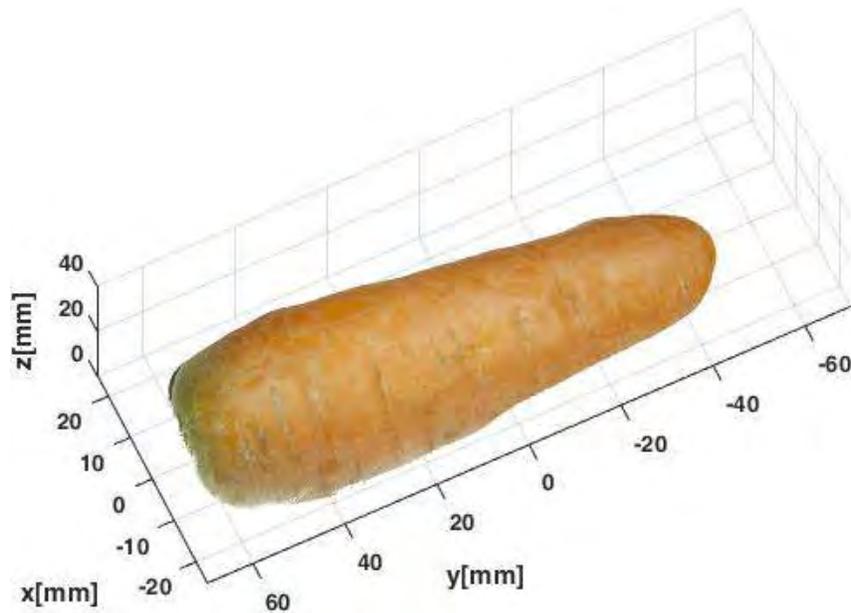


Figura 76. Topografía obtenida para la zanahoria con color y textura, a partir de proyección de franjas color azul.

Después de realizar los cuatro experimentos, diferentes proyecciones de franjas; franjas en escala de gris, franjas color rojo, franjas color verde y franjas color azul. En la Figura 77, se presenta una gráfica con los cuatro perfiles de la fase para cada experimento. Así, de esta gráfica se puede inferir que el color del objeto bajo estudio influye en la recuperación de la topografía.

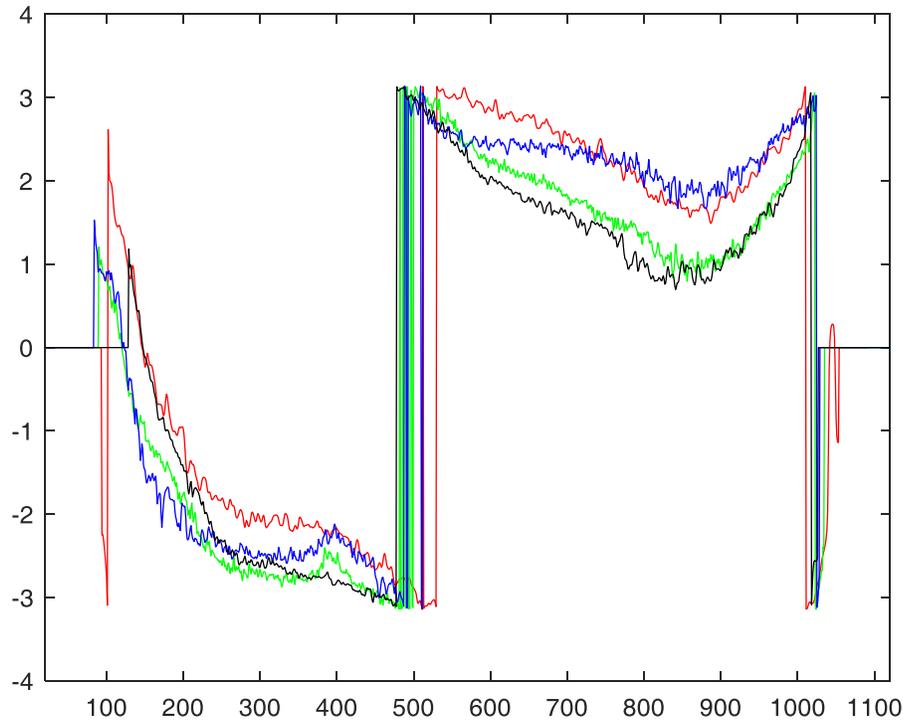


Figura 77. Perfil de la fase para la zanahoria, para diferentes proyecciones, franjas rojas, verdes, azules y en nivel de gris.

A continuación se presenta la reconstrucción tridimensional de una zanahoria a partir de la obtención de la topografía, utilizando la técnica de proyección de franjas en escala de gris. Se utilizó un proyector DLP y una cámara CCD a color con una resolución de 5616 x 3744 píxeles.

4.13 Reconstrucción tridimensional de una zanahoria

La reconstrucción 3D se realizó aplicando la técnica de *Phase Shifting*, proyectando tres patrones de franjas con un desplazamiento de fase de $2\pi/3$ en cada una de las cuatro vistas de la zanahoria (0° , 90° , 180° y 270°) como se puede observar en la Figura 78.

