

**OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE RANGO A PARTIR DE MÉTODOS
POLICROMÁTICOS E INTERFEROMÉTRICOS**

**DANIELA RIOS CABEZAS
YEINNY GARAVITO FLÓREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2018

**OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE RANGO A PARTIR DE MÉTODOS
POLICROMÁTICOS E INTERFEROMÉTRICOS**

**DANIELA RIOS CABEZAS
YEINNY GARAVITO FLÓREZ**

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Director

**ARTURO PLATA GÓMEZ
PhD. Ciencias para la ingeniería**

Codirector

**JULIÁN RODRÍGUEZ FERREIRA
PhD. Astrofísica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2018

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
CapituloI.	
1. INTERFEROMETRIA.....	16
1.1 Coherencia.....	16
1.1.1 Nociones de Coherencia.....	17
1.1.2 Coherencia Espacial.....	19
1.2 Interferómetro De Michelson.....	21
1.2.1 Interferencia con fuente monocromática.....	22
1.2.2 Interferencia con fuente policromática.....	23
1.3 Luminancia y Crominancia.....	24
1.4 Birrefringencia.....	27
1.5 Prisma Wollaston.....	27
1.6 Sistema de Polarización.....	29
1.7 Modelo Interferométrico.....	29
1.7.1 Microscopia DIC.....	31
1.7.2 Microscopia Mirau.....	33
1.7.3 Sistema Microscopia Mirau.....	34

Capitulo II.

2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO POR MÉTODOS POLICROMÁTICOS E INTERFEROMÉTRICOS PARA OBTENER IMÁGENES DE RANGO.....	36
2.1 Microscopio Carl Zeiss.....	37
2.2 Cámara.....	38
2.3 Iluminación.....	39
2.4 Objetivo Mirau	40
2.5 Piezoeléctrico.....	40
2.6 Sistema de control del nuevo algoritmo para la obtención de imágenes de rango.....	41

Capitulo III.

3. NUEVO ALGORITMO POLICROMÁTICO DE CALCULO DE IMÁGENES DE RANGO.....	43
3.1 Espacio cromático normalizado.....	44
3.2 Algoritmo obtención de imágenes de rango.....	46

Capitulo IV.

4. INTERFAZ GRÁFICA Y RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL	51
4.1 Software Axio Vision	52
4.2 Reconstrucción tridimensional.....	57

5. CONCLUSIONES	61
6. RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Reconstrucción topográfica de un objeto mediante grado de focalización.....	12
Figura 2 Nociones de coherencia	17
Figura 3 Coherencia espacial	19
Figura 4 Interferograma de Michelson	21
Figura 5 Variación de intensidades con fuente monocromática.....	23
Figura 6 Variaciones de intensidades con fuente policromática	24
Figura 7 Modelo de percepción del color mediante el espectro físico y color percibido	25
Figura 8 Prisma Wollaston convencional	28
Figura 9 Prisma Wollaston modificado	28
Figura 10 Sistema generador de luz polarizada	29
Figura 11 Diagrama Óptico C-DIC	32
Figura 12 Microscopia Mirau	33
Figura 13 Sistema interferométrico Mirau	34
Figura 14 Franjas de una fuente Policromática.....	35
Figura 15 Proceso predeterminado de adquisición y procesamiento de imágenes.....	36
Figura 16 Microscopio Axio Imager.Z1m de Carl Zeiss	37
Figura 17 Cámara AxioCam HRc.....	38
Figura 18 Iluminación del microscopio tipo Köhler.....	39

Figura 19 Objetivo Mirau 50X	40
Figura 20 Piezoeléctrico	40
Figura 21 Sistema general para la obtención de imágenes de rango	41
Figura 22 Comportamiento del interferograma en busca del contacto óptico	43
Figura 23 Diagrama de cromaticidad y curva de puntos normalizados cercanos al contacto óptico.....	44
Figura 24 Diagrama de flujo del nuevo algoritmo desarrollado.....	46
Figura 25 Comportamiento del interferograma con los tres canales RGB (A), Comportamiento del interferograma en un canal (B)	47
Figura 26 Intensidades focalizadas (A), Imagen de datos actual (B)	49
Figura 27 Topografía de la esfera.....	50
Figura 28. Esquema AXIO VISION.....	51
Figura 29 Visualización de la aplicación Axio Vision.....	52
Figura 30 Objeto ZiCamDevice.....	53
Figura 31 Objeto ZiFocusDevice.....	54
Figura 32 Objeto ZiObjectiveDevice	55
Figura 33 Objeto ZiStageDevice	55
Figura 34 Objeto ZiDICPrismDeviceObject.....	56
Figura 35 Reconstrucción topográfica de la esfera en ImageJ 3D. Topografía observada desde la vista lateral (A). Topografía observada desde la vista superior (B)	58
Figura 36 Validación del nuevo algoritmo con respecto a otro algoritmo.....	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la cámara AXIOCAM HR.....	39
Tabla 2. Valores normalizados de RGB.....	66

RESUMEN

TITULO: OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE RANGO A PARTIR DE MÉTODOS POLICROMÁTICOS E INTERFEROMÉTRICOS*

AUTORES: DANIELA RIOS CABEZAS**

YEINNY GARAVITO FLÓREZ**

PALABRAS CLAVE: INTERFEROMETRÍA, CROMINANCIA, LUMINANCIA, CONTACTO ÓPTICO, COHERENCIA.

DESCRIPCIÓN: Este trabajo fue orientado en el diseño de un algoritmo en el Software Matlab, que permite obtener información topográfica de muestras con resoluciones de orden nanométrico, que busca optimizar la parte óptica del tratamiento de imagen necesario para la reconstrucción tridimensional.

El presente trabajo está estructurado en cuatro capítulos. El capítulo I y II presenta temas que fueron necesarios afianzar para aplicar durante el desarrollo del proyecto; además de la exposición de técnicas y procedimientos utilizados para la obtención y tratamiento de la adquisición de imágenes de rango. El capítulo III y IV describe el planteamiento y funcionalidad del algoritmo desarrollado y la implementación de una interfaz realizada en Visual Basic Application que permite la interacción con el software del microscopio Axio Vision de Carl Zeiss. Donde, estos ejecutados en conjunto permiten obtener posiciones de intensidades máximas (datos focalizados), desviación mínima al contacto óptico y sus respectivas posiciones ya que con estos datos se logra observar el comportamiento del interferograma policromático y realizar la reconstrucción tridimensional de la muestra. Esta reconstrucción se realiza por medio del software Imagej, utilizando la imagen de textura y topografía, las cuales nos permiten obtener mas detalles en la muestra y poder caracterizar su superficie, obteniendo una imagen de rango.

*Trabajo de Grado

**Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Director: Dr. Arturo Plata Gómez, Codirector: Dr. Julián Rodríguez Ferreira.

ABSTRACT

TITLE: RANGE IMAGES FROM POLYCHROMATIC AND INTERFEROMETRIC METHODS*

AUTHORS: DANIELA RIOS CABEZAS**
YEINNY GARAVITO FLÓREZ**

KEYWORDS: INTERFEROMETRY, CHROMINANCE, LUMINANCE, OPTICAL CONTACT, COHERENCE.

DESCRIPTION: This work oriented in the design of an algorithm in Matlab that allows to obtain topographical information of samples with resolutions of order Nano, which seeks to optimize the optical part for the treatment needed for the reconstruction 3D.

This document is structured in four chapters. The chapter I and II presents issues that were necessary to secure to apply during the development of the project; In addition to the expose techniques and procedures used for the processing of images. Chapter III and IV describes the approach and functionality of the developed algorithm and the implementation of an interface in Visual Basic Application that enables interaction with the originating in the microscope Carl Zeiss Axio Vision software. These executed together where, enable to obtain positions of maximum intensities (targeted data), minimum deviation in optical contact, and their respective positions since this data helps observe the behavior of the interferogram polychromatic and perform three-dimensional reconstruction of the sample. This reconstrucción is realized by means of the software Imagej, using the image of texture and topography, which allow us to obtain more details in the sample and to be able to characterize your surface, obtaining an image of range.

* Bachelor Thesis

**Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Director: Dr. Arturo Plata Gómez, Codirector: Dr. Julián Rodríguez Ferreira.

INTRODUCCIÓN

El avanzado desarrollo tecnológico a nivel mundial en diversas áreas o campos de la ciencia se ha movido a la escala de los nanómetros, ejemplos claros son la robótica, la electrónica, procesos industriales, medicina, y en especial el tratamiento de imagen (siendo este el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes con el objetivo de mejorar la calidad de la imagen y facilitar la búsqueda de información). Es de ahí donde la topográficas y las características superficiales ayudan a cuantificar el estado de una superficie, lo que nos aporta a la identificación de materiales y al desarrollo de nuevas herramientas que consisten en métodos ópticos para realizar medidas de gran precisión basados en fenómenos como la interferometría, la focalización y la coherencia que permiten el desarrollo de nuevas investigaciones enfocadas en la obtención de imágenes para perfeccionar su resolución axial y lograr su caracterización.

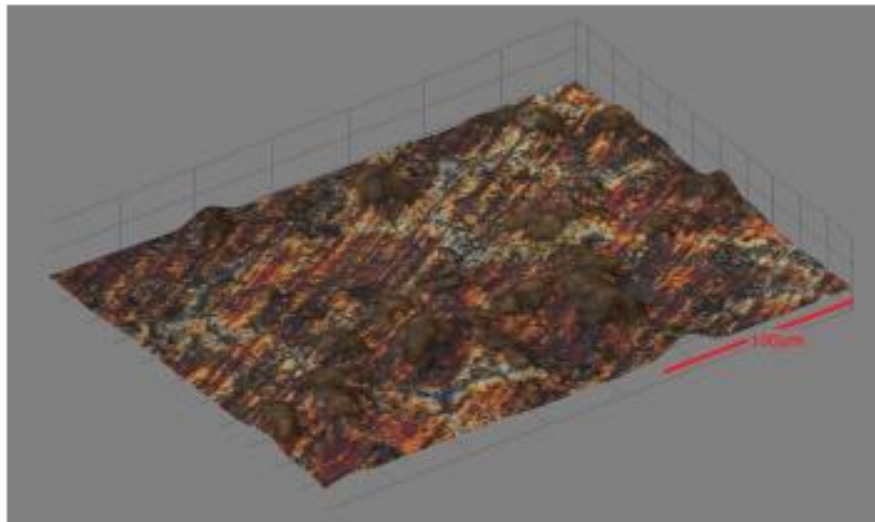
La interferometría se logra tomando un haz de luz (u otro tipo de radiación electromagnética) y dividiéndolo en dos haces iguales usando lo que se llama un divisor de haz (también llamado un espejo semi-transparente). Este divisor de haz es simplemente un pedazo de vidrio cuya superficie está recubierta con una capa muy fina generalmente de plata o aluminio. Cuando el rayo de luz incide sobre él, una parte de la luz pasa directamente, es decir, atraviesa el vidrio y la otra se refleja. Uno de los haces, que comúnmente se conoce como haz de referencia, se refleja sobre un espejo hacia una pantalla o una cámara [2]. Por medio de esta técnica y el tratamiento de imagen se puede obtener datos de la superficie de un objeto, logrando almacenar información sin afectar visiblemente la calidad de la imagen.

En la UIS se ha venido trabajando con técnicas de recuperación de topografía a escala micrométrica con la ayuda de microscopios ópticos, basándose en

[2] P. Harihara. Optical Interferometry. Academic Press, (1985)

establecer el grado de focalización de la imagen (figura 1) o en determinar variaciones de fase directamente de un patrón interferométrico generado por el objeto. Sin embargo, se sigue buscando herramientas que permitan ampliar la capacidad de cada técnica, así por ejemplo las limitaciones más comunes encontradas en algunos algoritmos debido a su falta de robustez en cuanto a la posición del foco o poca iluminación entre otras limitaciones que se pueden presentar son la calibración correcta del sistema óptico y ruido que interfiere en el momento de adquisición de las imágenes [1].

Figura 1. *Reconstrucción topográfica de un objeto mediante grado de focalización de la muestra por algoritmo de varianza.*



Fuente: CHACÓN, Carlos. Reconstrucción tridimensional por microscopia de contraste diferencial con polarización circular. Universidad Industrial de Santander. 2013. Bucaramanga.

[1] CHACÓN, Carlos. Reconstrucción tridimensional por microscopia de contraste diferencial con polarización circular. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander. 2013. Bucaramanga

Este proyecto está orientado en implementar y diseñar un algoritmo que realice la obtención de imágenes de rango por métodos de interferometría policromática. Aprovechando la información extraída, para lograr la caracterización del objeto. Esta técnica requiere de un amplio estudio y afianzamiento de conocimientos en el especial de óptica, tratamiento digital de imágenes, electrónica y programación.

Esta herramienta es de gran utilidad ya que su funcionamiento se basa en dos principios fundamentales: la microscopía clásica y el proceso de interferencia de la luz; con esto se logra el análisis de áreas microscópicas y la adquisición de topografías nanométricas. Cabe resaltar que para este estudio es principal la determinación de las longitudes de onda para poder definir los espectros visibles que son las regiones del espectro electromagnético donde el ojo humano es capaz de percibirlo; donde entra a jugar un papel importante el método policromático que significa que contiene radiación de más de una longitud de onda.

El trabajo escrito está distribuido como se describe a continuación.

