

**CARACTERIZACIÓN NANOMÉTRICA DE LA DINÁMICA DEL OJO DE LA
MOSCA**

JUAN JOSE BARRIOS ARLANTE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ECUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2009**

**CARACTERIZACIÓN NANOMÉTRICA DE LA DINÁMICA DEL OJO DE LA
MOSCA**

JUAN JOSÉ BARRIOS ARLANTE

Este trabajo es presentado como requisito
para optar al título de Magister en Física

Director
ARTURO PLATA GOMEZ
Doctor en Física

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2009**

A la memoria de: Jaime Luís Bracho F.
(Cuñado)†, Altagracia de Arlante
(Abuela)†, Virginia Arlante (Tía)†; quienes
siempre estuvieron apoyándome a lo largo
de mis estudios.

Juan José Barrios Arlante

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la paciencia y sabiduría en este proceso; a mis padres María Teresa de Barrios y Manuel Barrios, quienes con su amor y colaboración hicieron posible este nuevo logro; a mis hermanos, familiares y amigos, quienes siempre estuvieron animándome a seguir con mis estudios; a mi esposa Emirida García y mis hijos Brandon Esteven y Ana María Barrios, quienes no me abandonaron en ningún momento y siempre estuvieron a mi lado contribuyendo con su paciencia, dedicación y amor incondicional, para que lograra obtener este nuevo título. A toda la familia de mi esposa, en especial mis suegros y cuñados. A mis docentes y compañeros del grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS) y en especial a mi Director Arturo Plata Gómez, quien dirigió con empeño y colaboración mi Tesis de Grado. Y a todas esas personas que de alguna forma estuvieron brindándome apoyo y colaboración incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. INTERFERENCIA LUMINOSA	14
1.1 COHERENCIA E INTERFERENCIA	15
1.1.1 El Interferómetro de Michelson	18
1.2 INTERFERENCIA DE FUENTES POLICROMÁTICAS	20
2. DISPOSITIVO Y MÉTODO UTILIZADO	22
2.1 MÉTODO DEL PHASE-SHIFTING	23
2.2 MÉTODO DE DETECCIÓN DE MÁXIMOS	25
3. ELEMENTOS DE LA TEORIA DE DEFORMACIONES	27
3.1 DEFORMACIONES TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES	31
3.1.1 Deformaciones Longitudinales	32
3.1.2 Deformaciones Transversales	33
4. OJOS COMPUESTOS	36
5. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS	40
5.1 RECONSTRUCCIÓN DE LAS FACETAS DEL OJO DE LA MOSCA	41
5.2 ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL OJO DE LA MOSCA	54
5.2.1 Variaciones de las Franjas Interferométricas	54
5.2.2 Matrices de transformación lineal, de desplazamiento y de giro	79
5.2.3 Flujo óptico	83
6. CONCLUSIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	87

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1.1 Interferencia en P con luz policromática	15
Figura. 1.2 Interferómetro de Michelson, N' es la posición del espejo N al realizar un desplazamiento z	19
Figura. 1.3 Variación en intensidad en un punto desplazando el espejo móvil a lo largo del eje z	19
Figura. 1.4 Grafica de intensidad del interferograma de una fuente policromática	21
Figura. 2.1 Esquema del objetivo interferométrico tipo Mirau	22
Figura. 2.2 Montaje utilizado	23
Figura. 2.3 Reconstrucción de una superficie esférica por Detección de Máximos	26
Figura. 4.1 Ojos compuestos (Holocroales y Esquizocroales)	37
Figura. 4.2 a) Ojos de visión diurna (Apposición) b) Ojos visión nocturna (Superposición)	38
Figura. 4.3 Esquema de un ommatidio de un ojo de apposición	39
Figura. 5.1 Imagen del ojo de una mosca casera	40
Figura. 5.2 (a) Imagen de intensidad (b) grafico de los puntos de intensidad	42
Figura. 5.3 Imagen del ojo de una mosca casera (Fly House) obtenida con el microscopio cofocal (Grupo Biomateriales UIS)	42
Figura. 5.4 Imagen de rango de la región iluminada	43
Figura. 5.5 Reconstrucción tridimensional de la faceta en píxeles	43
Figura. 5.6 Reconstrucción 3D de la faceta del ojo de la mosca, dada en Micras	44
Figura. 5.7 (a) Franjas sobre la región de la cornea (b) Franjas sobre las facetas	45
Figura. 5.8 Puntos a interpolar	46
Figura. 5.9 Interpolación de los puntos	47
Figura. 5.10 Reconstrucción tridimensional de la superficie del ojo de la mosca	48
Figura. 5.11 Reconstrucción de las facetas en diferentes muestras utilizando el método de interpolación	49
Figura. 5.12 Reconstrucción de las facetas de una libélula (odonato)	51
Figura. 5.13 a) Perfil seleccionado de la Faceta b) Diámetro interno de la faceta del perfil seleccionado	52
Figura. 5.14 Curva aproximada de la parte superior del micro lente	53
Figura. 5.15 Imágenes consecutivas donde se aprecian las variaciones de las franjas interferométricas, el tamaño de los cuadros es de 192X232 píxeles	55
Figura. 5.16 Región seleccionada, para analizar las variaciones en las franjas interferométricas a lo largo del video	55
Figura. 5.17 Imágenes consecutivas en la secuencia del video analizado	56
Figura. 5.18 Auto correlación de la región seleccionada con el primer cuadro	57
Figura. 5.19 Correlaciones de la región seleccionada con las imágenes consecutivas en el video	58
Figura. 5.20 (a) Binarización del cuadro 1 (b) Franja seleccionada en el cuadro	160
Figura. 5.21 (a) Binarización del cuadro 2 (b) franja seleccionada en la segunda imagen	61
Figura. 5.22 superposición de las franjas en los cuadros sucesivos 1 y 2	62