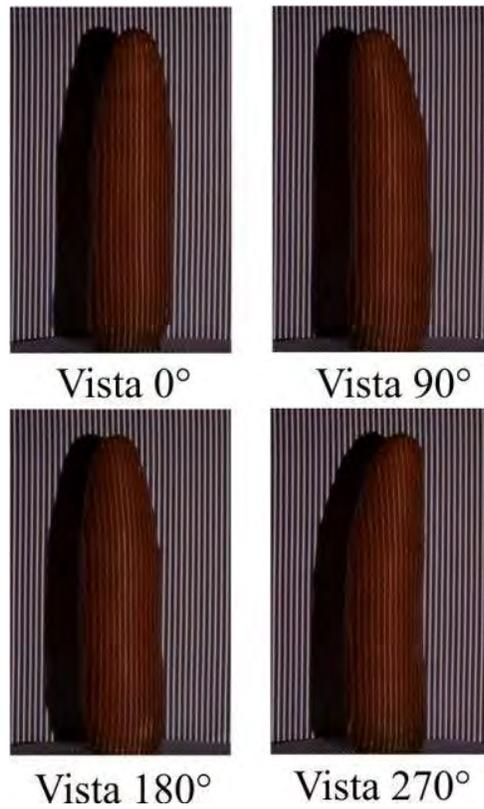


Figura 78. Patrones de franjas proyectados y deformados por la superficie de la zanahoria para las cuatro vistas.

En la Figura 79 se presentan las fases envueltas para las cuatro vistas de la zanahoria. Para obtener la fase envuelta, se utilizó el algoritmo de presentado en la Figura 28. También se aplicaron máscaras binarias para eliminar sombras antes de realizar el desenvolvimiento de cada fase.

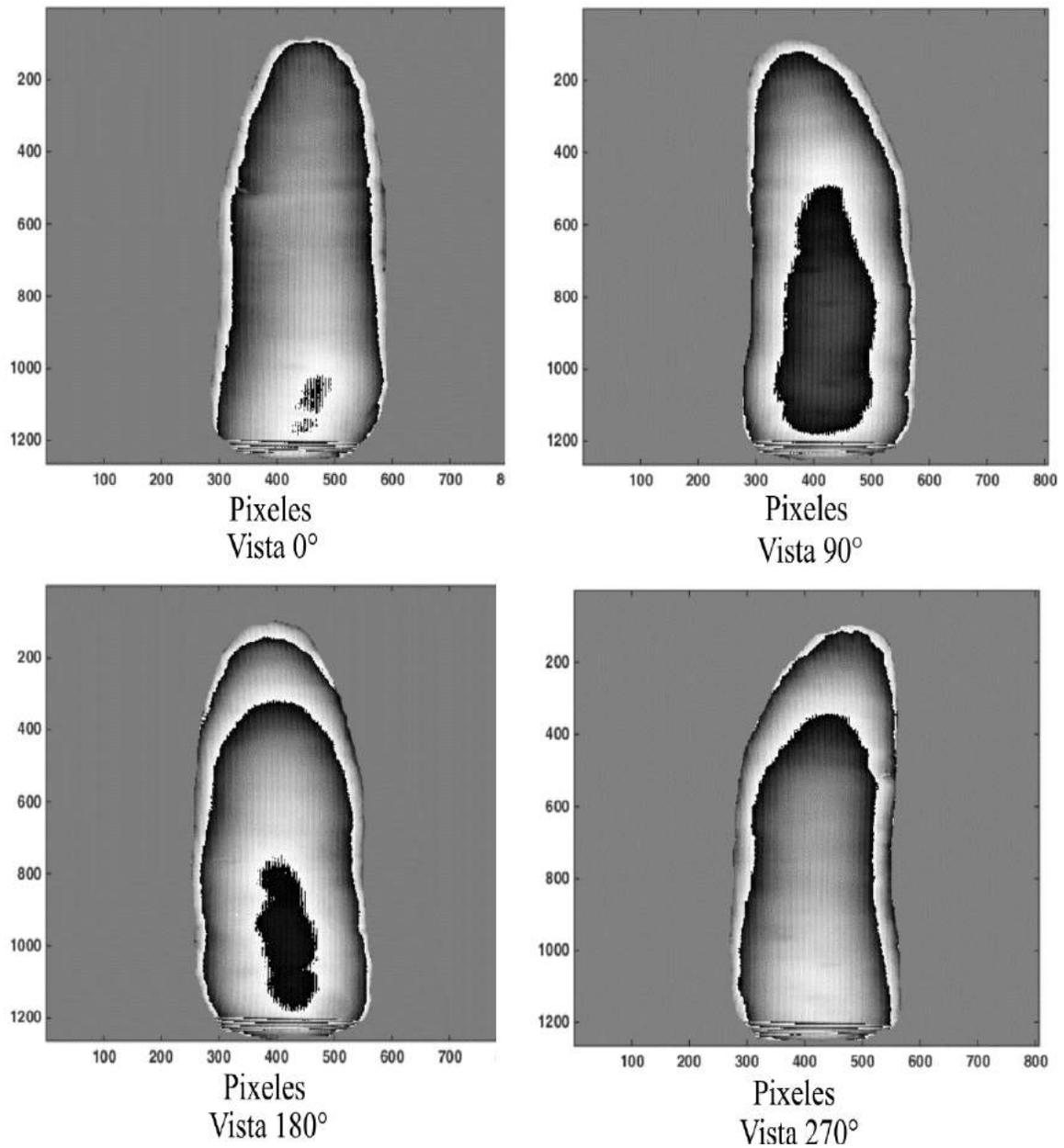


Figura 79. Fase envuelta de la zanahoria para las cuatro vistas.