- ✓ En el Capítulo I se presenta teoría de temas que son de suma importancia para afianzar los conocimientos necesarios a aplicar durante el desarrollo del proyecto.
- ✓ En el Capítulo II se expone la técnica y el procedimiento utilizado en la obtención de imágenes y su tratamiento para la adquisición de imágenes de rango.
- ✓ En el Capítulo III se describe el planteamiento y funcionalidad de un nuevo algoritmo desarrollado, para obtener imágenes de rango.
- ✓ En el Capítulo IV se muestra la implementación de una interfaz realizada en Visual Basic Application, que permite la interacción con el software Axio Vision del microscopio con el que se calibra el sistema óptico, con el fin de

prepararlo para la adquisición de las imágenes a ejecutar en el algoritmo desarrollado en el presente proyecto con el que se realiza la reconstrucción tridimensional del objeto.

OBJETIVOS

A continuación, se presenta los objetivos que se han planteado desarrollar para la realización del presente trabajo de grado.

OBJETIVO GENERAL

Obtención de imágenes de rango usando algoritmos de interferometría policromática.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Afianzar el uso de fenómenos como la interferencia, y coherencia para la caracterización tridimensional del objeto.

- ✓ Implementar el procedimiento interferométrico de barrido axial para la obtención de imágenes de mayor resolución.

- ✓ Implementar una interfaz gráfica, en el lenguaje de programación Visual Basic, que permita la reconstrucción en alta resolución, utilizando parámetros obtenidos en el análisis del procesamiento y tratamiento de imágenes.

- ✓ Validar el funcionamiento de la herramienta software mediante simulación con respecto a otro algoritmo ya desarrollo en estudios anteriores.

CAPITULO I.

1. INTERFEROMETRÍA

Se basa en el fenómeno que se produce cuando dos ondas luminosas de la misma frecuencia se superponen sobre una pantalla. Además de tener la misma frecuencia, estas ondas deben ser sincrónicas, es decir que sus diferencias de fase, y por lo tanto las distancias entre las crestas de ambas ondas, deben permanecer constantes con el tiempo. Esto es prácticamente posible sólo si la luz de ambas ondas que se interfieren a partir de la misma fuente luminosa. Si es solamente una fuente luminosa la que produce la luz, los dos haces luminosos que se interfieren deben generarse de alguna manera del mismo haz. [3-5]

Existen muchos tipos de interferómetros, pero en todos ellos hay dos haces de luz que recorren dos trayectorias ópticas distintas determinadas por un sistema de espejos y placas que finalmente se unen para formar franjas de interferencia. La interferencia de las ondas electromagnéticas, es un fenómeno que se puede observar en la vida diaria. Por ejemplo, las franjas de colores que se ven a través de las burbujas de jabón o en una mancha de aceite en un camino húmedo. Es una técnica que consiste en combinar la luz que se origina de diferentes receptores para obtener una imagen de mayor resolución aplicando superposición en amplitud y fase.

1.1 COHERENCIA

La teoría de la coherencia es el estudio de las propiedades de la radiación, en términos de correlación entre las vibraciones de diferentes puntos en el campo y en diferentes instantes. Se dice que dos puntos de una onda son coherentes cuando guardan una relación de fase constante, es decir, cuando conocido el valor instantáneo del campo eléctrico en uno de los puntos, es posible predecir el del otro punto. [5]

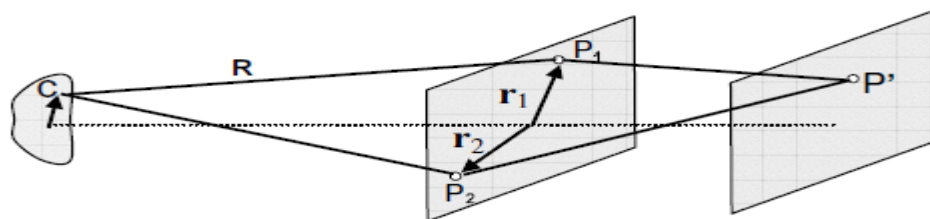
[3] PLATA, Arturo. DIAZ, Martha. Caracterización de sistemas de desplazamientos nanométricas con microscopia interferométrico. 2008. Tesis de doctorado. Bucaramanga. [5] SUAREZ, Miguel. Implementación y aplicación de un perfilómetro óptico basado en microscopia interferencial. Tesis de pregrado. Universidad industrial de Santander. 2000. Bucaramanga

La coherencia de dos haces expresa hasta qué punto están correlacionadas sus fases. Si la relación de fase cambia de forma rápida y aleatoria, los haces son incoherentes. Si dos trenes de ondas son coherentes y el máximo de una onda coincide con el máximo de otra, ambas ondas se combinan produciendo en ese punto una intensidad mayor, esto se denomina interferencia constructiva. Si son coherentes y el máximo de una onda coincide con el mínimo de la otra, ambas ondas se anularán entre sí parcial o totalmente, con lo que la intensidad disminuirá, esto es conocido como interferencia destructiva. Cuando las ondas son coherentes, puede formarse un diagrama de interferencia formado por franjas oscuras y claras.

1.1.1 NOCIONES DE COHERENCIA

La interferencia es la más vieja y simple demostración de correlación, podemos ilustrar la base de la teoría de coherencia por medio de un interferómetro de dos rayos, como el representado en la figura 2, el cual es iluminado con una fuente extendida. Por el principio de Huygens, P_1 y P_2 se comportan como fuentes secundarias. Si observamos en un punto P' , Veremos la interferencia de los campos provenientes de cada una de las fuentes secundarias P_1 y P_2 .

Figura 2. Nociones de coherencia



Fuente: SUAREZ, Miguel. *Implementación y aplicación de un perfilómetro óptico basado en microscopia interferencial. Universidad industrial de Santander. 2000. Bucaramanga.*

La amplitud del campo P' es la superposición en amplitud de las contribuciones de todos los puntos de la fuente coherente.

$$A(P', t) = a_1 A_1(\vec{r}_1, t) + a_2 A_2(\vec{r}_2, t - \tau) \quad (1)$$

Donde $a_1 A_1(\vec{r}_1, t)$ es la amplitud del campo proveniente de P_1 y τ el retardo temporal en llegar a P' por un camino con respecto al otro. Pero a la cantidad a la cual se tiene acceso al registrar con la cámara CCD (tiempo de integración de cada sensor). Es la intensidad, la cual en el punto P' viene dada por el promedio temporal:

$$I(P') = \langle |A(P')|^2 \rangle = \langle a_1 a_1^* A_1(\vec{r}_1, t) A_1^*(\vec{r}_1, t) \rangle + \langle a_2 a_2^* A_2(\vec{r}_2, t - \tau) A_2^*(\vec{r}_2, t - \tau) \rangle + 2 \langle a_2 a_1^* A_2(\vec{r}_2, t - \tau) A_1^*(\vec{r}_1, t) \rangle \quad (1,1)$$

Esta ecuación muestra que la intensidad en P' es la suma de las intensidades de los campos provenientes de P_1 y P_2 más un término dependiente de la correlación entre amplitudes de P_1 y P_2 , El cual lo podemos definir como *la función de coherencia*.

$$\Gamma(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau) = \langle A_2(\vec{r}_2, t - \tau) A_1^*(\vec{r}_1, t) \rangle \quad (1,2)$$

Normalizando la función de coherencia podemos definir el *grado de coherencia*.

$$\gamma(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau) = \frac{\Gamma(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau)}{\sqrt{I_1(P')I_2(P')}} \quad (1,3)$$

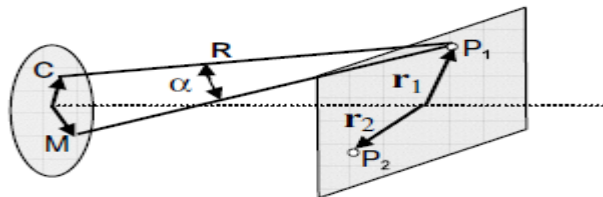
A partir de la ecuación (1,3), la intensidad puede ser escrita

$$I(P') = I_1(P') + I_2(P') + 2[I_1(P')I_2(P')]^{\frac{1}{2}}\text{Re}\{\gamma(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau)\} \quad (1,4)$$

La intensidad en P' depende de cómo este correlacionado espacialmente los puntos P_1 y P_2 (coherencia espacial), y la correlación temporal entre los diferentes paquetes de onda que llegan a interferir en el punto P' (coherencia temporal).

1.1.2 COHERENCIA ESPACIAL

Figura 3. Coherencia espacial



Fuente: SUAREZ, Miguel. Implementación y aplicación de un perfilómetro óptico basado en microscopia interferencial. Universidad industrial de Santander. 2000. Bucaramanga.

La coherencia espacial es el grado de correlación entre dos puntos del espacio. Si observamos la correlación entre los puntos P_1 y P_2 y fijamos el retardo temporal τ . El grado de coherencia pasa solo a depender de la diferencia de fase determinada por $\vec{r}_1 - \vec{r}_2$, tomando el valor de la unidad cuando $\vec{r}_1 = \vec{r}_2$, y este valor decrece alrededor de este punto definiendo un área de coherencia $(\Delta\vec{r})^2$. Con esta condición se define la *intensidad mutua* $j(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$. Cuando la diferencia de camino óptico es menor que la longitud de coherencia temporal, se puede considerar que la luz es coherente temporalmente y la función de coherencia mutua pasa a ser una función armónica en el tiempo.

$$\Gamma(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau) = j(r_1, r_2) \exp(j2\pi V_0 \tau) \quad (1,5)$$

Sea $A(t) = a(t)f(\alpha)e^{j2\pi V_0 t}$ la amplitud del campo en un punto C de la fuente, según la figura 3. Donde $f(\alpha)$ es la repartición espacial de amplitud sobre la fuente. La amplitud por la contribución de todos los puntos de la fuente en el punto P_1 estará dada por

$$A(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t) = \int a(t + \tau + \tau')f(\alpha)e^{j2\pi V_0(t+\tau+\tau')}d\alpha \quad (1,8)$$

Donde $\tau' = \frac{CP_1 - MP_1}{c} = \frac{\alpha R}{c}$. Considerando la condición propuesta por Saleh y Steel la función de coherencia mutua (1.5) estar dada por

$$\Gamma(\tau', \tau) = j(\tau') \exp(-2j\pi v\tau) \quad (1,9)$$

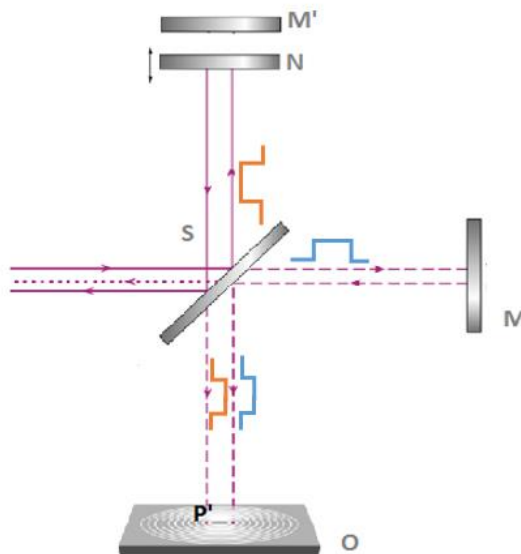
$$j(\tau') = \int_0^{\alpha_0} [g(\tau') \int_0^{\alpha} f(\alpha_1)f(\alpha - \alpha_1)d\alpha_1] e^{j2\pi V_0(\tau')}d\alpha \quad (2)$$

Donde α_0 es el máximo ángulo de observación sobre la fuente y $g(\tau') = \langle \alpha_i \alpha_j^* \rangle$. Podemos concluir que la intensidad en el plano de estudio depende de la coherencia temporal, de la distribución espacial de la fuente. [4-5]

1.2 INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

La interferencia producida por una fuente policromática se puede tomar como la superposición en intensidad de los interferogramas producidos por cada componente espectral de la fuente. Ya que la fuente es totalmente incoherente.

Figura 4. Interferómetro de Michelson. M' es la imagen de M sobre el brazo de N .



La anterior figura muestra un interferómetro de Michelson y muestra el método conocido como división de intensidad.

La intensidad en el plano de observación está dado por la ecuación;

[4] SUAREZ, Miguel. Clasificación de superficies basadas en propiedades de la compresión de imágenes. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander. 2001. Bucaramanga. [5] SUAREZ, Miguel. Implementación y aplicación de un perfilómetro óptico basado en microscopia interferencial. Tesis de pregrado. Universidad industrial de Santander. 2000. Bucaramanga

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\phi) \quad (2,1)$$

Donde $\Delta\phi$ es la diferencia de fase entre las dos ondas para cada punto. Si los índices de refracción de los dos caminos difieren entonces la diferencia de fase en un interferómetro de Michelson es la siguiente.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi[n_1(\overline{SM}) - n_1(\overline{SN})]}{\lambda} \quad (2,1a)$$

Donde n_1 es el índice de refracción del medio.

De la ecuación (2,1a) tenemos que la diferencia de fase para encontrar dos máximos depende de la longitud de onda, por lo tanto, a medida que se incrementa la diferencia de camino óptico resulta una secuencia de interferencia de colores, cada vez menos saturada, y la intensidad puede ser definida por la ecuación (2,2).

$$I(P') = I_1(P') + I_2(P') + 2[I_1(P')I_2(P')]^{1/2} g(\tau) \cos(\Delta\phi(x, y)) \quad (2,2)$$

Las franjas de interferencia están moduladas por la función $g(\tau)$ es la transformada de Fourier de la densidad espectral de energía de la fuente ($g(\tau) = TF [|f(v)|^2]$), la cual actúa como envolvente que modula las franjas y $\Delta\phi(x, y)$ es la diferencia de fase entre las dos ondas para cada punto. [4] Está relacionada con la densidad espectral de energía por medio de la transformada de Fourier. Podemos concluir entonces, que esta envolvente es más estrecha a medida que aumenta el ancho de banda de las frecuencias de la fuente y viceversa.