Figura. 5.23 a) Aproximación circular de la primera franja b) aproximación circular de la segunda franja.	62
Figura. 5.24 Variaciones de las franjas del imagen 2 a la imagen 7	63
Figura. 5.25 (a) franja seleccionada en el cuadro 2 (b) franja seleccionada en el cuadro 7	64
Figura. 5.26 Superposición de las franjas seleccionadas de la imagen 2 y 7	65
Figura. 5.27 Binarización y selección de las franjas donde se tienen variaciones	66
Figura. 5.28 Superposición de la franja 1 con las franjas de los cuadros 2, 7, 11 y 15 en la secuencia de vídeo	68
Figura. 5.29 Autocorrelación de la franja seleccionada en 1 en el primer cuadro	69
Figura. 5.30 Correlación cruzada de la franja seleccionada en la imagen 1 con la franja de la imagen 2	70
Figura. 5.31 Las imágenes a, b y c representan las correlaciones cruzadas de la franja de la primera imagen con la franja de las imágenes 3, 4 y 6 respectivamente	70
Figura. 5.32 Correlación cruzada de la franja de la primera imagen 1 con la franja de la imagen 7, se indican los dos picos de correlación	71
Figura. 5.33 Correlación cruzada de la franja 1 con la franja de la imagen 11	72
Figura. 5.34 Correlación cruzada de la franja de la imagen 1 con la de la imagen 15	72
Figura. 5.35 Superposición de la franja seleccionada de la primera imagen con las franjas de la imagen donde se presentan variaciones	73
Figura. 5.36 (a) Correlación cruzada de la franja seleccionada en la imagen 1 con la franja de la imagen 26 (b) correlación de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 30	74
Figura. 5.37 (a) Correlación cruzada de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 34 (b) correlación de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 42	74
Figura. 5.38 (a) Correlación cruzada de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 84 (b) correlación de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 90	75
Figura. 5.39 Variación de las intensidades respecto al tiempo en el video 1	76
Figura. 5.40 Variación de las intensidades respecto al tiempo en el video 2	77
Figura. 5.41 Variaciones de la intensidad respecto al tiempo en el video 3	78
Figura. 5.42 Variaciones de la intensidad respecto al tiempo en el video 4	78
Figura. 5.43 Región seleccionada en dos cuadros consecutivos	79
Figura. 5.44 Sentido de las variaciones de los puntos de una franja a otra	80
Figura. 5.45 Sentido de la variación de la franja en el video 2	81
Figura. 5.46 Representación del sentido de las variaciones en la imagen utilizando flujo óptico	83
Figura. 5.47 Sentido de las variaciones de la imagen en la secuencia 165-166	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1 Alturas del lente corneo	53
Tabla 5.2 Intensidades respecto al tiempo en el video 1	75
Tabla 5.3 Intensidad respecto al tiempo en video 2	76
Tabla 5.4 Intensidad respecto al tiempo video 3	77
Tabla 5.5 Intensidad respecto al tiempo video 4	78

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN NANOMÉTRICA DE LA DINÁMICA DEL OJO DE LA MOSCA*

AUTOR: JUAN JOSÉ BARRIOS ARLANTE**

Palabras claves: Interferometría, ojos compuestos, omatidios, microlentes, deformación, interferograma, mosca, intensidad

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de investigación fue orientado a la caracterización el movimiento del ojo de la mosca, utilizando un microscopio con objetivo interferométrico. Analizando los cambios en las franjas interferométricas en una secuencia de video fue posible juzgar la dinámica del ojo.

En *el primer capítulo*, se presentan los elementos teóricos mas importantes del fenómeno de la interferencia con luz coherente e incoherente de una forma sencilla desde el contexto de la teoría de la coherencia, considerando la importancia de este referente conceptual como base en la investigación realizada; teniendo en cuenta que en la práctica fue la luz policromática, la que se empleó con el microscopio interferométrico para la obtención de la información necesaria para el estudio planteado. Posteriormente en *el capítulo dos* se presenta información referente a la herramienta y método utilizado para la obtención de las imágenes de de la superficie del ojo compuesto de una mosca, para la codificación de la topografía de la superficie del ojo de la mosca. En *el tercer capítulo*, se presentan los elementos más importantes de la teoría de deformación de un sólido, dado la necesidad de estudiar la dinámica del movimiento del ojo de la mosca, como una manifestación de la deformación del ojo como un sistema elástico, mientras que en *el cuarto capítulo* se hace una descripción de la estructura del ojo de los insectos.