A partir de cada una de las vistas de la fase envuelta, se realizó el proceso de desenvolvimiento para obtener la topografía en unidades de longitud y posteriormente se realizó un escalamiento con cada una de las vistas. En la Figura 80 se presentan las cuatro vistas de la topografía de la zanahoria su color y textura.

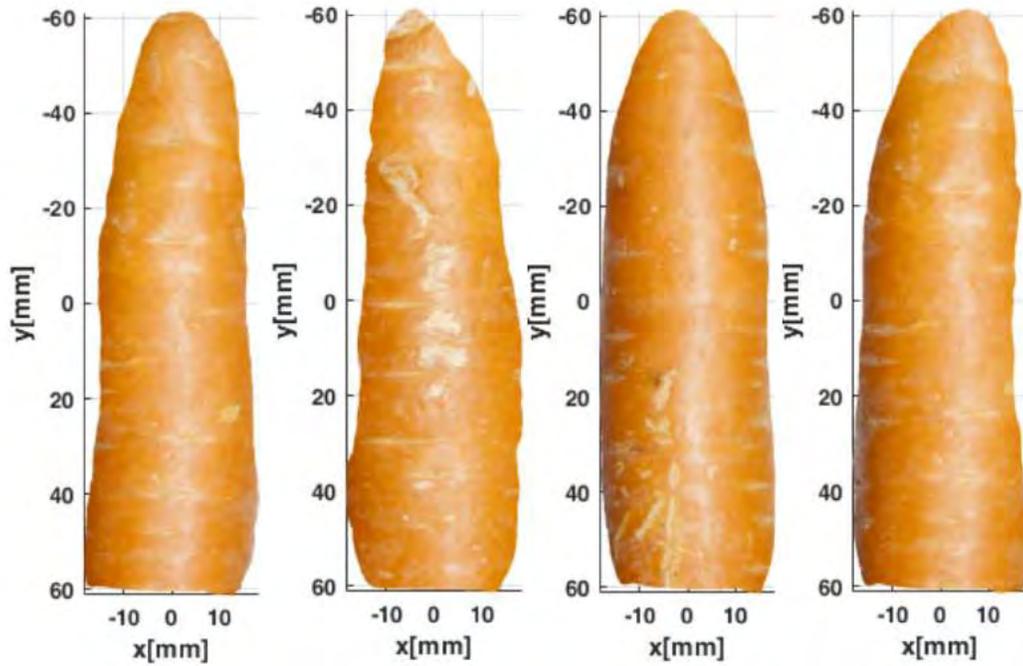


Figura 80. Topografía de la zanahoria con color y textura para cada una de las vistas.

Las vistas de la topografía de la zanahoria se convirtieron a nubes de puntos, de acuerdo a las siguientes expresiones se crearon cuatro nubes de puntos.

$$Np_1 = \begin{bmatrix} x_{f0_1} & y_{f0_1} & z_{f0_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{f0_n} & y_{f0_n} & z_{f0_n} \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$Np_2 = \begin{bmatrix} x_{f90_1} & y_{f90_1} & z_{f90_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{f90_n} & y_{f90_n} & z_{f90_n} \end{bmatrix} \quad (69)$$

$$Np_3 = \begin{bmatrix} x_{f180_1} & y_{f180_1} & z_{f180_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{f180_n} & y_{f180_n} & z_{f180_n} \end{bmatrix} \quad (70)$$

Después de convertir cada una de las vistas de la topografía a nubes de puntos, se realizó las rotaciones respectivas para cada nube de acuerdo al ángulo con el que fueron capturadas las vistas de la zanahoria.

$$Np_4 = \begin{bmatrix} x_{f270_1} & y_{f270_1} & z_{f270_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{f270_n} & y_{f270_n} & z_{f270_n} \end{bmatrix} \quad (71)$$

$$R_{0^\circ} = \begin{bmatrix} \cos(0) & 0 & -\text{sen}(0) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \text{sen}(0) & 0 & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (72)$$

$$R_{90^\circ} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 & -\text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (73)$$

$$R_{180^\circ} = \begin{bmatrix} \cos(\pi) & 0 & -\text{sen}(\pi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \text{sen}(\pi) & 0 & \cos(\pi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (74)$$

$$R_{270^\circ} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{3\pi}{2}\right) & 0 & -\text{sen}\left(\frac{3\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \text{sen}\left(\frac{3\pi}{2}\right) & 0 & \cos\left(\frac{3\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (75)$$

Para obtener información a 360 grados de la topografía, el objeto de prueba se colocó en una montura giratoria, que permite desplazamientos del objeto en el eje x y y , se pueden realizar giros de hasta 360° con una resolución de 1° .