1.2.1 INTERFERENCIA CON FUENTE MONOCROMÁTICA

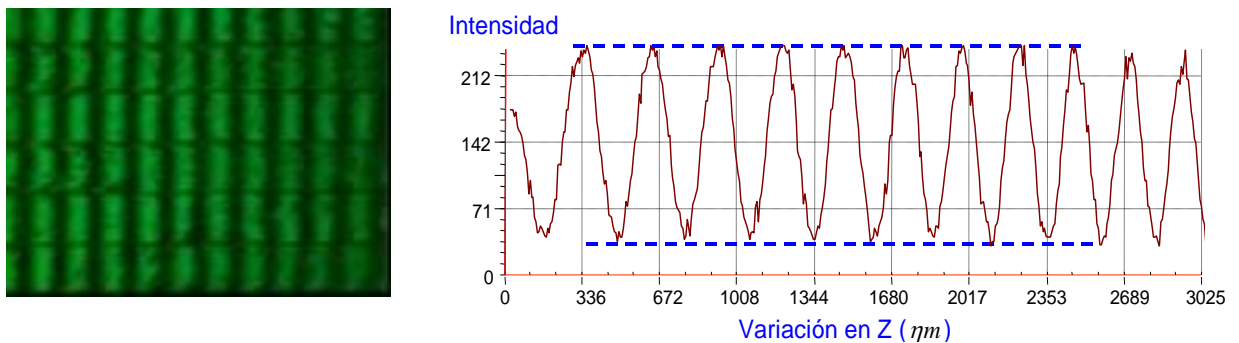
Una forma de obtener un frente de onda provenientes de la misma fuente, consiste en usar una lámina separatriz donde parte de la luz incidente se refleje y

[4] SUAREZ, Miguel. Clasificación de superficies basadas en propiedades de la compresión de imágenes. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander. 2001. Bucaramanga

otra parte sea transmitida; obteniendo dos rayos de iguales características para llevarlos por dos caminos distintos para luego hacerlos coincidir.

La distribución de intensidades de los rayos está dada por la ecuación (1,4), para una fuente monocromática la envolvente de las franjas tiende a mantener un valor constante entre órdenes cercanos.

Figura 5. Variaciones de intensidades con fuente monocromática.

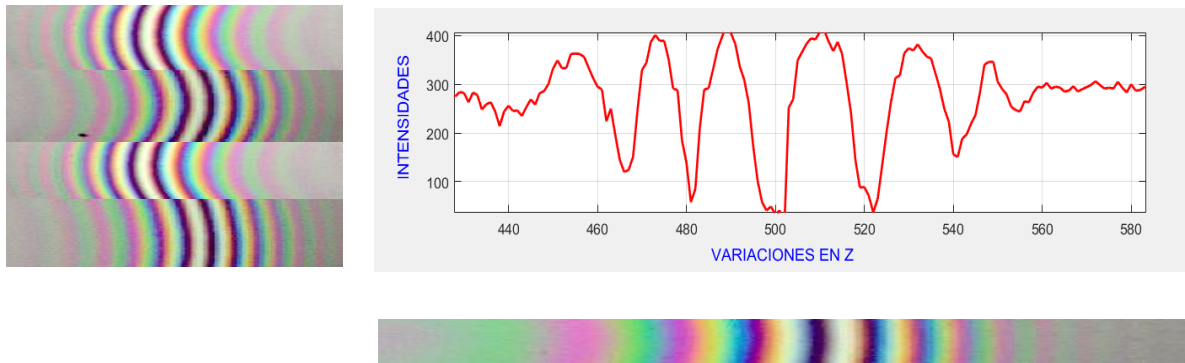


Fuente: SUAREZ, Miguel. Clasificación de superficies basadas en propiedades de la compresión de imágenes Universidad Industrial de Santander. 2001. Bucaramanga

1.2.2 INTERFERENCIA CON FUENTE POLICROMÁTICA

El color asociado al interferograma que se produce cuando se trabaja con frentes planos de luz policromática, se determina a partir de la suma de las intensidades resultantes con cada una de las longitudes de onda que componen el frente, luego de que cada una de estas intensidades ha sido modulada de acuerdo a la diferencia de camino óptico.

Figura 6. Variación de intensidades con fuente policromática.



En este interferograma de la figura 6 tenemos franjas de diferente intensidad, donde varían los colores de un lado respecto al otro; la razón es porque en un solo punto los tres colores coinciden y es ahí donde se encuentra el máximo de intensidad. Si se logra encontrar el máximo, se tendrá el camino que recorrió la luz. La importancia del interferograma es que a partir de este se obtiene reconstrucción tridimensional.

1.3 LUMINANCIA Y CROMINANCIA

Al captar una imagen en color, la cámara obtiene sus tres colores básicos: rojo, verde y azul (RGB) y mediante la combinación de estos tres elementos forma las señales que se denomina como luminancia. La luminancia está relacionada con la mayor o menos luminosidad de la imagen y no contiene ninguna información acerca de colores de la misma [6]. También se conoce como la cantidad lineal de luz, directamente proporcional a la intensidad física y ponderada por la sensibilidad al espectro de la percepción humana. La luminancia de una imagen se obtiene con la suma ponderada de los tres colores RGB. [9]

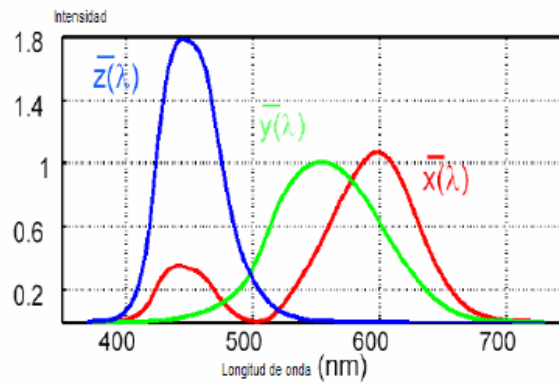
[6] ARISTIZÁBAL, Diego Luis. MARTÍNEZ, Carlos Alberto. Concepto básico del procesamiento digital de imágenes usando OrquideaJAI (calculadora digital de imágenes). Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia. 2006. Medellín. [9] Color Television System. [En línea]. Consultado 11 de Julio de 2014. [Revisado 7 febrero 2018]. Disponible en Internet: <http://www.freepatentsonline.com/2492926.pdf>.

El cálculo de la luminancia se hace a partir de los tres componentes espectrales de luz es la siguiente:

$$Y = 0.125R + 0.7514G + 0.0721B \quad (2,3)$$

Según la CIE (comisión internacional sobre iluminación) considera a la luminancia como la forma objetiva de medir la cantidad relacionada con el brillo.[7]

Figura 7. Modelo de percepción del color mediante el espectro físico y color percibido.



Fuente: AGUILERA, Ernesto. Extracción de información topográfica a partir de franjas de igual color en interferograma de luz blanca. Universidad industrial de Santander. 2005. Bucaramanga.

Como ya se mencionó; un color diferente a rojo, verde o azul resulta por la mezcla de estos colores primarios y si esta mezcla se da por dos colores espectrales que son los que se forman en la frontera del diagrama de cromaticidad; cualquier otro

[7] AGUILERA, Ernesto. Extracción de información topográfica a partir de franjas de igual color en interferograma de luz blanca. Tesis de maestría. Universidad industrial de Santander. 2005. Bucaramanga.

color perceptualmente visible se encuentra dentro de los límites del diagrama y los no visibles quedan por fuera de la frontera. Las especificaciones de las coordenadas espectrales de un color (lugar ocupado en el CIE) proviene de un estímulo puede ser calculado a partir de las curvas de distribución y la composición espectral del estímulo.

Para lo dicho anteriormente es necesario la normalización del espacio de colores XYZ al plano donde:

$$X + Y + Z = 1 \quad (2,4)$$

Donde cada variable equivale a un valor de RGB como se muestra a continuación:

$$X = \frac{R}{R + G + B} \quad (2,5)$$

$$Y = \frac{G}{R + G + B} \quad (2,6)$$

$$Z = \frac{B}{R + G + B} \quad (2,7)$$

Debido a que la forma tridimensional del color no es fácil de percibir al momento de trabajar con los colores en un proceso de segmentación de color; el diagrama de cromaticidad es la mejor opción para esta representación.

1.4 BIRREFRINGENCIA

Las diferentes técnicas que se utilizan en la microscopia ya sea la de contraste de fase, y la DIC (microscopia de contraste diferencial) tienen como principio básico el uso de un prisma hecho de un material birrefringente, donde de ahí radica la importancia de establecer ciertos comportamientos de la luz que incide sobre un material de este tipo.

Para ciertos cristales, el medio de propagación tiene diferentes propiedades que se clasifican en isotrópicas y anisotrópicas. Las isotrópicas son aquellas donde el índice de refracción no depende de la dirección de propagación de la luz en el medio, esto quiere decir que la luz que se propaga a través de ellos lo hace a igual velocidad en todas las direcciones, mientras que en donde se varían las direcciones son las denominadas anisotrópicas.

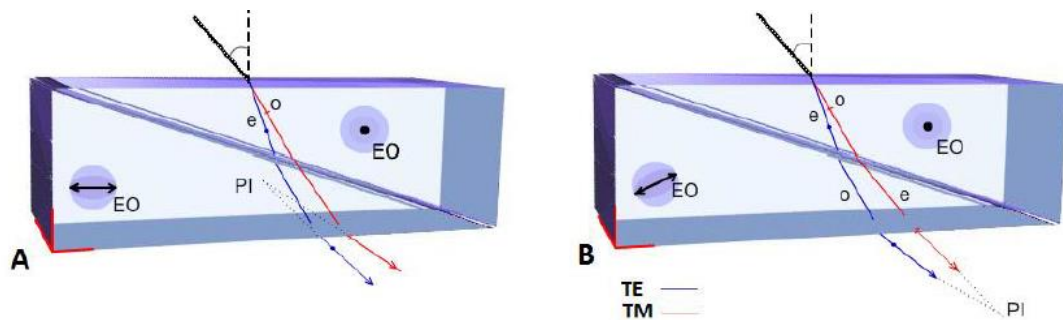
En general se puede denominar birrefringencia a aquel desdoblamiento de un rayo o doble refracción esto es una propiedad óptica de ciertos cuerpos, que consiste en desdoblar un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí como si el material tuviera dos índices de refracción distintos: la primera de las dos direcciones sigue las leyes normales de la refracción y se llama rayo ordinario; mientras que la otra tiene velocidad y un índice de refracción variable y se llama rayo extraordinario, estas dos ondas están polarizadas perpendicularmente entre sí.

1.5 PRISMA WOLLASTON

Un prisma Wollaston es construido de dos cristales birrefringentes uniaxiales de cuarzo cortados en ángulos y unidos formando una placa plana paralela. Cuando

sus ejes ópticos forman un ángulo recto entre sí y además son paralelos a las caras de entrada y salida del cristal, el prisma recibe el nombre de prisma Wollaston convencional (Figura 8). Cuando se cambia la orientación de alguno de los ejes del cristal dejando de ser paralelo a las caras de entrada y salida, este recibe el nombre de prisma Wollaston modificado (Figura 9), este último es presentado ya que la microscopía DIC funciona con un prisma de este tipo. [1]

Figura 8. Prisma wollaston convencional (A). **Figura 9.** Prisma wollaston modificado (B).



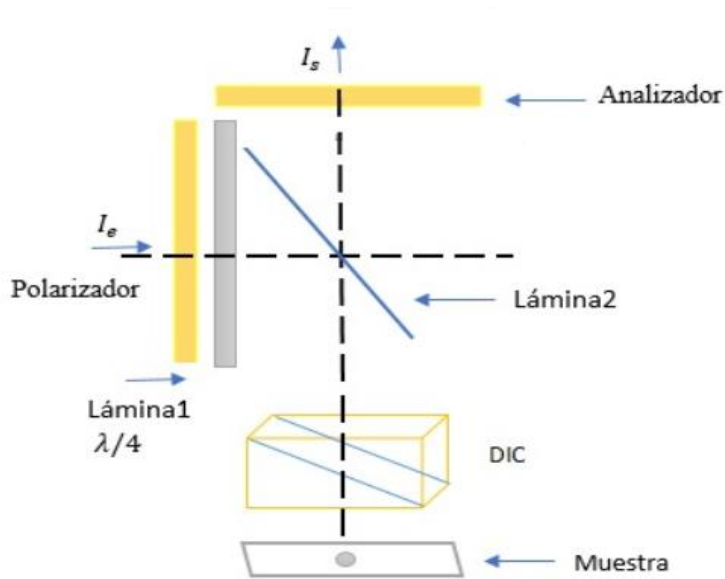
La importancia de este prisma Wollaston es el efecto que este causa ya que consiste en separar la iluminación incidente en dos ondas propagándose en diferentes direcciones con una separación angular muy pequeña conocida como desplazamiento angular de Wollaston (shear), la cual depende del ángulo formado por los prismas y del índice de refracción ordinario y extraordinario de los mismos; la principal diferencia entre el prisma convencional y el modificado está en que a la salida de un PWC los frentes de onda ordinaria y extraordinario divergen y por lo tanto se intersecan sus proyecciones en un plano dentro del prisma llamado plano de intersección o plano de aparente separación, mientras en el PWM los frentes de onda convergen e intersecan fuera de este, cerca de la cara de salida del prisma donde posteriormente será ubicado el foco anterior del objetivo del sistema óptico.

[1] CHACÓN, Carlos. Reconstrucción tridimensional por microscopía de contraste diferencial con polarización circular. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander. 2013. Bucaramanga

1.6 SISTEMA DE POLARIZACIÓN

El microscopio consta de un módulo reflector DIC formado por un polarizador, una lámina $\lambda/4$ para generar la luz polarizada circularmente, y finalmente un analizador a la salida del sistema óptico (Figura 10).