Finalmente en *el capítulo cinco*, se presenta el análisis de los resultados, enfocados a la reconstrucción de la topografía del ojo de la mosca, para poder hacer la parte relevante del trabajo propuesto. Se determinó el valor aproximado de la rapidez de cambio al momento de adaptarse a la luz con que era iluminado, se encontraron las matrices de deformación y de pequeños giros, para posibles deformaciones de puntos de la superficie del ojo.

* Tesis de Maestría

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Arturo Plata Gómez.

ABSTRACT

TITLE: NANOMETRIC CHARACTERIZATION DYNAMICS OF THE EYE OF THE FLY*

AUTHOR: JUAN JOSÉ BARRIOS ARLANTE**

Keywords: Interferometry, compound eyes, omatidios, micro - Lenses, deformation, interferogram, fly, intensity

DESCRIPTION:

This research was aimed at characterizing the movement of the eye of the fly, using an interferometric microscope objective. Analyzing changes in the interferometric fringes on a video sequence was possible to judge the dynamics of the eye.

In the first chapter, we present the major theoretical elements of the phenomenon of interference with coherent and incoherent light in a simple manner from the context of the theory of coherence, considering the importance of this conceptual basis in the investigation; taking into account that in practice was the polychromatic light, which was used with a microscope interferometric to obtain the necessary information for the study raised. Later in the chapter two presents information about the tool and method used to obtain images of the surface of the compound eye of a fly, for the coding of the topography of the surface of the eye of the fly. The third chapter presents the most important elements of the theory of deformation of a solid, given the need to study the dynamics of movement of the eye of the fly, as a manifestation of the deformation of the eye as an elastic system, whereas in the fourth chapter is a description of the structure of the eye of insects.

Finally in chapter five presents the analysis of results, focusing on the reconstruction of the topography of the eye of the fly, to make the relevant part of the proposed work. We determined the approximate value of the speed of change at adapting to the light that was lit, they found the parent strain and small turns, points to possible deformation of the surface of the eye.

* Thesis of Master

** Faculty of Science. School of Physics. Director: Arturo Plata Gómez.

INTRODUCCIÓN

Los métodos interferométricos han sido utilizados en múltiples aplicaciones entre las que se resaltan la reconstrucción de superficies y volúmenes en algunos casos. Esta herramienta, útil en metrología, es la que se implementa en el presente proyecto. Para tal efecto se hace necesario tener en cuenta parte de la teoría de los fenómenos asociados a la medición.

Siendo la interferometría la base del proyecto desarrollado, en el primer capítulo se realiza una descripción simple de la interferencia luminosa tanto monocromática como policromática. Posteriormente en el siguiente capítulo se especifica el dispositivo y los métodos utilizados, entre los cuales resaltan el de Phase-Shifting y el de Detección de Máximos, utilizándose el método de Detección de Máximos para la reconstrucción respectiva de las facetas.

En el tercer capítulo se indica la teoría para el fenómeno de la deformación de un punto en un sólido elástico, en esta parte se analiza la forma para determinar las matrices de deformación y las de pequeños giros. Se describen detalles de los tipos de ojos compuestos de los insectos en el capítulo tres, entre los cuales, el ojo de la mosca representa un ojo de aposición. Finalmente en el capítulo cinco se reconstruyen las facetas del ojo de la mosca y se estudia el respectivo movimiento con el análisis de las variaciones de las franjas interferométricas que se tienen en el video adquirido.

1. INTERFERENCIA LUMINOSA

Teniendo en cuenta que el presente proyecto “CARACTERIZACIÓN NANOMÉTRICA DE LA DINÁMICA DEL OJO DE LA MOSCA” se fundamenta en el empleo de procesos interferométricos, en el presente capítulo, se presentan los elementos teóricos más importantes del fenómeno de la interferencia con luz coherente e incoherente de una forma sencilla, desde el contexto de la teoría de la coherencia.

Considerando la importancia de este referente conceptual como base en la investigación realizada y teniendo en cuenta que en la práctica fue la luz policromática, la que se empleó con el microscopio interferométrico para la obtención de la información necesaria para el estudio planteado como objeto central de este trabajo, se hace mayor énfasis en la descripción del fenómeno de interferencia luminosa.

Recordando que la luz representa una onda electromagnética, se identifica que cuando dos haces de luz llegan a un punto común se genera el fenómeno denominado interferencia. Vale la pena resaltar, que en la actualidad se aprovecha este fenómeno para realizar mediciones y reconstrucciones de superficies entre otras investigaciones, recordándole al lector, que de3see profundizar mas sobre el tema o que desee una descripción en detalle del fenómeno luminoso, consultar textos como los de M. Born and E. Wolf¹, Saleh and Teich², Hariharan³, Handbook of Optics⁴.

¹ BORN, M and WOLF, E. Principles of Optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Cambridge University Press. 1999. Seventh edition

² SALEH, B and TEICH, M. Fundamentals of photonics, New York, 1991

³ HARIHARAN, P. Basics of Interferometry. School of Physics, University of Sydney. Australia. 2007. Second Edithion.