Después de rotar las nubes de puntos se esperaba que las cuatro nubes se puedan traslapar en los puntos que comparten, para de esta manera obtener la forma tridimensional de la zanahoria. Pero en este caso se presentaron problemas al realizar el traslape de las nubes de puntos, ya que al parecer al rotar el objeto también se estaba realizando una traslación. Para realizar el alineamiento de las nubes de puntos y obtener la forma tridimensional de la zanahoria se utilizó un algoritmo llamado ICP (Iterative Closest Point) [91–95]. En la Figura 81 se puede observar la alineación de dos nubes de puntos.

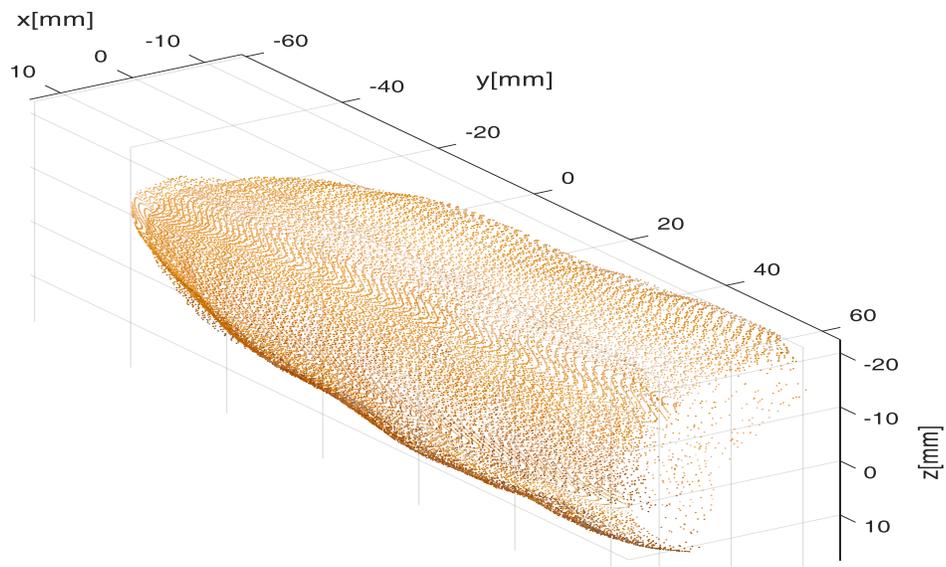


Figura 81. Vista de la alineación de las nubes de puntos Np2 y Np3 para la zanahoria.

5 Conclusiones generales

El color que percibimos de un objeto, no es una característica propia de éste, ya que la sensación generada puede variar al cambiar la fuente de luz que incide sobre el mismo. Por ejemplo, para medir el color en productos agroalimentarios se emplean colorímetros, pero aunque son muy utilizados tienen un área de medida reducida, causando dificultades para obtener un valor preciso del color en algunas zonas donde el color no es homogéneo, ya que para toda una superficie estos dispositivos proporcionan un valor general de color. Así debido a la compleja distribución y a la variación de color en los productos agroalimentarios es importante aplicar técnicas ópticas no destructivas combinadas con procesos de calibración de color, para caracterizar superficies, realizando un análisis objetivo y consistente de la calidad con respecto al color.

Se implementó la técnica de desplazamiento de fase simultáneo usando franjas RGB lo que hace posible el desplazamiento de fase de una sola toma.

Para la proyección de las franjas tipo cosenoidales, se realizaron diferentes pruebas; hasta encontrar que los perfiles para las franjas proyectadas y las franjas capturadas por la cámara fueran similares, controlando la saturación, cambiando el tiempo de exposición de la cámara, la apertura, y los valores de amplitud y fondo de las franjas proyectadas.

Se observó para cada uno de los experimentos que el contraste de las franjas capturadas por la cámara dependía de la cantidad de luz del sistema de proyección y de la resolución de la cámara.

El error asociado a la medición de la topografía con proyección de franjas en niveles de grises (.34%) y proyección de franjas RGB simultáneas (.32%) muestran aproximadamente el mismo error para un objeto blanco.

La técnica de proyección de franjas en combinación con colorimetría es útil en el análisis de la calidad de frutas y hortalizas.

En la evaluación de productos agroalimentarios la percepción del color permite describir y cuantificar características físicas. Por ejemplo la calidad de una fruta está fuertemente ligada con su apariencia física y color. Por esta razón se han implementado técnicas computacionales, como proyección de franjas a color y procesamiento de imágenes digitales, debido a que son métodos eficientes, rápidos y no destructivos, los cuales son óptimos para implementar en la inspección total o parcial en líneas de producción.

Para la asociación del color se probaron dos métodos: primero se iluminó el objeto con una fuente de luz blanca (sin iluminación de fondo) y posteriormente se capturó una fotografía. A partir de la topografía del objeto en unidades reales, se realizó la asociación del color para una sola toma. Segundo, a partir de la proyección de las franjas a color (RGB), se realizó un promedio para cada conjunto de imágenes correspondientes a cada color (Franjas Rojas, Verdes y azules), para al final obtener una imagen con el color real del objeto y sin franjas. El método de asociar el color real a partir de la captura de las franjas a color presenta

inconvenientes, ya que se deben eliminar las componentes de ruido de cada imagen ocasionadas por el sistema de proyección. Es por esta razón que el mejor método para asociar el color real es a partir de una simple fotografía a color del objeto, ya que el color se observa mucho más real.