Figura 10. Sistema generador de luz polarizada.



El cambio del estado de polarización de la onda incidente a la salida del sistema es el producto de la interacción de la luz con la sucesión de elementos ópticos por los que se transmite incluida la muestra.

1.7 MODELO INTERFEROMÉTRICO DE LA MICROSCOPIA DIC

Las dos componentes ordinaria y extraordinaria reflejadas por la muestra son recombinadas al pasar nuevamente por el prisma Wollaston generando el fenómeno de interferencia entre componentes de la misma frecuencia, la intensidad de la imagen será modulada por la fase introducida entre las ondas

tanto por el prisma como por la interacción con la muestra. Según el modelo interferométrico la distribución de intensidad en el plano imagen estará dado por el módulo al cuadrado de la suma de las amplitudes complejas de las dos componentes que interfieren.

$$E^0(x, y) = a_1(x, y)e^{-i[\theta_1(x, y + \Delta y) + \phi]} \quad (2,8)$$

$$E^e(x, y) = a_2(x, y)e^{-i[\theta_2(x, y) - \phi]} \quad (2,9)$$

$$E(x, y) = a_1(x, y)e^{-i[\theta_1(x, y + \Delta y) + \phi]} + a_2(x, y)e^{-i[\theta_2(x, y) - \phi]} \quad (3,0)$$

$$I(x, y) = a_1 + a_2 + 2a_1a_2 \cos(\theta_2 - \theta_1 - 2\phi) \quad (3,1)$$

En esta ecuación θ_2 y θ_1 son las fases introducidas por el objeto en cada componente las cuales están separadas por un corrimiento lateral y el Δy muy pequeño, del orden de la longitud de onda, en una dirección que es posible cambiar entre un ángulo de 0 a 90° llamado ángulo azimutal y que aquí se tomará como paralela al eje Y, entonces la intensidad estará modulada por las gradientes de fase en la dirección del eje Y.

$$I(x, y) = a_1 + a_2 + 2a_1a_2 \cos\left(\Delta y \frac{\Delta\theta(x, y)}{\Delta y} - 2\phi\right) \quad (3,2)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta y} \approx \frac{d\theta}{dy} \text{ gradiente de fase}$$

Estos gradientes de fase son retardos introducidos por el objeto y por el prisma respectivamente de esta manera la imagen adquirida lleva información de los gradientes de fase generados entre dos ondas desplazadas lateralmente una distancia constante Δy . [8]

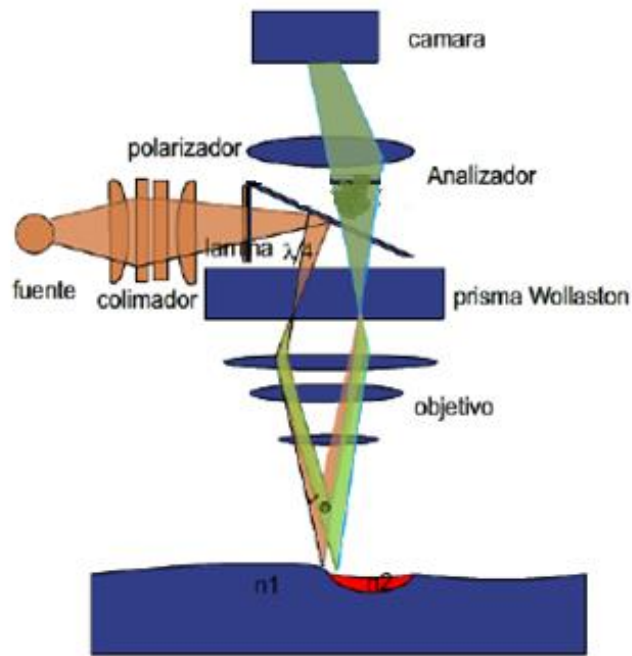
Si la fuente luminosa empleada es luz blanca las diferentes componentes frecuenciales que interfieren hacen que el objeto iluminado aparezca en color según la escala de colores de Newton. También cabe resaltar que otros factores que también intervienen en la imagen son el ruido que introduce la cámara y las distorsiones debidas a limitaciones en la resolución del sistema formador de la imagen.

1.7.1 MICROSCOPIA DIC

La microscopia de interferencia o técnica DIC conocida como contraste diferencial interferencial (Nomarski), está basada en la interferometría por polarización obtenida a partir de prismas birrefringentes que separa el haz en dos haces polarizados perpendicularmente.

Figura 11. Diagrama Óptico de C-DIC

[8] WAINSCHEKER, Rubén. TRISTAN, Paula. Procesamiento digital de imágenes. 2011



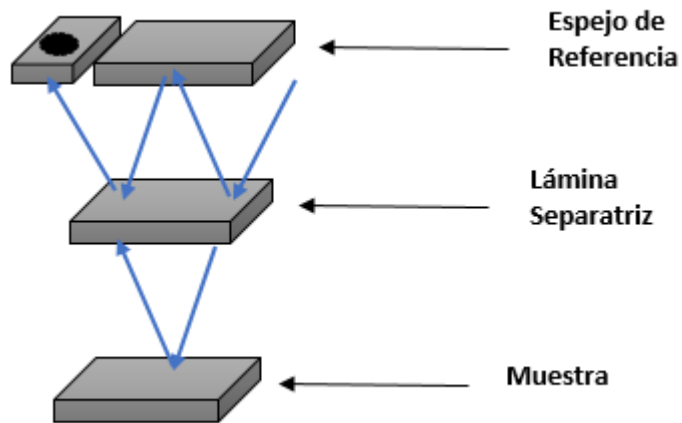
Fuente: CHACÓN, Carlos. Reconstrucción tridimensional por microscopia de contraste diferencial con polarización circular. Universidad Industrial de Santander. 2013. Bucaramanga

Fundamentalmente, la luz que se emplea en este caso es polarizada, se adicionan a los lentes objetivos cuatro componentes ópticos: Polarizador, prisma DIC, señalador DIC y un analizador (Figura 11). El prisma (birrefringente) situado sobre la parte posterior del plano focal del objetivo es usado para recombinar las dos ondas en un solo rayo.

1.7.2 MICROSCOPIA MIRAUI

Un sistema de microscopia interferencial tipo Mirau está compuesto por un microscopio de reflexión, el cual tiene un objetivo interferométrico tipo Mirau. El objetivo interferométrico Mirau está compuesto de una lámina semitransparente entre el objetivo y la muestra (lámina separatriz), y un espejo de referencia sobre el centro de su cara frontal. El funcionamiento del objetivo interferométrico es similar al de un interferómetro Michelson, con la diferencia que los dos brazos por donde la luz realiza su recorrido están en un mismo eje.

Figura 12. Microscopia Mirau

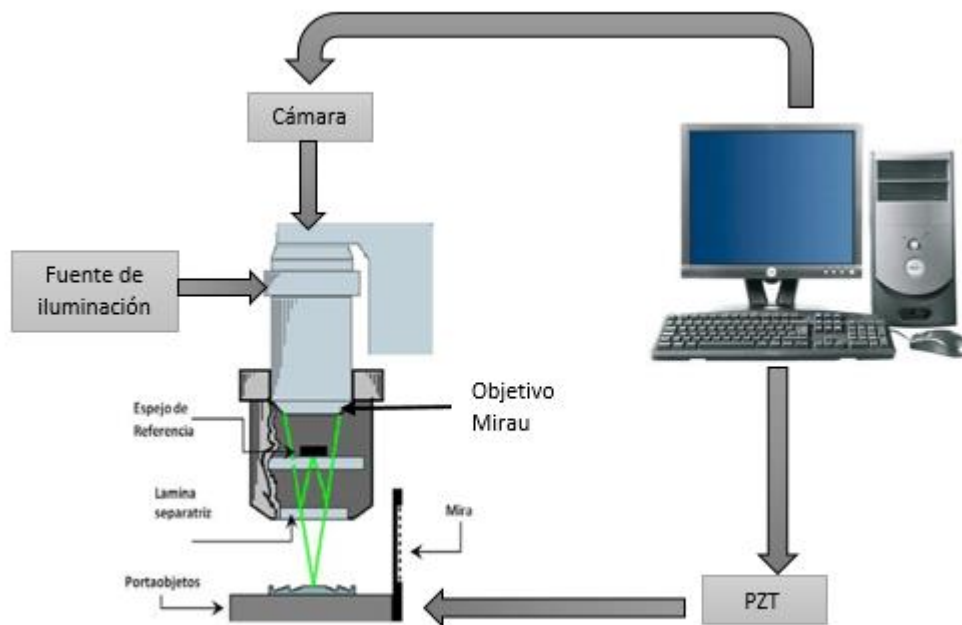


De esta manera, cuando el haz atraviesa el objetivo, la lámina separatriz divide el frente de una onda en dos: uno que se transmite hacia la muestra y el otro que es reflejado. El haz reflejado va al espejo de referencia, regresa a la lámina separatriz y se superpone con el reflejado por el objeto. Así, la correlación de los dos haces es vista por el objetivo. [3] El contacto óptico se obtiene cuando la diferencia de camino óptico entre la lámina separatriz-espejo y la lámina semitransparente-objeto, es cero.

[3] PLATA, Arturo. DIAZ, Martha. Caracterización de sistemas de desplazamientos nanométricas con microscopia interferométrico. 2008. Tesis de doctorado. Bucaramanga

1.7.3 SISTEMA INTERFEROMÉTRICO MIRAU

Figura 13. Sistema interferométrico Mirau



Al utilizar el sistema anterior con luz policromática, las reflexiones sobre la muestra, ubicada en el portaobjeto, son combinadas con las reflexiones provenientes del espejo de referencia localizado en el objetivo Mirau. El campo eléctrico $E(t)$ que llega al detector es la superposición de la luz que proviene de la muestra y el espejo de referencia.

$$E(t) = E_s(t) + E_r(t + \tau) \quad (3,3)$$

Donde E_s y E_r en la ecuación número (3,3) son respectivamente las amplitudes ópticas del haz señal y del haz de referencia, Mientras que τ es el tiempo de retraso debido a la diferencia de longitud en los caminos ópticos de los dos haces. La intensidad registrada por el detector está dada por:

$$I_d = \langle |E(t)|^2 \rangle = I_s + I_r + 2(I_s I_r)^{1/2} \text{Re}\{\gamma(\tau)\} \quad (3,4)$$

Donde $\gamma(\tau)$ es el grado complejo de coherencia mutua. [4]

Figura 14. Franjas de una fuente Policromática.



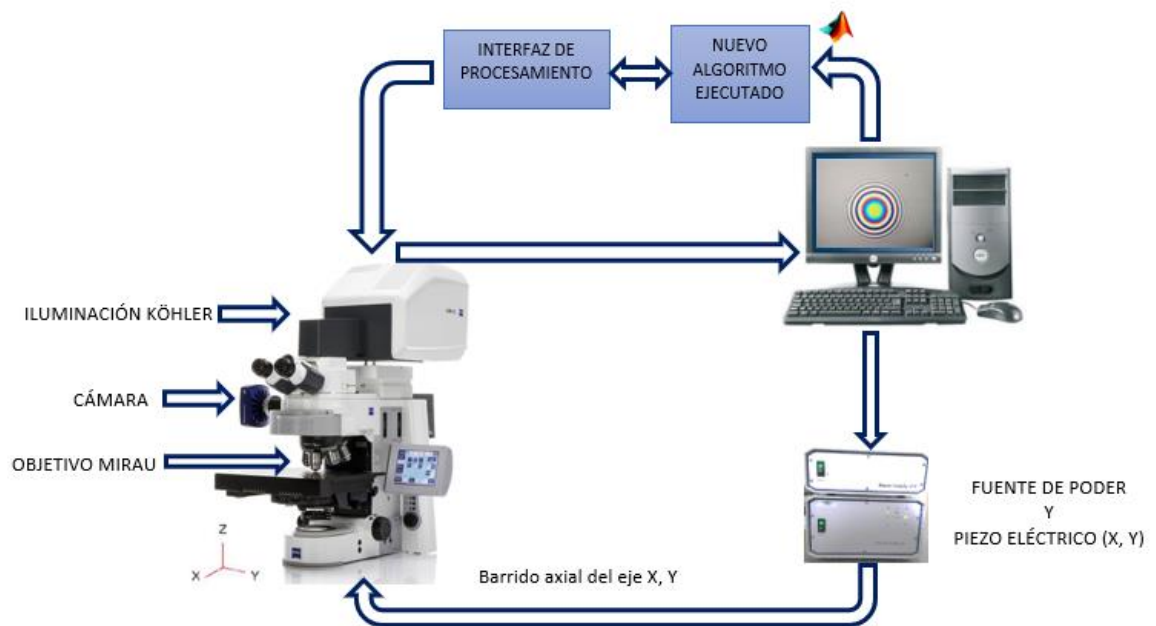
Hay que tener en cuenta que la interferencia (Figura 14) producida por una fuente policromática se puede tomar como la superposición en intensidad de los interferogramas producidos por cada componente espectral de la fuente.

[4] SUAREZ, Miguel. Clasificación de superficies basadas en propiedades de la compresión de imágenes. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander. 2001. Bucaramanga

CAPITULO II.

2. SISTEMA GENERAL PREDETERMINADO DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES POR MÉTODOS INTERFEROMÉTRICOS Y POLICROMÁTICOS PARA OBTENER IMÁGENES DE RANGO.

Figura 15. Proceso predeterminado de adquisición y procesamiento de imágenes.