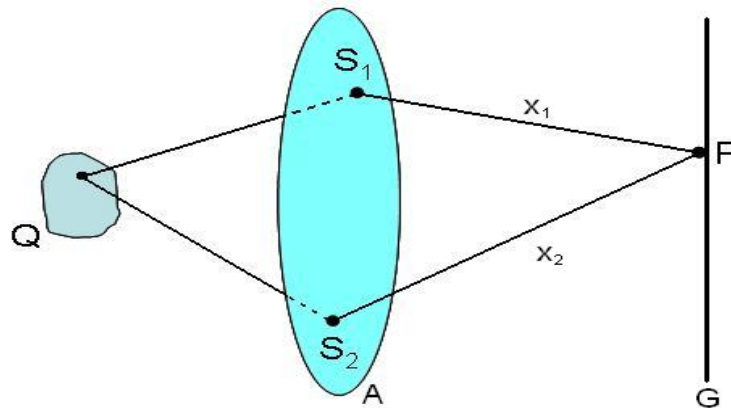
⁴ BASS, M, *et al.* Handbook of Optics: Fundamentals, Technics and Design. New York. 1995. Volumen I

1.1 COHERENCIA E INTERFERENCIA

El análisis de la interferencia luminosa se hace a través de la teoría de Coherencia; donde se demuestra que la visibilidad de las franjas interferométricas, que se tienen en este fenómeno, está en función de la coherencia espacial y temporal de la fuente. Clásicamente, se considera que todo punto de una fuente extendida irradia luz independientemente y produce patrones propios de interferencia. El análisis pertinente a este fenómeno se realiza teniendo en cuenta el modelo del experimento de Young^{5 6}.

Consideremos la interferencia en un punto P, de la luz que viaja a través de dos huecos tipo alfiler (pinholes); la cual proviene de un punto en común de una fuente extendida Q, como se indica en la figura 1.1.

Figura. 1.1 Interferencia en P con luz policromática



Se considerará el campo producido por la fuente extendida policromática Q, sin tener en cuenta los efectos de polarización, teniendo en cuenta las perturbaciones

⁵ HARIHARAN, P. Op. cit. p. 14.

⁶ BORN and WOLF. Op. cit. p. 291.

luminosas como funciones reales escalares de la posición y el tiempo $V^{(r)}(S,t)$, donde esta función se asocia a la señal analítica $V(S,t)$.

En la práctica, al valor que se puede tener acceso es a la intensidad $I(S)$, siendo esta proporcional al valor medio⁷ de $V^{(r)2}(S,t)$, de tal modo que:

$$I(S) = 2 \langle V^{(r)2}(S,t) \rangle = \langle V(S,t)V^*(S,t) \rangle \quad (1.1)$$

Se puede medir las intensidades en el punto P, siendo $I(S_1)$ e $I(S_2)$, así como la interferencia en P debida a la superposición en amplitud y fase de los campos producidos por las dos fuentes, donde x_1 y x_2 representan las distancias desde la pantalla A al punto P de la pantalla G. Por el principio de Huygens se sabe que S_1 y S_2 se comportan como fuentes secundarias de tal forma que la representación del compleja del campo en P se expresa de la forma

$$V(P,t) = K_1 V(S_1, t-t_1) + K_2 V(S_2, t-t_2) \quad (1.2)$$

Siendo t_1 y t_2 los tiempos que tarda la luz en viajar desde los puntos S_1 y S_2 hasta P respectivamente.

$$t_1 = \frac{x_1}{c} \text{ y } t_2 = \frac{x_2}{c} \quad (1.3)$$

Donde c representa la velocidad de la luz en el vacío⁸.

Así se tiene de (1.1) y (1.2) que la intensidad en P es:

$$I(P) = K_1 K_1^* \langle V_1(t-t_1)V_1^*(t-t_1) \rangle + K_2 K_2^* \langle V_2(t-t_2)V_2^*(t-t_2) \rangle +$$

⁷ BORN and WOLF. Op. cit. p. 562.

⁸ BORN and WOLF. Op. cit. p. 563

$$K_1 K_2^* \langle V_1(t-t_1) V_2^*(t-t_2) \rangle + K_2 K_1^* \langle V_2(t-t_2) V_1^*(t-t_1) \rangle \quad (1.4)$$

Se escribe de forma simple, teniendo en cuenta que $V_1(t) = V(S_1, t)$

Suponiendo que el campo es estacionario el origen del tiempo se puede cambiar. Entonces

$$\langle V_1(t-t_1) V_1^*(t-t_1) \rangle = \langle V_1(t) V_1^*(t) \rangle = I_1 \quad (1.5)$$

Y así para los otros términos. Usando (1.3) y advirtiendo que K_1 y K_2 presentan número imaginarios puros, y asumimos que $\tau = t_2 - t_1 = \frac{OPL_2 - OPL_1}{c} = \frac{OPD}{c}$,