En este trabajo se observó la ventaja que tienen las cámaras fotográficas frente a los colorímetros, ya que cuando se emplea una cámara fotográfica para determinar el color de un objeto a través de una imagen, es posible apreciar y encontrar los diferentes valores de color en áreas relativamente grandes, comparadas con el área de medición que permiten los colorímetros. Así cada valor de color sobre la superficie del objeto, depende estrictamente de la calibración de la cámara fotográfica, sensor, resolución, formato de compresión, fuente de iluminación y finalmente la forma del objeto.

Se observó que la proyección de franjas RGB de forma simultánea presenta inconvenientes cuando se trabaja con objetos a color. Por ejemplo para obtener la fase de una zanahoria, se observaron las componentes de cada canal para la imagen, así la componente de la imagen asociada con el canal rojo presentaba mayor amplitud que las componentes para el canal verde y azul. Lo cual se atribuye a la reflexión del color debido al objeto, ya que el color de la zanahoria se encuentra más cercano a la longitud de onda para el rojo.

En la técnica de proyección de franjas se presentan inconvenientes cuando la superficie del objeto sobre el cual se están proyectando las franjas tiene cambios bruscos en su pendiente, ya que al proyectar las franjas por lo general se introducen sombras debidas a la pendiente del objeto, provocando que se tengan discontinuidades en la fase, por lo que es necesario utilizar algoritmos más especializados para desenvolver fase.

5.1 Trabajos futuros

Como trabajo futuro se propone:

Evaluar el “cross talking” en la técnica de proyección de franjas a color.

Estudiar la posibilidad de obtener la topografía y el color del objeto de la proyección de franjas a color RGB.

Implementar la técnica de proyección de franjas a color RGB y la asociación del color real, para evaluar la calidad y obtener el volumen para diferentes productos del sector agroalimentario.

5.2 Trabajos presentados

Algunos resultados obtenidos de la presente tesis se presentaron en los siguientes congresos:

Leidy Johana Quintero Rodríguez, Amalia Martínez García, “Análisis de textura y color para inspección de frutas y hortalizas usando técnicas ópticas”, LIX CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA, León, Gto., 2 al 7 de octubre de 2016 (sesión simultánea S23-03).

Amalia Martínez-García, **Leidy-Johana Quintero-Rodríguez**, Juan-Antonio Rayas-Álvarez, “3D Measurement sistema base on color fringe projection technique”, IX Iberoamerican Optics Meeting/XII Latinoamerican on Optics, Lasers and Applications (RIO/OPTILAS 2016, 21-25 november 2016), p.143. Pucón, Chile. (Oral presentation: T4_19).

También se colaboró en la implementación de la técnica de proyección de franjas para el trabajo:

Alejandra Alicia Silva Moreno, Amalia Martínez García, **Leidy Johana Quintero Rodríguez**, “Evaluación de productos cárnicos usando la técnica de proyección de franjas”, LIX CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA, León, Gto., 2 al 7 de octubre de 2016 (sesión mural M3B-15)

5.3 Referencias

- [1] P. D. E. Segmentaci and D. E. N. D. E. Puntos, “Nubes De Puntos,” 2012.
- [2] C. Salcedo, A. Felipe, B. Martínez, Q. Salazar, and E. Andrés, “Procesamiento de nubes de puntos por medio de la librería PCL Point cloud processing by PCL library,” vol. XVII, no. 52, pp. 136–142, 2012.
- [3] S. S. Gorthi and P. Rastogi, “Fringe projection techniques: Whither we are?,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 2, pp. 133–140, Feb. 2010.
- [4] Q. Kemaο, “Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 45, no. 2, pp. 304–317, 2007.
- [5] J. Chen, T. Guo, L. Wang, Z. Wu, X. Fu, and X. Hu, “Microscopic fringe projection system and measuring method,” in *SPIE 8759, Eighth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation*, 2013, vol. 8759, p. 87594U.
- [6] L.-C. Chen and C.-C. Huang, “Miniaturized 3D surface profilometer using digital fringe projection,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 1061–1068, May 2005.
- [7] K. Genovese, “A video-optical system for time-resolved whole-body measurement on vascular segments,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 47, no. 9, pp. 995–1008, 2009.
- [8] F. Berryman, P. Pynsent, J. Fairbank, and S. Disney, “A new system for measuring three-dimensional back shape in scoliosis.,” *Eur. Spine J.*, vol. 17, no. 5, pp. 663–72, May 2008.
- [9] P. F. Gomes, M. Sesselmann, C. D. C. M. Faria, P. A. Araújo, and L. F. Teixeira-Salmela, “Measurement of scapular kinematics with the moiré fringe projection technique,” *J. Biomech.*, vol. 43, no. 6, pp. 1215–1219, Apr. 2010.
- [10] F. Lilley, M. J. Lalor, and D. R. Burton, “Robust fringe analysis system for human body shape measurement,” *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 187–195, 2000.
- [11] Y. Ferraq *et al.*, “Use of a 3-D imaging technique for non-invasive monitoring of the depth of experimentally induced wounds.,” *Skin Res. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 399–405, Nov. 2007.
- [12] F. Verlag, “Indications for Optical Shape Measurements,” vol. 58, pp. 55–58, 2002.
- [13] Q. Zhang and X. Su, “High-speed optical measurement for the drumhead vibration.,” *Opt. Express*, vol. 13, no. 8, pp. 3110–3116, 2005.
- [14] Q.-C. Zhang and X.-Y. Su, “An optical measurement of vortex shape at a free surface,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 34, no. 2, pp. 107–113, 2002.
- [15] K. Genovese, L. Lamberti, and C. Pappalettere, “Mechanical characterization of hyperelastic materials with fringe projection and optimization techniques,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 44, no. 5, pp. 423–442, 2006.