En la figura anterior se muestra de forma ilustrativa los factores que intervinieron en el proceso de adquisición de imágenes de rango.

2.1 MICROSCOPIO CARL ZEISS.

Figura 16. Microscopio Axio Imager.Z1m de Carl Zeiss.



Para el desarrollo de este proyecto se utilizó un microscopio de reflexión para materiales, de la empresa Carl Zeiss, el Axio Imager.Z1m (Figura 16); el cual se destaca por tener características mecánicas importantes en la cual radica en los desplazamientos que este puede realizar para hacer un barrido sobre la muestra.

2.1.1 CÁMARA

Figura 17. Cámara AxioCam HRc



La cámara AxioCam HRc (Figura 17), capta rayos de luz durante un tiempo determinado mediante un lente y a través de un circuito electrónico digitalizan la imagen generada para su posterior tratamiento. A través del sensor CCD se genera un voltaje correspondiente a cada valor de celda de la matriz y entrega una señal analógica que posteriormente mediante un convertidor análogo-digital externo se traduce a datos, esto con el fin de procesarlos en el nuevo algoritmo desarrollado.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la cámara AXIOCAM HR

Resolución CCD	1300 x 1030 = 1.3 mega pixel
Tamaño Pixeles	6.7 μ m x 6.7 μ m
Tamaño del sensor	8.7mm x 6.9mm

2.1.2 ILUMINACIÓN

Figura 18. Iluminación del microscopio tipo Köhler.



La iluminación óptima debe ser brillante, sin resplandores y en lo posible debe dispersarse de manera uniforme en el campo de observación. Por esta razón se utiliza iluminación Köhler ya que este método de iluminación permite optimizar la

observación microscópica y la microfotografía, aprovechando al máximo las capacidades de las lentes (objetivos) iluminando la muestra en estudio con un campo de luz uniforme cuyo diámetro sea igual al del área de captura del objetivo.

2.1.3 OBJETIVO MIRAU

Figura 19. Objetivo Mirau 50X



Al microscopio Axio Imager.Z1m se le adapto un objetivo NIKON tipo Mirau de 50X, que trabaja con módulos de campo claro, que permiten mayor detalle de la muestra.

2.2 PIEZOELÉCTRICO

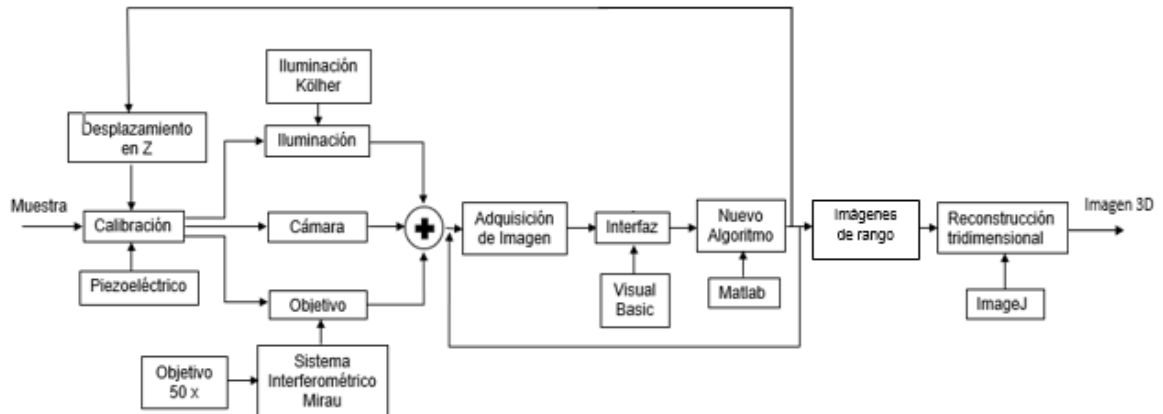
Figura 20. Piezoeléctrico.



El piezoeléctrico (Figura 20) permite realizar barridos axiales en X, Y y a lo largo del eje óptico (dirección Z). El máximo desplazamiento X, Y de la platina es de 85mm y 130mm respectivamente, con paso de 200nm y desplazamiento en Z de 120mm a paso de 10nm.

2.3 SISTEMA DE CONTROL DEL NUEVO ALGORITMO PARA LA OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE RANGO

Figura 21. Sistema general para la obtención de imágenes de rango.



En el desarrollo de este nuevo algoritmo, fue necesario la clasificación de los procesos, para así determinar los datos necesarios para la reconstrucción de la esfera. Para el análisis de la muestra fue necesario la calibración del sistema, donde se necesitó de un barrido axial sobre la muestra, para garantizar la obtención de imágenes de rango por métodos policromáticos e interferométricos.

En el primer proceso se establecen los parámetros de desplazamiento para obtener interferogramas, con datos de focalización y posición, se selecciona el objeto de 50X, que nos permite tener más detalles de la superficie de la muestra y luego se procede a obtener las imágenes.

Para la obtención de las imágenes se da inicio al proceso del algoritmo desarrollado en Matlab junto a la interfaz de Visual Basic Application, logra realizar el tratamiento de la imagen, logrando conservar tres matrices; con datos fundamentales para lograr su reconstrucción tridimensional, esto se realiza de forma dinámica, y actualizando sus valores, logrando que el nuevo algoritmo sea óptimo en rendimiento y espacio de memoria.

Para finalizar el proceso se hace uso de la textura y topografía, implementando la herramienta de reconstrucción tridimensional con el software libre Imagej, que nos permite una mejor visualización de las características de la imagen.

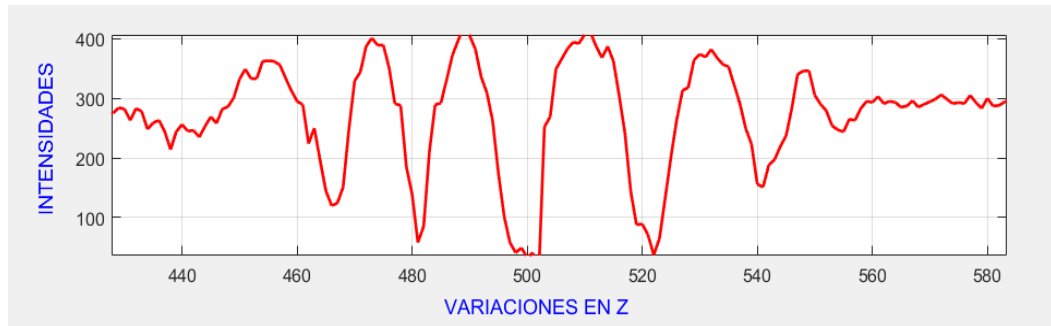
CAPITULO III.

3. NUEVO ALGORITMO POLICROMÁTICO DE CÁLCULO DE IMÁGENES DE RANGO

En este capítulo se implementan experimentalmente las técnicas mencionados anteriormente, a través del algoritmo desarrollado por medio de los métodos propuestos los cuales son policromáticos e interferométricos que llevan a la adquisición de imágenes de rango.

Una imagen a colores está compuesta de canales, el rojo, verde y azul son suficientes para generar cualquier otro color usando diferentes combinaciones. Es aquí donde se aprovecha la propiedad de un interferograma producido por fuente policromática. Las franjas se encuentran moduladas por una envolvente donde esta presenta un máximo o un mínimo como en este caso que presenta un mínimo de intensidad en puntos donde la diferencia de camino óptico es cero. El reto radica en localizar la posición del contacto óptico del interferograma para todos los puntos de la muestra, esto se realiza desplazando en dirección Z de tal manera que la franja brillante del interferograma recorra todos los datos de la muestra almacenando las posiciones del contacto óptico en una imagen de 8 bits, que corresponde a la imagen de rango.

Figura 22. Comportamiento del interferograma en busca del contacto óptico.

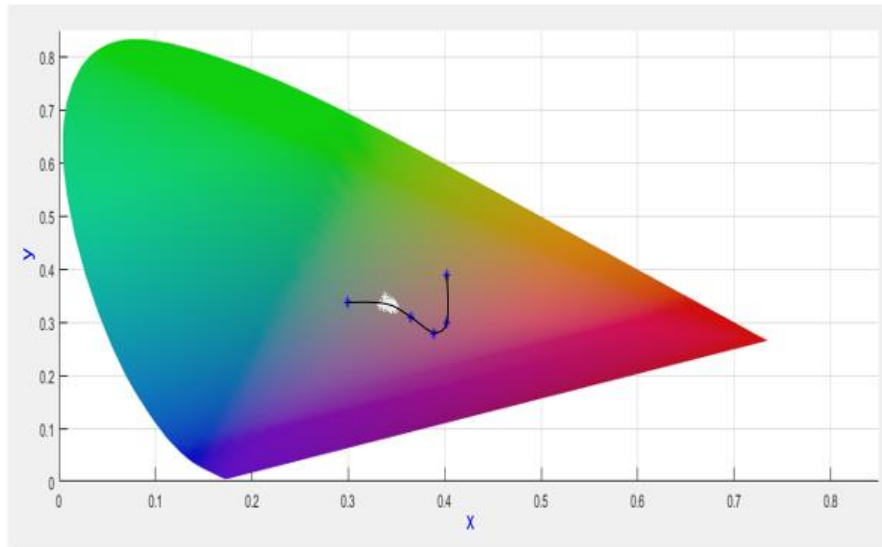


En la figura se muestra el comportamiento del interferograma, los cambios en los valores de intensidades de un canal en un mismo punto.

3.1 ESPACIO CROMÁTICO NORMALIZADO

Para la representación gráfica en el espacio cromático, se normaliza X, Y y Z a partir de los valores RGB, esto para localizar los puntos donde se halla el contacto óptico. Se realizó un barrido de todas las imágenes ubicándonos en un mismo punto obteniendo los valores de cada color, registrando así el comportamiento del camino óptico en el diagrama de cromaticidad. En la tabla 2. Se calcularon los valores normalizados para la figura 23.

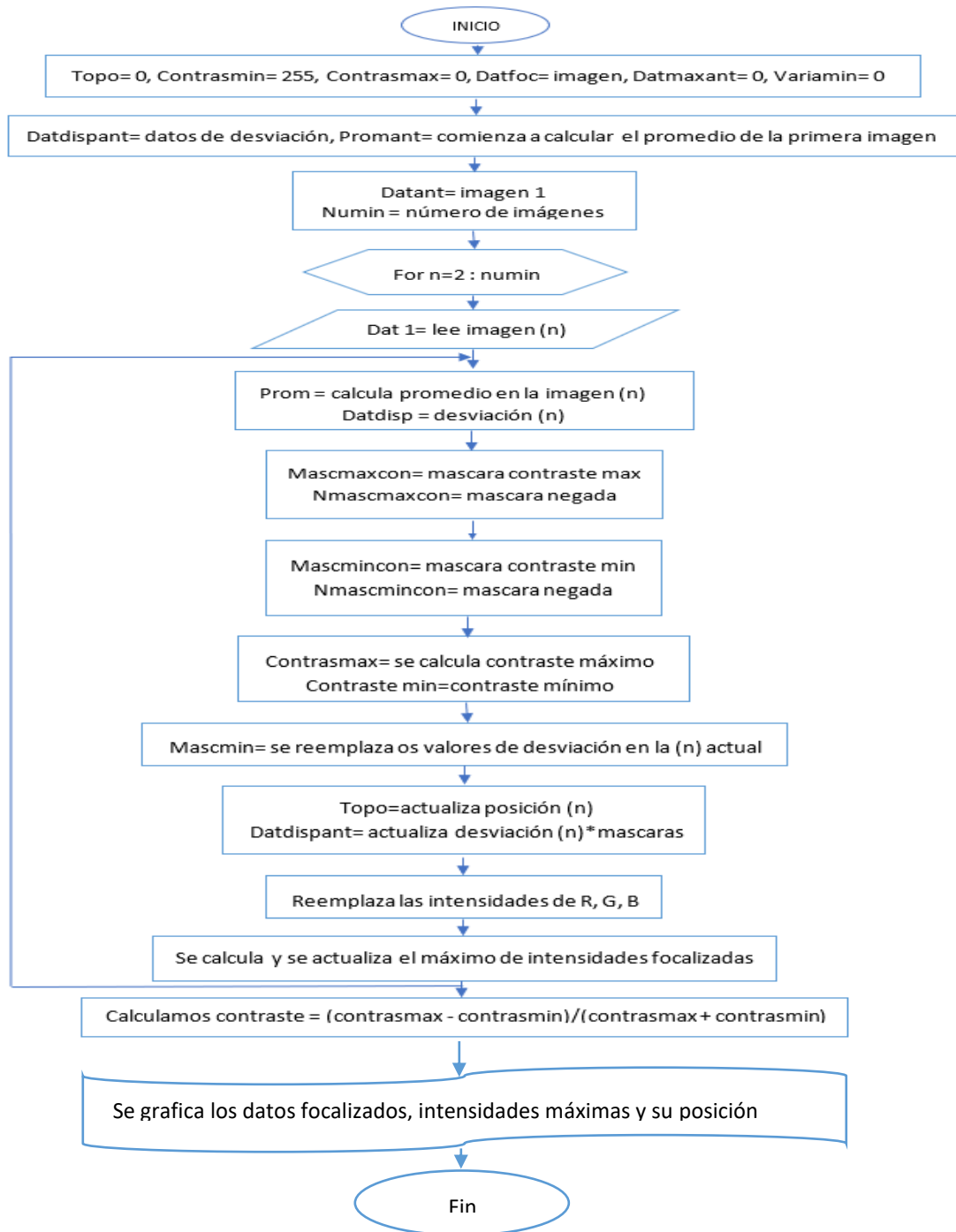
Figura 23. Diagrama de cromaticidad y curva de puntos normalizados cercanos al contacto óptico que es donde se encuentra la mínima desviación.