OPD (1.4) adopta la forma de

$$I(P) = |K_1|^2 I_1 + |K_2|^2 I_2 + K_1 K_2^* \langle V_1(t+\tau) V_2^*(t) \rangle + K_2 K_1^* \langle V_2(t) V_1^*(t+\tau) \rangle \quad (1.6)$$

Definiéndose la *función de coherencia mutua* como se expresa en la ecuación (1.7).

$$\Gamma_{12}(\tau) = \langle V_1(t+\tau) V_2^*(t) \rangle \quad (1.7)$$

Y el respectivo conjugado

$$\Gamma_{12}^*(\tau) = \langle V_2(t) V_1^*(t+\tau) \rangle$$

Permitiendo a la intensidad en P ser expresada en términos de la *función de coherencia mutua*

$$I(P) = |K_1|^2 I_1 + |K_2|^2 I_2 + 2|K_1 K_2| \Gamma_{12}^{(r)} \left(\frac{x_2 - x_1}{c} \right) \quad (1.9)$$

Donde $\Gamma_{12}^{(r)}(\tau)$ representa la parte real de la función.

Resulta conveniente normalizar la función $\Gamma_{12}(\tau)$, de modo que:

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{\Gamma_{11}(0)\Gamma_{22}(0)}} \quad (1.10)$$

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{I_1 I_2}} \quad (1.11)$$

$$\gamma_{12}(\tau) \leq 1$$

Donde $\gamma_{12}(\tau)$ representa el grado de coherencia y τ el retardo temporal; de (1.9), (1.11) y teniendo en cuenta que⁹ $I^{(1)}(Q) = |K_1|^2 I_1 = |K_1|^2 \Gamma_{11}(0)$

Entonces (1.9) adopta la forma de

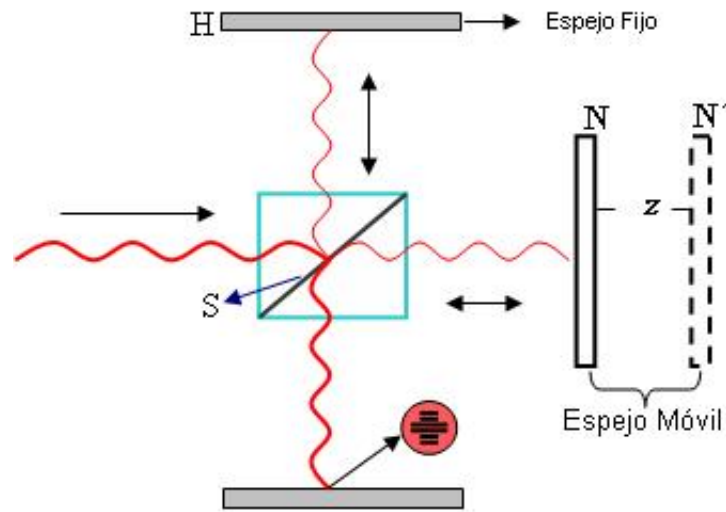
$$I(P) = I^{(1)}(P) + I^{(2)}(P) + 2\sqrt{I^{(1)}(P)I^{(2)}(P)}\gamma_{12}^{(r)}\left(\frac{x_2 - x_1}{c}\right) \quad (1.12)$$

1.1.1 El Interferómetro de Michelson

En este dispositivo se tiene: Una lámina separatriz hace que parte de la luz monocromática que incide se refleje y otra parte de igual magnitud se transmita. Obteniendo así rayos de iguales características, haciendo que estos se desplacen por caminos ópticos diferentes e interfiriendo posteriormente. Una ilustración del fenómeno se indica en la figura 1.2

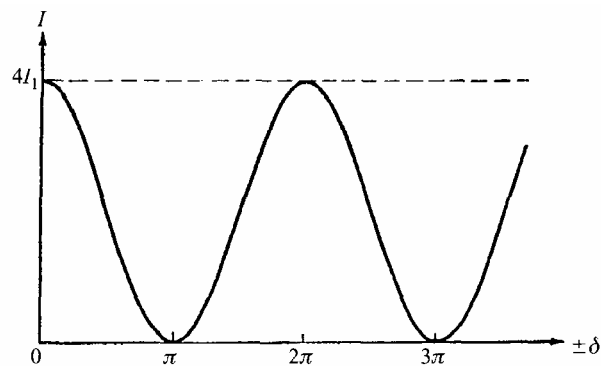
⁹ BORN and WOLF. Op. cit. p. 564

Figura. 1.2 Interferómetro de Michelson, N' es la posición del espejo N al realizar un desplazamiento z



La intensidad de los dos rayos que interfieren, en este modelo, viene dado por la ecuación (1.12), para la fuente monocromática la envolvente de las franjas $|\gamma_{12}(\tau)|$ tiende a mantener un valor constante entre órdenes cercanos, mostrándose en la figura 1.3 la respectiva representación.