- [16] I. Meccanica, P. Bari, V. Japigia, and A. Lucano, "Application of displacement and contouring measurements to the determination of constitutive equations," *Meccanica*, no. i.
- [17] G. S. Spagnolo and D. Ambrosini, "Diffractive optical element based sensor for roughness measurement," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 100, no. 2–3, pp. 180–186, Sep. 2002.
- [18] G. Frankowski and R. Hainich, "DLP-based 3D metrology by structured light or projected fringe technology for life sciences and industrial metrology," in *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications*, 2009, vol. 7210, p. 72100C.
- [19] H.-N. Yen, D.-M. Tsai, and J.-Y. Yang, "Full-Field 3-D Measurement of Solder Pastes Using LCD-Based Phase Shifting Techniques," *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.*, vol. 29, no. 1, pp. 50–57, Jan. 2006.
- [20] D. Hong, H. Lee, M. Y. Kim, H. Cho, and J. Il Moon, "Sensor fusion of phase measuring profilometry and stereo vision for three-dimensional inspection of electronic components assembled on printed circuit boards.," *Appl. Opt.*, vol. 48, no. 21, pp. 4158–69, Jul. 2009.
- [21] S. Caspar, M. Honegger, S. Rinner, P. Lambelet, C. Bach, and A. Ettemeyer, "High speed fringe projection for fast 3D inspection," in *Measurement*, 2011, vol. 8082, no. January 2016, p. 80820Y.
- [22] J. Yagnik, G. Siva, K. Ramakrishnan, and L. Rao, "3D Shape Extraction of Human Face in Presence of Facial Hair: A Profilometric Approach," in *TENCON 2005 - 2005 IEEE Region 10 Conference*, 2005, vol. 2007, pp. 1–5.
- [23] G. S. Spagnolo, D. Ambrosini, and D. Paoletti, "Low-cost optoelectronic system for three-dimensional artwork texture measurement.," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 13, no. 3, pp. 390–6, Mar. 2004.
- [24] G. Sansoni, M. Trebeschi, and F. Docchio, "State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation," *Sensors*, vol. 9, no. 1, pp. 568–601, Jan. 2009.
- [25] D. Post, "Moiré interferometry at VPI & SU," *Exp. Mech.*, vol. 23, no. 2, pp. 203–210, Jun. 1983.
- [26] M. Z. Brown, D. Burschka, and G. D. Hager, "Advances in computational stereo," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 25, no. 8, pp. 993–1008, Aug. 2003.
- [27] J. Davis, D. Neh, R. Ramamoorthi, and S. Rusinkiewicz, "Spacetime stereo: a unifying framework for depth from triangulation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 27, no. 2, pp. 296–302, Feb. 2005.
- [28] L. Zhang, N. Snavely, B. Curless, and S. M. Seitz, "Spacetime faces," *ACM Trans. Graph.*, vol. 23, no. 3, p. 548, Aug. 2004.
- [29] M. Takeda and K. Mutoh, "Fourier transform profilometry for the automatic

- measurement of 3-D object shapes.,” *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 24, p. 3977, Dec. 1983.
- [30] S. Toyooka and Y. Iwaasa, “Automatic profilometry of 3-D diffuse objects by spatial phase detection,” *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 10, pp. 1630–1633, 1986.
- [31] M. a. Navarro, J. C. Estrada, M. Servin, J. a. Quiroga, and J. Vargas, “Fast two-dimensional simultaneous phase unwrapping and low-pass filtering,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 3, p. 2556, 2012.
- [32] K. G. Larkin, “Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, no. 4, p. 832, Apr. 1996.
- [33] W. Zhang, X. Lu, L. Fei, H. Zhao, H. Wang, and L. Zhong, “Simultaneous phase-shifting dual-wavelength interferometry based on two-step demodulation algorithm,” vol. 39, no. 18, pp. 5375–5378, 2014.
- [34] P. S. Huang and S. Zhang, “A fast three-step phase-shifting algorithm,” 2005, vol. 6000, p. 60000F–60000F–8.
- [35] L. Huang, Q. Kemaο, B. Pan, and A. K. Asundi, “Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 2, pp. 141–148, Feb. 2010.
- [36] “Spatial Methods with Carrier,” in *Fringe Pattern Analysis for Optical Metrology*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014, pp. 149–200.
- [37] D. Malacara, *Interferogram Analysis for Optical Testing*, Second. CRC Press, 2005.
- [38] S. Lei and S. Zhang, “Digital sinusoidal fringe pattern generation: Defocusing binary patterns VS focusing sinusoidal patterns,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 5, pp. 561–569, May 2010.
- [39] M. Chang, P. P. Lin, and W. C. Tai, “A fringe center detection technique based on a sub-pixel resolution, and its applications using sinusoidal gratings,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 20, no. 3, pp. 163–176, Jan. 1994.
- [40] Y. Wang, J. I. Laughner, I. R. Efimov, and S. Zhang, “3D absolute shape measurement of live rabbit hearts with a superfast two-frequency phase-shifting technique Abstract,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 5, pp. 6631–6636, 2013.
- [41] M. J. Zervas, “Development of a high speed, robust system for full field-of-view 3D shape measurements,” p. 118, 2011.
- [42] G. H. Notni and G. Notni, “Digital fringe projection in 3D shape measurement: an error analysis,” 2003, vol. 5144, p. 372.
- [43] C. Jiang *et al.*, “Multi-frequency color-marked fringe projection profilometry for fast 3D shape measurement of complex objects,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 19, p. 24152, Sep. 2015.
- [44] W. Li and S. Duan, “Color calibration and correction applying linear interpolation technique for color fringe projection system,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 127, no. 4, pp.