Se puede observar que los puntos tienden a estar en el centro del diagrama de cromaticidad donde se encuentran los blancos, lo cual es producto de que las intensidades del punto localizado tengan una desviación mínima.

3.2 ALGORITMO OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE RANGO

Figura 24. Diagrama de flujo del nuevo algoritmo desarrollado.



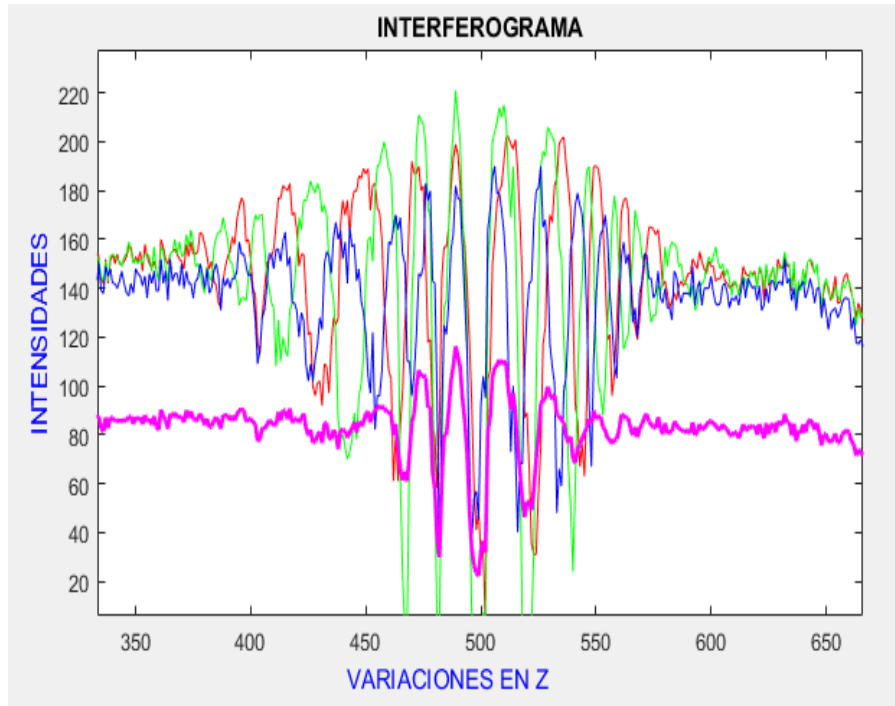
El algoritmo desarrollado consiste en la adquisición de imágenes por medio de métodos policromáticos e interferométricos, donde se hace un barrido en Z en escala nanométricas, por medio del microscopio, que permite almacenar en tres matrices la intensidad focalizada, la posición y la desviación. Las cuales actualizaremos cada vez que se realice la adquisición de una nueva imagen. En la matriz de posición se registra los valores donde está la mínima desviación con el valor promedio policromático, que nos indica que tan lejos o cerca se encuentra de un punto gris, donde $R=G=B$. En la matriz de desviación se almacenan los valores de la desviación cuadrática media con respecto a la escala de grises y en la de intensidad focalizada, se registran los valores RGB en estas posiciones.

Este algoritmo fue diseñado de forma dinámica, ya que este ahorra espacio de memoria, realizando de forma matricial (máscaras), donde se desarrollan procesos de actualización de datos, que permiten la reconstrucción topográfica de un objeto.

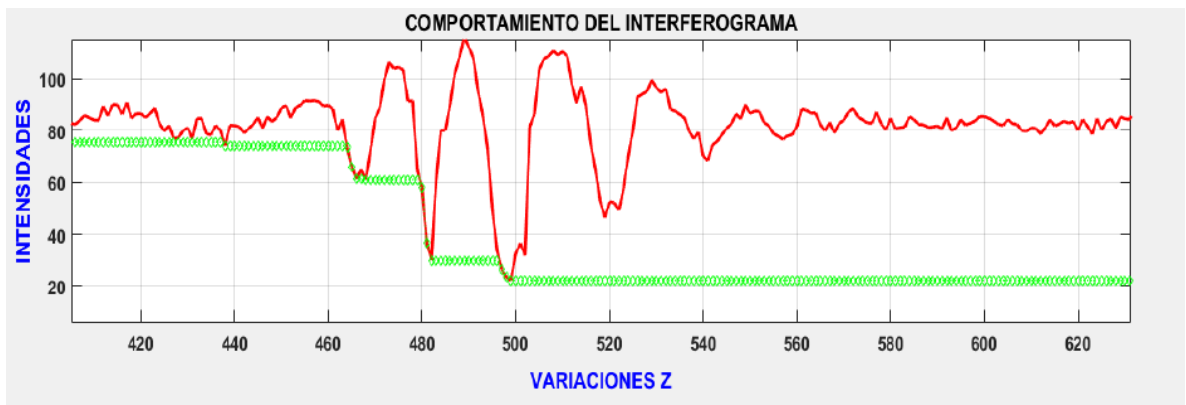
Al ejecutar el algoritmo de obtención de imágenes de rango se tiene como resultado las imágenes de topografía, focalización y comportamiento del interferograma.

Figura 25. *Comportamiento del interferograma con los tres canales RGB.(A)
Comportamiento del interferograma en un canal (B).*

(A)



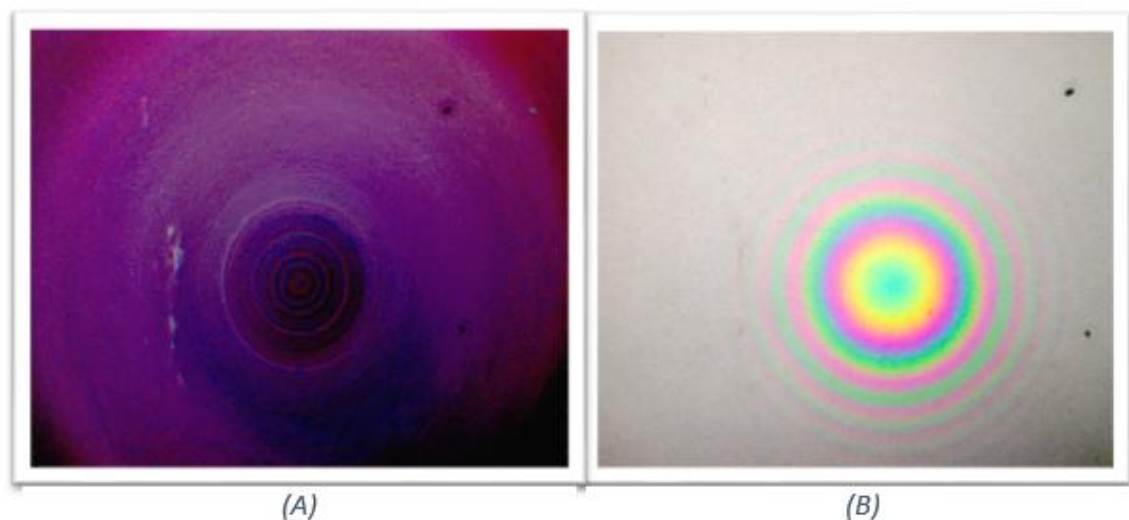
(B)



En la figura 25(A) se muestra el comportamiento del interferograma para un punto de la imagen con los tres canales RGB donde lo que se busca es hallar el contacto

óptico, aquí se puede visualizar que se encontró un mínimo esto es debido a que en el interferograma se encuentra una fase en reflexión. Según la curva de color magenta. En la figura 25 (B) se observa como en el interferograma varían las intensidades encontrando un mínimo, es ahí donde se halla el contacto óptico; a partir del punto donde la línea verde se hace constante.

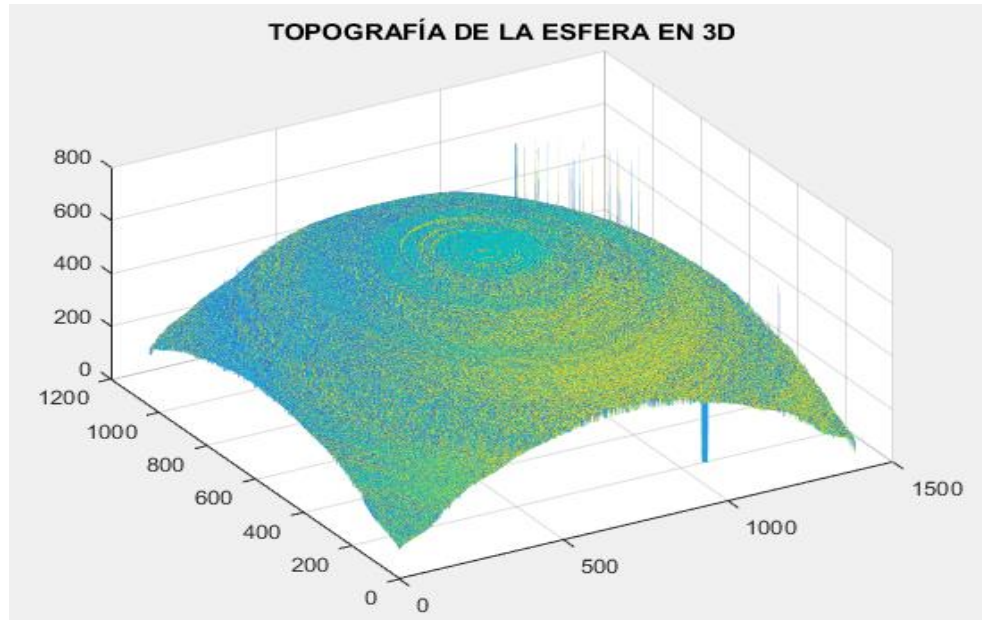
Figura 26. Intensidades focalizadas (A), Imagen de datos actual (B).



En la figura 26 se encuentra que la imagen (B) es la imagen de datos actual que se obtiene, ya que el algoritmo tiene un régimen dinámico que va actualizando dato tras dato hasta llegar a la última imagen esto para evitar almacenamiento de memoria y hacer que el proceso sea más óptimo.

La imagen (A) representa las intensidades focalizadas que resultan de los valores calculados en la desviación en el proceso.

Figura 27. Topografía de la esfera.



La topografía de la esfera se muestra en la figura 27 donde representa las posiciones donde se encuentra un mínimo de desviación, se puede observar un poco de ruido, el cual es generado por puntos en los que no se focaliza bien la muestra y al adquirir la imagen se genera pérdida de información las cuales pueden observarse gráficamente como puntos que alteran la superficie de la muestra.

CAPITULO IV.

4. INTERFAZ Y RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL

En este capítulo se mostrará cómo se implementó la interfaz que es propia del microscopio de Carl Zeiss, las herramientas con las que se interactuó y permitió la adquisición de imágenes para llevar a cabo la reconstrucción tridimensional.

Figura 28. Esquema AXIO VISION

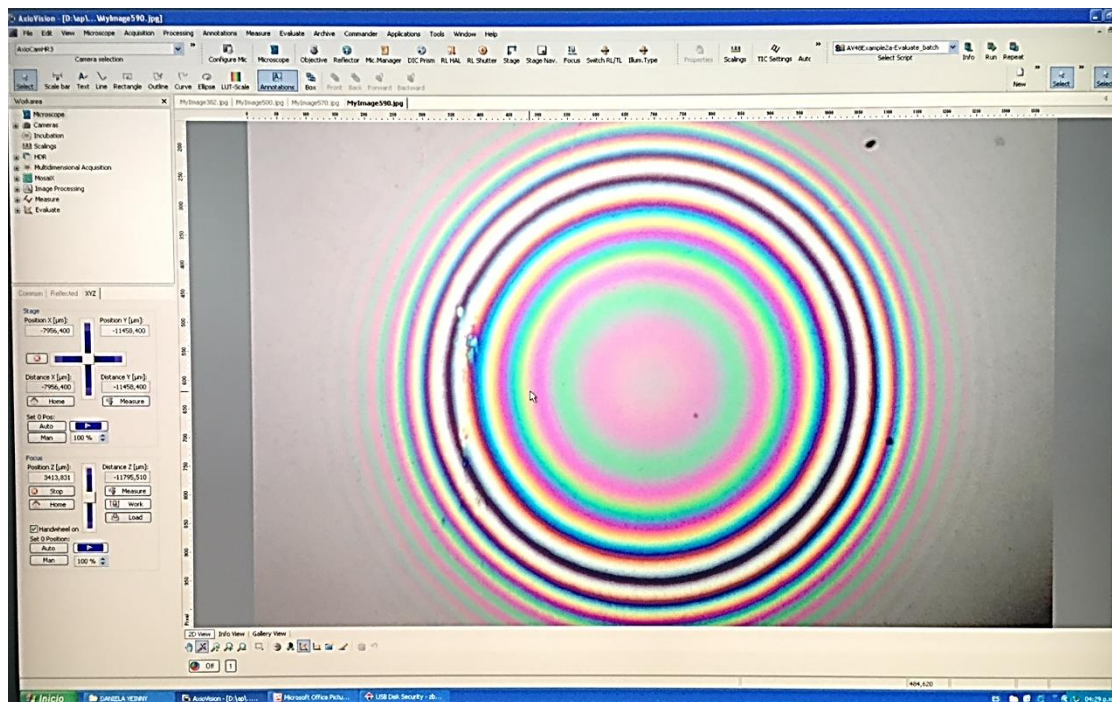


4.1 SOFTWARE AXIO VISION

Axio vision es una aplicación de Carl Zeiss en la cual se carga la herramienta Visual Basic Application que nos permite interactuar de forma dinámica con el microscopio Axio Imager.Z1m.