Figura. 1.3 Variación en intensidad en un punto desplazando el espejo móvil a lo largo del eje z



Tomado de: Born and Wolf

La intensidad en el plano de observación está dada por.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (1.13)$$

Donde $\Delta\phi(x, y)$ es la diferencia de fase entre las dos ondas para cada punto. Si los índices de refracción difieren en los dos caminos, la diferencia de fase en un interferómetro de Michelson (Figura. 1.2) se da de la forma:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi \left[n_1(\overline{SN}) - n_2(\overline{SH}) \right]}{\lambda} \quad (1.14)$$

Al cambiar la posición del espejo móvil, la variación de fase que introduce el desplazamiento z está dada por:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi n_1 z}{\lambda} \quad (1.15)$$

De donde la intensidad en el plano de observación varía entre un valor máximo y mínimo, de dicha intensidad. El valor máximo de intensidad se presenta en los puntos donde la diferencia de fase $\Delta\phi$ sea cero o múltiplos pares de π y mínima para múltiplos impares de π .

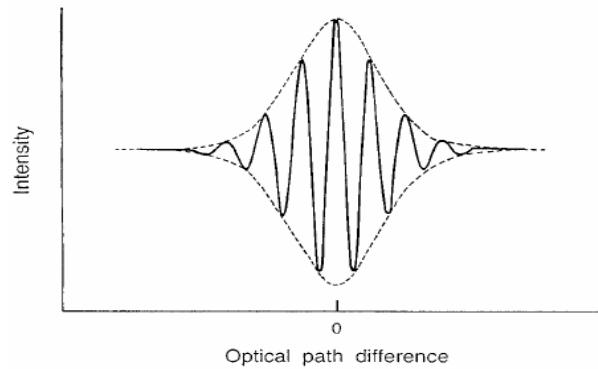
1.2 INTERFERENCIA DE FUENTES POLICROMÁTICAS

La interferencia producida por una fuente policromática se toma como la superposición en intensidad de los interferogramas producidos por cada componente espectral de la fuente. De la ecuación (1.12) se tiene que la diferencia de fase para encontrar dos máximos depende de la longitud de onda, a medida que aumenta la diferencia de camino óptico, resulta una secuencia de interferencia de colores menos saturada, entonces, la intensidad en este caso puede ser expresada de la forma de la ecuación

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \left| \gamma_{12}(\tau) \right| \cos(2\pi\nu_0) \quad (1.16)$$

Donde la envolvente $|\gamma_{12}(\tau)|$ se hace más estrecha a medida que el ancho de banda de la frecuencia de las fuentes aumenta. En la figura 1.4 se muestra la grafica de las intensidades del interferograma que produce este tipo de fuentes¹⁰
¹¹ ¹².

Figura. 1.4 Grafica de intensidad del interferograma de una fuente policromática



Tomado de: Hariharan P.

De la grafica se puede ver los puntos para los cuales la diferencia de camino óptico es nula, la diferencia de fase también es nula para todas las longitudes de onda, y por lo tanto los interferogramas formados por las diferentes componentes espectrales de la fuente presentan un máximo de intensidad en estos puntos. Dando como resultado una franja blanca central de máxima intensidad; disminuyendo, por otra parte, la visibilidad de las franjas disminuye a medida que la diferencia de camino óptico aumenta.

¹⁰ BORN and WOLF. Op. cit. p. 581

¹¹ HARIHARAN, P. Op. cit. p. 106

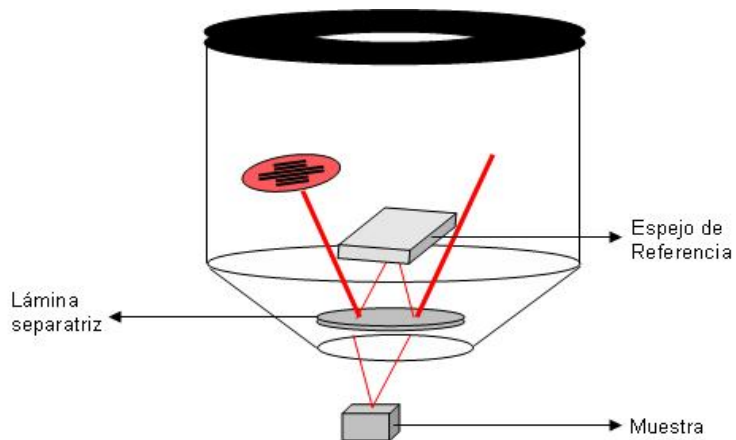
¹² SALEH, B and TEICH. Op. cit. p. 362

2. DISPOSITIVO Y MÉTODO UTILIZADO

En presente capítulo, se presenta información referente a la herramienta y método utilizado para la obtención de las imágenes de de la superficie del ojo compuesto de una mosca, para poder hacer la caracterización de la dinámica del ojo de la mosca en forma nanométrica, con el empleo de procesos interferométricos usando luz a incoherente. En la figura. 2.1 se muestra el objetivo usado en el microscopio interferométrico, que se empleo para la obtención de la información necesaria para el estudio planteado como objeto central de esté trabajo.

Las mediciones respectivas fueron realizadas con la ayuda de un microscopio por reflexión, el cual consta de un objetivo tipo Mirau de 10X o 50X respectivamente. Una representación esquemática de este tipo de objetivos utilizados se indica en la figura 5.