2074–2082, 2016.

- [45] K. L. Yam and S. E. Papadakis, “A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces,” *J. Food Eng.*, vol. 61, no. 1 SPEC., pp. 137–142, 2004.
- [46] M. Petracci, M. Betti, M. Bianchi, and C. Cavani, “Color variation and characterization of broiler breast meat during processing in Italy.,” *Poult. Sci.*, vol. 83, no. 12, pp. 2086–92, Dec. 2004.
- [47] O. Basset, “Texture image analysis: application to the classification of bovine muscles from meat slice images,” *Opt. Eng.*, vol. 38, no. 11, p. 1950, Nov. 1999.
- [48] D. . Sena Jr, F. A. . Pinto, D. . Queiroz, and P. . Viana, “Fall Armyworm Damaged Maize Plant Identification using Digital Images,” *Biosyst. Eng.*, vol. 85, no. 4, pp. 449–454, Aug. 2003.
- [49] F. Mendoza, P. Dejmek, and J. M. Aguilera, “Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis,” *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 285–295, Sep. 2006.
- [50] D. J. Lee, X. Xu, J. Eifert, and P. Zhan, “Area and volume measurements of objects with irregular shapes using multiple silhouettes,” *Opt. Eng.*, vol. 45, no. 2, p. 27202, 2006.
- [51] R. G. Kuehni, *Color An Introduction to Practice and Principles*, Second. Hoboken, New Jersey, 2005.
- [52] M. A. Webster and J. D. Mollon, “Adaptation and the Color Statistics of Natural Images - Webster.pdf,” vol. 37, no. 23, pp. 3283–3298, 1997.
- [53] M. Abidi and A. Koschan, *Digital Color Image Processing*, Second. Hoboken, New Jersey, 2008.
- [54] D. Malacara, *Color Vision and Colorimetry Theory and Applications*, Second. Bellingham, Washington, 2002.
- [55] C. R. Gonzales, E. R. Woods, and L. S. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*, Second. Upper Saddle River, New Jersey, 2004.
- [56] M. Konigsberg, “Emission and absorption spectra and the phenomenon of color vision,” *Biochem. Educ.*, vol. 27, no. 3, pp. 174–176, 1999.
- [57] T. Versus and O. Matter, “Interaction of light with matter 2.1,” pp. 11–34.
- [58] U. Arnkil, Harald; Anter, Karin; Klaren, “Colour and Light,” 2012.
- [59] C. Klingshirn, “Interaction of Light with Matter,” *Semicond. Opt.*, pp. 37–72, 2005.
- [60] H. R. Kang, *Computational Color Technology*. 1000 20th Street, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE, 2006.
- [61] F. W. Billmeyer, “Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd ed., by Gunter Wyszecki and W. S. Stiles, John Wiley and Sons, New