Visual Basic Application es la interfaz de objetos en la que podemos controlar funciones y variables que permiten ajustar los valores de resolución, barrido axial, número de imágenes que son necesarios para la toma de la muestra y caracterización del objeto.

Figura 29. Visualización de la aplicación Axio Vision.

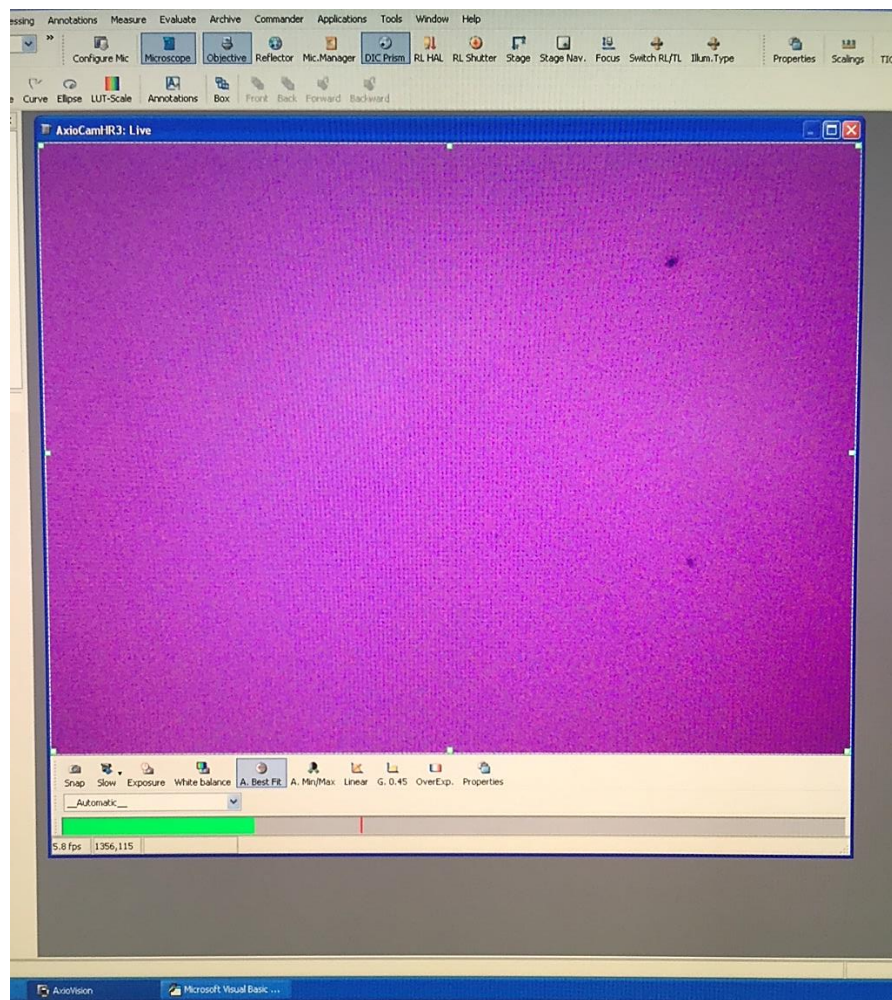


Esta aplicación nos permite trabajar con herramientas que modifican parámetros necesarios para la calibración del sistema en el momento de la adquisición de imágenes que serán procesadas por el algoritmo mencionado en el capítulo III.

Esta comunicación entre el microscopio y el usuario se realiza por medio de Objetos.

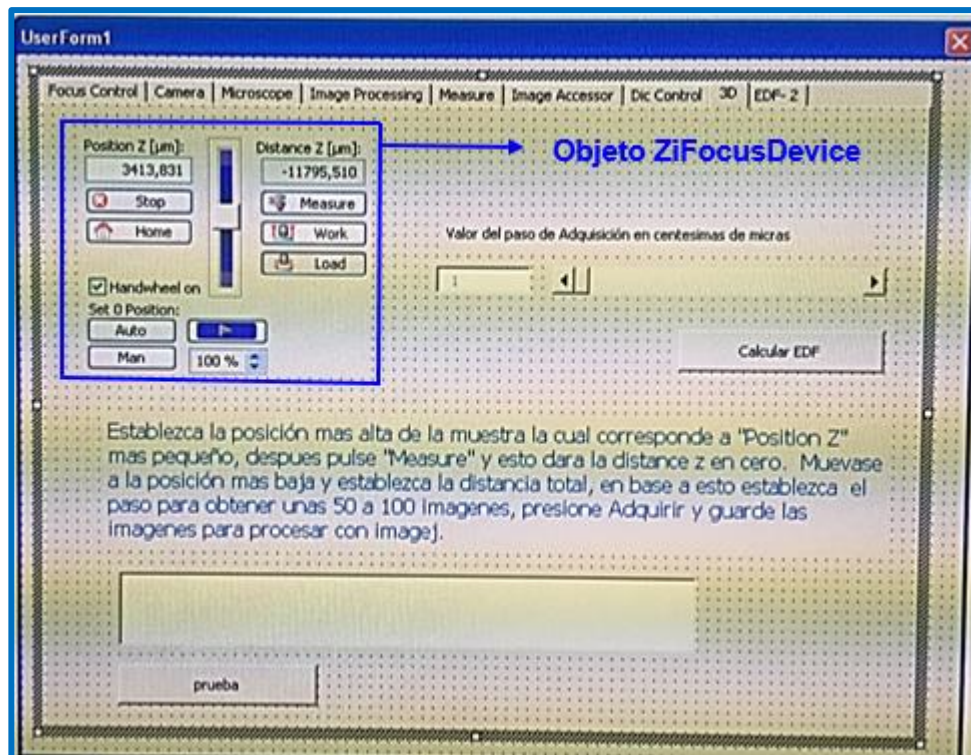
- Objeto ZiAxioCamDevice: permite el acceso a todos los parámetros importantes de la cámara, balances de blanco y negro, resolución y el valor inicial de adquisición de imágenes.

Figura 30. Objeto ZiCamDevice.



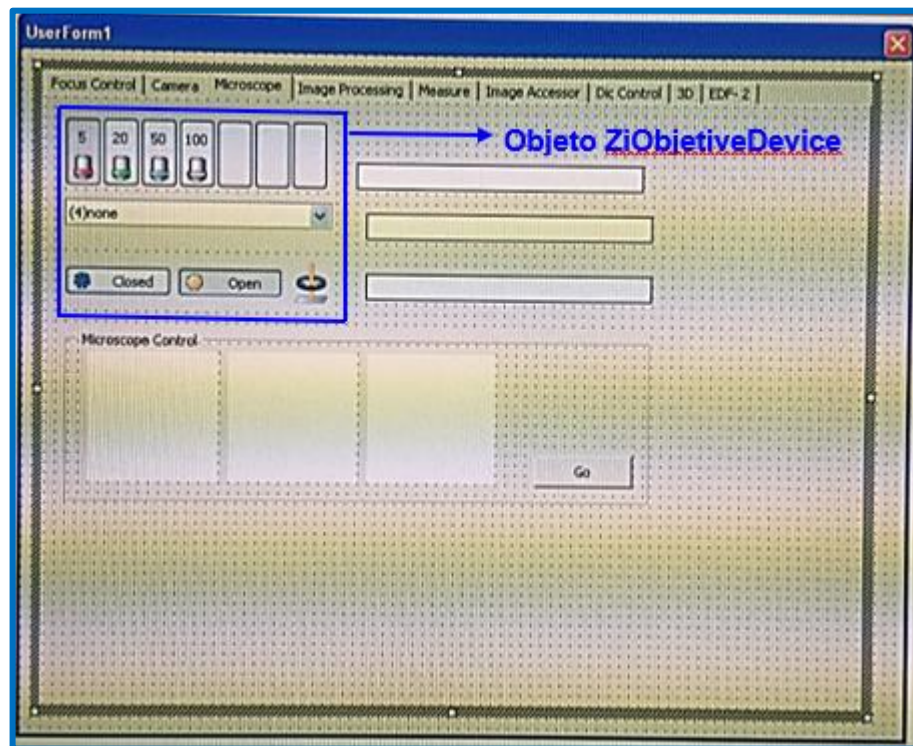
- Objeto ZiFocusDevice: permite el acceso a los parámetros de enfoque como posición y calibración. Además, permite establecer el barrido axial en Z.

Figura 31. Objeto ZiFocusDevice.



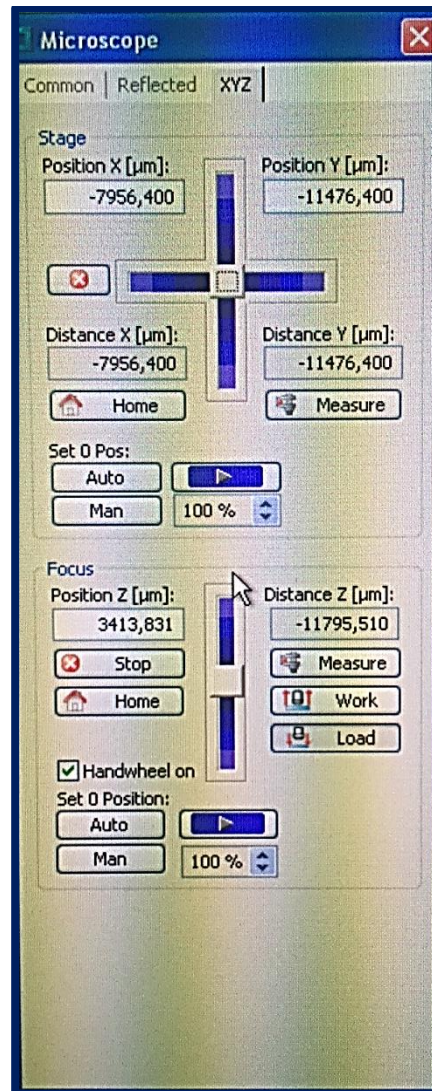
- Objeto ZiObjectiveDevice: permite elegir el objetivo según sea necesario el aumento y NA (apertura numérica) para tomar los detalles de la muestra.

Figura 32. Objeto ZiObjectiveDevice.



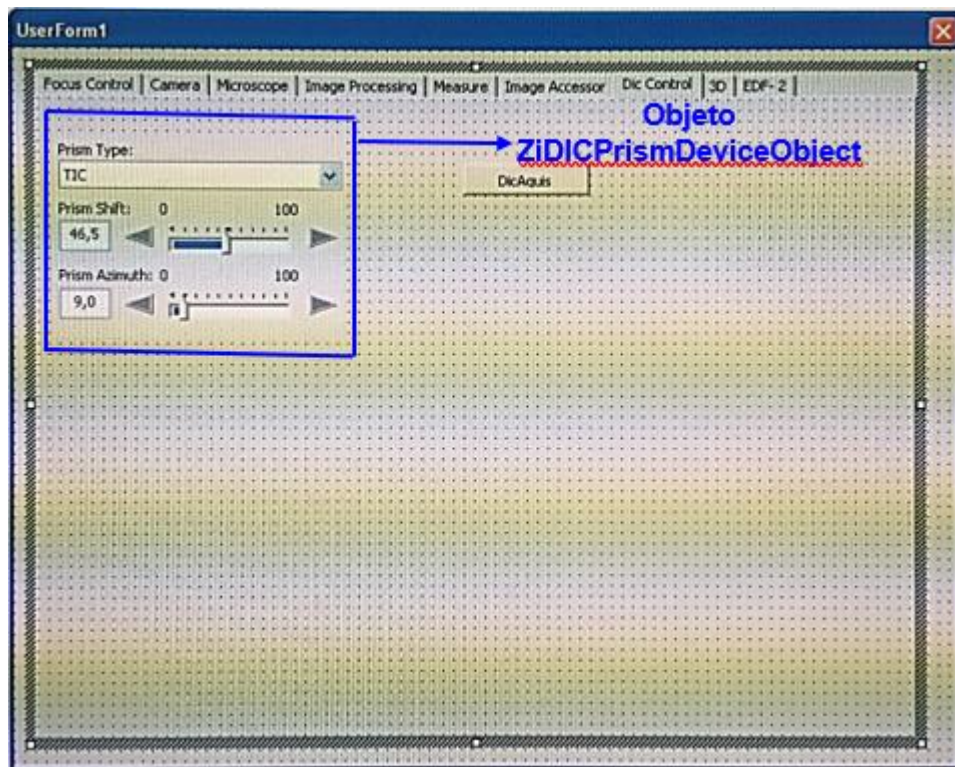
- Objeto ZiStageDevice: permite el acceso a los parámetros de la etapa como la posición en x,y y la calibración.

Figura 33. Objeto ZiStageDevice.



- Objeto ZiDICPrismDeviceObject: permite escoger el prisma para encontrar el contacto óptico.

Figura 34. Objeto ZiDICPrismDeviceObject.