Figura. 2.1 Esquema del objetivo interferométrico tipo Mirau



El sistema cuenta con un Piezo-Eléctrico a través del cual se realizan desplazamientos axiales (ascendentes y descendentes); donde éste barre 3nm por paso y el recorrido total depende de la topografía de la muestra. Controlado por un sistema digital por una interfaz que cuenta con convertidor digital que

convierte señales TTL en un voltaje, además de un amplificador que permite variar el rango total de desplazamientos del piezo como producto del valor máximo de voltaje suministrado. En la figura 2.2 se indica el esquema del montaje utilizado. Por otra parte éste dispositivo está provisto de una fuente de luz policromática, una cámara CCD que captura imágenes entre 12 y 25 cuadros por segundo.

Figura. 2.2 Montaje utilizado



Para realizar procesamiento de la información que se obtiene, se hace necesario tener en cuenta los métodos utilizados para la reconstrucción y análisis de superficies.

2.1 MÉTODO DEL PHASE-SHIFTING

Analizando el interferograma producido por una fuente se tiene por la ecuación (1.12) donde a través de la envolvente constante se puede codificar la topografía de una superficie en la diferencia de fase óptica entre los puntos. Esto se logra

iluminando la muestra con una fuente de luz monocromática con longitud de onda λ_0 realizando una serie de registro a medida que se introduce un factor de fase desconocido menor de 2π al variar la diferencia de camino óptico^{13 14 15}.

Lo más usual para el desarrollo del método es analizar cuatro imágenes, que se hayan registrando cada a medida que se introduce una diferencia de camino en $\frac{\lambda_0}{2}$. Encontrando así imágenes cuyas intensidades están dadas por:

$$\begin{aligned}
 I_0(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{\frac{1}{2}} \cos(\phi(x, y)) \\
 I_1(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{\frac{1}{2}} \cos\left(\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right) \\
 I_2(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{\frac{1}{2}} \cos(\phi(x, y) + \pi) \\
 I_3(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{\frac{1}{2}} \cos\left(\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Desarrollando los cosenos se tiene

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I_R + I_M - 2(I_R I_M)^{\frac{1}{2}} \text{sen}(\phi(x, y)) \\
 I_2(x, y) &= I_R + I_M - 2(I_R I_M)^{\frac{1}{2}} \cos(\phi(x, y)) \\
 I_3(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{\frac{1}{2}} \text{sen}(\phi(x, y))
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Realizando las operaciones

$$\begin{aligned}
 I_0(x, y) - I_2(x, y) \\
 I_3(x, y) - I_1(x, y)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

∴ Se tiene que

¹³ PLATA G, Arturo, *et al.* Reconstrucción Topográfica Utilizando Simultáneamente Métodos de Luz Monocromática con Luz Blanca. Universidad Industrial de Santander, Colombia. VII Encuentro Nacional de Óptica. Página 26.

¹⁴ SUÁREZ, M. Implementación de un Perfilómetro Óptico basado en Microscopía Interferencial. Universidad Industrial de Santander. 2000. Tesis pregrado

¹⁵ HARIHARAN, P. Op. cit. p. 209.

$$\begin{aligned}
I_0(x, y) - I_2(x, y) &= 4(I_R I_M)^{\frac{1}{2}} \cos(\phi(x, y)) \\
I_3(x, y) - I_1(x, y) &= 4(I_R I_M)^{\frac{1}{2}} \text{sen}(\phi(x, y))
\end{aligned}
\tag{2.4}$$

Encontrándose que la fase ϕ está dada por:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \right)
\tag{2.5}$$

Al utilizar luz monocromática se identifica como varía la fase al variar la posición de un espejo. Los diferentes puntos de la muestras entregan las variaciones de altura, encontrándose en dichas variaciones la información de la topografía de la muestra. Encontrándose la expresión para la topografía de la muestra descrita por la ecuación (2.6)

$$z(x, y) = \frac{\lambda_0 \phi(x, y)}{4\pi}
\tag{2.6}$$

Se advierte que debido a problemas que presentaron con el método de corrimiento de fase (Phase-Shifting) en su implementación al corregir las discontinuidades en la fase cuando se reconstruyó la superficie del ojo de la mosca, a partir de las franjas de interferencia, este método fue descartado por su inestabilidad, tomando finalmente la decisión de hacer el estudio con base el método de detección de máximos.