- York, 1982, 950 pp. Price: \$75.00,” *Color Res. Appl.*, vol. 8, no. 4, pp. 117–263, 1983.
- [62] C. S. McCamy, “Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates,” *Color Res. Appl.*, vol. 17, no. 2, pp. 142–144, Apr. 1992.
- [63] J. Romero, A. García-Beltrán, and J. Hernández-Andrés, “Linear bases for representation of natural and artificial illuminants,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 14, no. 5, pp. 1007–1014, 1997.
- [64] J. Schanda, *Colorimetry Understanding the CIE System*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [65] V. Walsh, “Color-Vision - Adapting to Change,” *Curr. Biol.*, vol. 5, no. 7, pp. 703–705, 1995.
- [66] P. J. Kellman and T. F. Shipley, “A theory of visual interpolation in object perception,” *Cogn. Psychol.*, vol. 23, no. 2, pp. 141–221, Apr. 1991.
- [67] E. Cassirer, “The Concept of Group and the Theory of Perception,” *Philos. Phenomenol. Res.*, vol. 5, no. 1, p. 1, Sep. 1944.
- [68] B. Hill, “Color capture, color management, and the problem of metamerism: does multispectral imaging offer the solution?,” in *SPIE Conference on Color Imaging*, 1999, vol. 33, no. January, pp. 2–14.
- [69] A. N. Venetsanopoulos and K. N. Plataniotis, “Color Image Processing and Applications,” *Eng. - Monogr.*, p. 355, 2013.
- [70] R. G. Kuehni, “Sources of Color,” in *Color*, John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 1–21.
- [71] H. D. Cheng, X. H. Jiang, Y. Sun, and J. Wang, “Color image segmentation: Advances and prospects,” *Pattern Recognit.*, vol. 34, no. 12, pp. 2259–2281, 2001.
- [72] M. Celenk, “A color clustering technique for image segmentation,” *Comput. Vision, Graph. Image Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 145–170, Nov. 1990.
- [73] K. J. Gåsvik, *Optical metrology*, vol. C, no. July 1999. 2003.
- [74] K. J. Gasvik, “Moire Technique by Means of Digital Image Processing,” *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 23, pp. 3543–3548, 1983.
- [75] Y. Fu, Y. Wang, W. Wang, and J. Wu, “Least-squares calibration method for fringe projection profilometry with some practical considerations,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 124, no. 19, pp. 4041–4045, 2013.
- [76] L. C. Chen and C. C. Liao, “Calibration of 3D surface profilometry using digital fringe projection,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 8, pp. 1554–1566, 2005.
- [77] O. Sasaki and H. Okazaki, “Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement,” *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 18, pp. 3137–3140, 1986.
- [78] P. Hariharan, “Digital phase-stepping interferometry - effects of multiply reflected beams,” *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 13, pp. 2506–2507, 1987.

- [79] P. S. Huang and S. Zhang, "Fast three-step phase-shifting algorithm," *Appl. Opt.*, vol. 45, no. 21, p. 5086, Jul. 2006.
- [80] A. Albarelli, E. Rodol??, S. R. Bul??, and A. Torsello, "Fast 3D surface reconstruction by unambiguous compound phase coding," *2009 IEEE 12th Int. Conf. Comput. Vis. Work. ICCV Work. 2009*, pp. 1670–1677, 2009.
- [81] Y. J. Xu, C. Chen, S. J. Huang, and Z. H. Zhang, "Simultaneously measuring 3D shape and colour texture of moving objects using IR and colour fringe projection techniques," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 61, pp. 1–7, 2014.
- [82] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 72, no. 1, p. 156, 1982.
- [83] G. Frankowski, M. Chen, and T. Huth, "Real-time 3D shape measurement with digital stripe projection by Texas Instruments Micro Mirror Devices DMD," 2000, vol. 3958, no. 2000, pp. 90–105.
- [84] F. Yang, Z. Wang, Y. Wen, and W. Qu, "Two-dimensional phase unwrapping algorithms for fringe pattern analysis: a comparison study," 2015, p. 93023F.
- [85] P. Rastogi and H. Erwin, *Phase Estimation in Optical Interferometry*, 1st ed. 2014.
- [86] A. Mart??nez, J. A. Rayas, H. J. Puga, and K. Genovese, "Iterative estimation of the topography measurement by fringe-projection method with divergent illumination by considering the pitch variation along the x and z directions," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 9, pp. 877–881, 2010.
- [87] I. A. de J. F. García, "Escaneo 3D en un campo de visión de 360° utilizando la técnica de proyección de franjas y un arreglo de espejos Tesis presentada por:," 2013.
- [88] "TECNOLOGIA EDUCATIVA I - Miembros." [Online]. Available: <https://tecnologiaeducativaunahvs.wikispaces.com/wiki/members>. [Accessed: 18-Dec-2016].
- [89] "Solución de creación de perfiles de color i1Publish de X-Rite." [Online]. Available: <http://www.xrite.com/categories/calibration-profiling/i1publish>. [Accessed: 18-Dec-2016].
- [90] X-Rite, "A Guide to Understanding Color Communication," *A Guid. to Underst. Color Commun.*, pp. 1–26, 2007.
- [91] J. Luck, C. Little, and W. Hoff, "Registration of range data using a hybrid simulated annealing and iterative closest point algorithm," in *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, vol. 4, pp. 3739–3744.
- [92] J. Minguez, L. Montesán, and F. Lamiroux, "Metric-based iterative closest point scan matching for sensor displacement estimation," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 22, no. 5, pp. 1047–1054, Oct. 2006.
- [93] D. Chetverikov, D. Stepanov, and P. Krsek, "Robust Euclidean alignment of 3D point

sets: the trimmed iterative closest point algorithm,” *Image Vis. Comput.*, vol. 23, no. 3, pp. 299–309, Mar. 2005.

- [94] C. V. Stewart, Chia-Ling Tsai, and B. Roysam, “The dual-bootstrap iterative closest point algorithm with application to retinal image registration,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 22, no. 11, pp. 1379–1394, Nov. 2003.
- [95] D. Chetverikov, D. Svirko, D. Stepanov, and P. Krsek, “The Trimmed Iterative Closest Point algorithm,” in *Object recognition supported by user interaction for service robots*, vol. 3, pp. 545–548.