4.2. RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA ESFERA

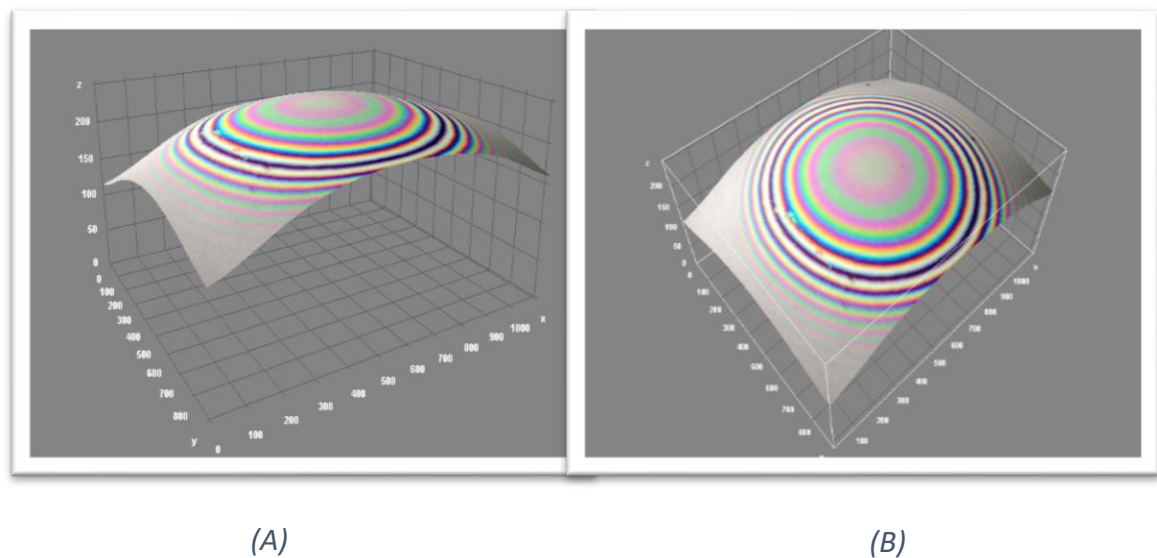
La prueba consistió en la reconstrucción de una muestra esférica recubierta con una delgada capa de oro para poder observar el comportamiento de las franjas, las cuales tiene un procesamiento con el algoritmo desarrollado hasta obtener la imagen de rango que es el objetivo de este proyecto, posteriormente a partir de esto se dispone a realizar la reconstrucción tridimensional de la esfera.

La reconstrucción del objeto consistió en adquirir 680 imágenes de una esfera con resolución de 1388x1040 pixeles las cuales fueron tomadas con un objetivo de 50X tipo Mirau. Se realizó el análisis de las imágenes en Matlab mediante el algoritmo que permite el análisis del interferograma de la esfera basado en la técnica de microscopia de reflexión para lograr los valores de desviación mínima,

la máxima intensidad y las posiciones en la que se encuentran los anteriores valores; que nos permite la reconstrucción topográfica del objeto en estudio.

Una vez que se obtienen las imágenes de rango del procesado del algoritmo en Matlab se dispone a realizar la reconstrucción tridimensional de esta para visualizar la topografía del objeto; como los datos de resultados del algoritmo son de alta resolución y son datos volumétricos es necesario la implementación de un programa que permita visualizar, procesar y analizar ésta información por esta razón se utiliza el programa ImageJ 3D ya que este utiliza Java 3D para la visualización rápida de las imágenes tridimensionales como imágenes de volumen y superficie.

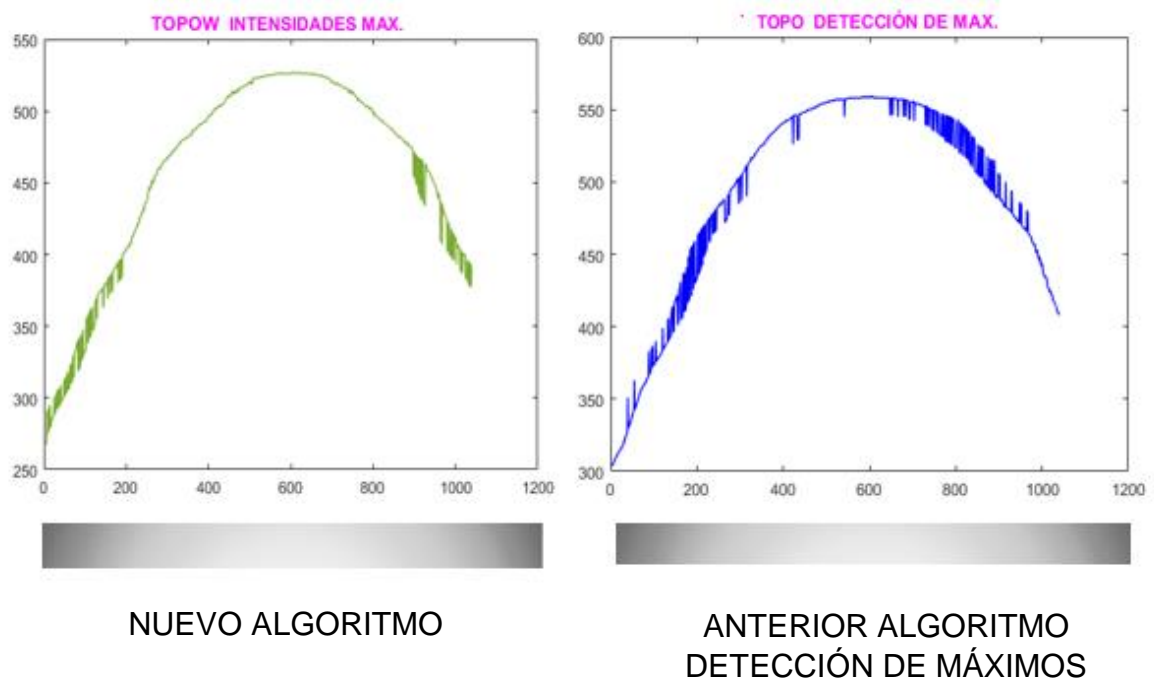
Figura 35. Reconstrucción topográfica de la esfera en ImageJ 3D. Topografía observada desde la vista lateral (A). Topografía observada desde la vista superior (B).



La figura 35 se muestra un patrón de franjas que muestran la topografía del objeto en análisis, además se puede observar como si fuera curvas de nivel donde se aprecia la forma circular de las curvas y se puede llegar a predecir que la muestra

es una esfera. En este caso ya que los datos experimentales fueron realizados con una esfera. Se utilizó la imagen de topografía obtenida con el algoritmo desarrollado por los métodos policromáticos e interferométricos la cual se usó como base para la superficie y se le agregó textura con una imagen adquirida por la interfaz de Visual Basic Application donde se logra obtener una imagen interactiva de la superficie de la esfera en 3D por medio de ImageJ.

Figura 36. Validación del nuevo algoritmo con respecto a otro algoritmo.



En la figura 36 se realiza una comparación del nuevo algoritmo de obtención de imágenes de rango por métodos policromáticos e interferométricos con respecto al método de detección de máximos, donde se puede observar la eficiencia de nuestro algoritmo al momento de detectar el contacto óptico. Se realizó experimentalmente la toma de una línea en la imagen de topografía de cada método y se observó que para el mismo punto de los interferogramas se analiza diferentes comportamientos, donde para el nuevo algoritmo diseñado en este proyecto presenta mejor la señal ya que ésta tiene menor distorsión, se puede

apreciar un interferograma limpio para la mayor parte de la línea; mientras que el interferograma del anterior presenta errores al no focalizar varios puntos; generando mayor distorsión debido a problemas de la superficie de la muestra, falta de focalización, calibración de sistema adecuadamente o ambigüedades presentes en el diseño del anterior algoritmo. Además este se pudo evidenciar por medio de simulación el tiempo de procesado de los algoritmos y el algoritmo de detección de máximos tiene una duración aproximada de 40 minutos al procesar y adquirir las imágenes que en comparación del nuevo algoritmo este se procesa, adquiere imágenes y muestra resultados en un rango de 13 – 15 minutos demostrando así una mayor eficiencia en cuanto ahorro de tiempo.

CONCLUSIONES

En este proyecto se logró cumplir con los objetivos propuestos, se afianzaron temas necesarios para la implementación de métodos policromáticos e interferométricos que fueron base fundamental para la ejecución de un nuevo algoritmo para la obtención de imágenes de rango. Se utilizó una nueva técnica policromática que permite el análisis del interferograma cuando el camino óptico es cero, para todos los puntos de la muestra ya que de esta manera se encuentra la convergencia con la escala de grises haciendo posible la recuperación de información para realizar una reconstrucción tridimensional.

Para realizar las pruebas experimentales se utilizó de muestra; una esfera de vidrio que fue necesario recubirla con una capa fina de oro para garantizar la homogeneidad en el material debido a posibles imperfecciones de la superficie de la esfera, y poder observar el patrón de franjas buscando evitar cambios de fase por reflexión.

Se realizó una calibración del sistema de desplazamiento para asegurar un barrido axial nanométrico, el cual nos permitiera obtener un número mayor de puntos focalizados para la reconstrucción del objeto. Esto se logró por medio de la interfaz implementada en Visual Basic Application la cual permitió interactuar de manera directa con los objetos del microscopio.

Para evitar errores en los puntos en los cuales no se alcanza a localizar el máximo; se conserva igualmente una matriz de intensidades mínimas, así la diferencia entre la matriz de máximos y la matriz de mínimos nos da información del interferograma que sirve como criterio de selección para los puntos no calculados ya que en estos puntos existe pérdida de información de la muestra.

Experimentalmente se pudo comprobar el fenómeno de interferencia a través del recorrido de las franjas del interferograma que muestra algunas deformaciones del objeto analizado.

Para la reconstrucción tridimensional de la esfera se hizo uso de la herramienta ImageJ la cual nos permitió interactuar entre la superficie y textura de la muestra, logrando realzar la topografía del objeto.

Este nuevo algoritmo diseñado tiene una gran ventaja ya que se desarrolló de forma de régimen dinámico, donde no almacena la adquisición de imágenes, sino que ejecuta el proceso registrando valores dispensables para la obtención de imágenes de rango y actualizando datos anteriores, de esta manera ahorra espacio de memoria y hace que la velocidad de ejecución sea más rápida optimizando así tiempo y espacio.

RECOMENDACIONES

La idea principal de este proyecto surge de la implementación de un nuevo algoritmo que aproveche la teoría del color por medio de métodos policromáticos e interferométricos por medio de dispositivos capaces de capturar imágenes de color para la extracción de información de topografía de una superficie.

Este algoritmo se validó a través de la adquisición de imágenes por medio de la interferometría MIRAU que permite el análisis de intensidades de máximos y la desviación mínima de camino óptico logrando hasta el final la obtención y reconstrucción de imagen de rango. Para trabajos futuros se puede realizar la implementación del nuevo algoritmo con interferometría DIC que permite obtener los gradientes de fase de la imagen y que lleven a la reconstrucción tridimensional de una muestra.

También cabe resaltar que las regiones de la imagen fuera del foco o con alguna imperfección de la superficie produce variaciones indeseadas en la fase, esto impide la reconstrucción de la imagen, para esto se puede desarrollar algún método de corrección de este problema y que haga el algoritmo más robusto frente a agentes externos.

La muestra con la que se experimento fue una esfera de vidrio con un recubrimiento para evitar cambios de fase por reflexión ya que el algoritmo está diseñado para interferometría por reflexión, pero se puede llegar a probar la robustez del algoritmo realizando más pruebas experimentales con otro tipo de muestras.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. CHACÓN, Carlos. Reconstrucción tridimensional por microscopia de contraste diferencial con polarización circular. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander. 2013. Bucaramanga
- [2]. P. Harihara. Optical Interferometry. Academic Press, (1985)
- [3]. PLATA, Arturo. DIAZ, Martha. Caracterización de sistemas de desplazamientos nanométricas con microscopia interferométrico. 2008. Tesis de doctorado. Bucaramanga
- [4]. SUAREZ, Miguel. Clasificación de superficies basadas en propiedades de la compresión de imágenes. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander. 2001. Bucaramanga
- [5]. SUAREZ, Miguel. Implementación y aplicación de un perfilómetro óptico basado en microscopia interferencial. Tesis de pregrado. Universidad industrial de Santander. 2000. Bucaramanga
- [6]. ARISTIZÁBAL, Diego Luis. MARTÍNEZ, Carlos Alberto. Concepto básico del procesamiento digital de imágenes usando OrquideaJAI (calculadora digital de imágenes). Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia. 2006. Medellín.
- [7]. AGUILERA, Ernesto. Extracción de información topográfica a partir de franjas de igual color en interferograma de luz blanca. Tesis de maestría. Universidad industrial de Santander. 2005. Bucaramanga.

- [8]. WAINSCHEKER, Rubén. TRISTAN, Paula. Procesamiento digital de imágenes. 2011
- [9] Color Television System. [En línea]. Consultado 11 de Julio de 2014. [Revisado 7 febrero 2018]. Disponible en Internet: <http://www.freepatentsonline.com/2492926.pdf>.

TABLAS

TABLA 2.

N° IMAGEN	R	G	B	x	y
10	232	225	215	0.345	0.334
30	239	227	227	0.344	0.327
50	239	225	222	0.348	0.327
70	231	224	218	0.343	0.332
90	232	225	217	0.344	0.333
110	230	223	213	0.345	0.334
130	230	227	212	0.343	0.339
150	229	220	211	0.346	0.333
170	233	225	214	0.346	0.334
190	234	222	222	0.345	0.327
210	223	216	208	0.344	0.333
230	237	223	220	0.348	0.327
250	249	211	222	0.365	0.309
270	232	198	223	0.355	0.303
290	196	222	237	0.299	0.338
310	255	246	132	0.402	0.388
330	255	254	249	0.336	0.335
350	255	255	255	0.333	0.333
370	249	255	229	0.339	0.349
390	255	190	188	0.402	0.300
410	247	177	211	0.388	0.278
430	205	210	190	0.338	0.347
450	207	200	194	0.344	0.332
470	210	199	195	0.347	0.329

490	203	195	193	0.343	0.329
510	204	195	188	0.347	0.332
530	201	197	194	0.339	0.332
550	199	194	191	0.340	0.332
570	199	196	189	0.340	0.335
590	195	190	186	0.341	0.332
610	197	190	182	0.346	0.333
630	190	186	187	0.337	0.330
650	190	187	182	0.339	0.334
670	207	193	190	0.350	0.327