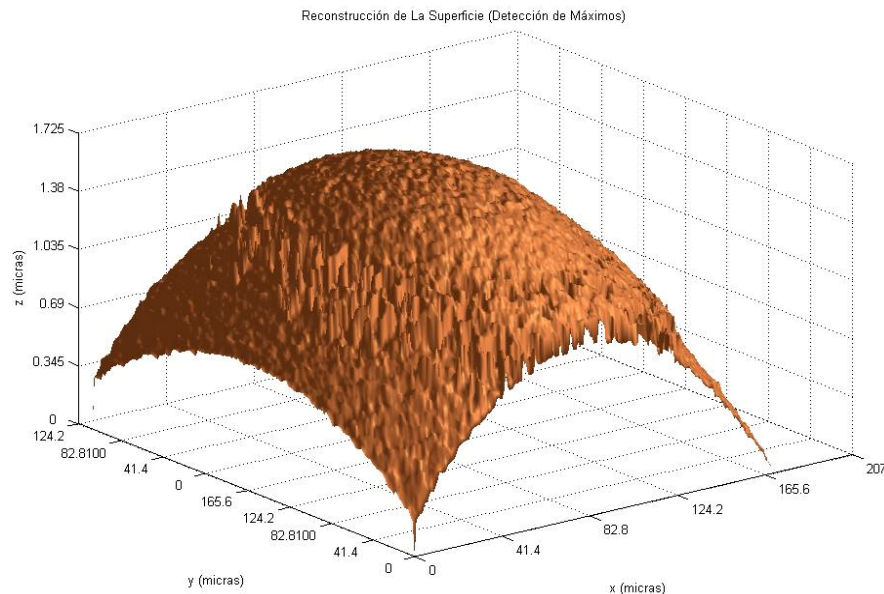
2.2 MÉTODO DE DETECCIÓN DE MÁXIMOS

En este método se realiza la adquisición de las imágenes sincronizados con el sistema piezo-eléctrico. Ésta técnica obtiene la información de un interferograma producido por una fuente policromática, teniendo en cuenta que en este caso la expresión (1.12), donde el término $|\gamma_{12}(\tau)|$ que modula las franjas presenta un

máximo en los puntos donde la diferencia de camino óptico es cero; realizando los desplazamientos axiales se localizan la posición de los puntos de máxima intensidad; obteniéndose al final dos matrices con diferente información; de las cuales una entrega los valores de los máximos de intensidad del interferograma que se obtiene, y la otra arroja, por decirlo así, la posición de los máximos equivalentes a la información topográfica de la muestra iluminada (imagen de rango). A la imagen de de rango se le realiza el respectivo tratamiento para obtener la reconstrucción de la superficie. Una descripción de estos métodos se puede encontrar en^{16 17}.

En la figura 2.3 se muestra la reconstrucción de la región de una superficie esférica utilizando el método de detección de máximo.

Figura. 2.3 Reconstrucción de una superficie esférica por Detección de Máximos



¹⁶ SUÁREZ, M. Op. cit. p. 23

¹⁷ SUÁREZ, M, GARZON, J and PLATA, A. Polychromatic Local Reflectivity of Materials. SPIE. Vol. 4419. p. 748

3. ELEMENTOS DE LA TEORIA DE DEFORMACIONES

Como el objeto central del presente trabajo de investigación es la caracterización nanométrica del ojo de la mosca y su dinámica, a partir de la codificación de la topografía de la superficie del ojo que se logra en la fase de las franjas interferométricas obtenidas y considerando que ésta dinámica se manifiesta a través de la deformación del ojo como un sistema elástico, fruto del resultado de la acomodación del ojo, es fundamental hacer una introducción de los aspectos más relevantes de algunos elementos de la teoría de deformaciones en un sólido para nuestro estudio. Es así, como en el presente capítulo se le presenta al lector, los conceptos de deformaciones simples, generalizadas, campo de deformación y de desplazamientos, matriz de giro debido a pequeños desplazamientos, tensor de deformación, etc. Puesto que con estos conceptos y representación matemática de estos conceptos, será posible hacer las estimaciones requeridas para ver las tendencias de las deformaciones en el ojo de la mosca y sobre todo en las imágenes que se lograron obtener en la secuencia que constituyen el video, resaltar mediante las líneas de campo de deformación mostrar precisamente esa dinámica, mediante algunos vectores, que el lector encontrará en el quinto capítulo.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, es claro que una de las herramientas a implementar es la teoría de deformaciones^{18 19}, parte de esta teoría se describe en este capítulo.

Se tienen dos matrices de las coordenadas de los puntos de dos imágenes consecutivas (frames consecutivos), las cuales se representan como MP_0 y MP_1 , de donde:

¹⁸ RESISTENCIA DE MATERIALES I. Escuela Técnica Superior de Materiales de Madrid. Curso 2006-07;

¹⁹ MAYER OMAR. Teoría de la Deformación, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Buenos Aires, 2006

$$MP_0 = \begin{bmatrix} x_{01} & y_{01} \\ x_{02} & y_{02} \\ x_{03} & y_{03} \\ x_{04} & y_{04} \\ x_{05} & y_{05} \end{bmatrix} \quad MP_1 = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{11} \\ x_{12} & y_{12} \\ x_{13} & y_{13} \\ x_{14} & y_{14} \\ x_{15} & y_{15} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Se encuentra la variación que hay entre cada uno de estos puntos obteniéndose la matriz generalizada para el vector desplazamiento. Así:

$$\delta \vec{P} = \begin{pmatrix} x_{11} - x_{01} & y_{11} - y_{01} \\ x_{12} - x_{02} & y_{12} - y_{02} \\ x_{13} - x_{03} & y_{13} - y_{03} \\ x_{14} - x_{04} & y_{14} - y_{04} \\ x_{15} - x_{05} & y_{15} - y_{05} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

El vector desplazamiento para cada punto respectivamente, está dado por:

$$\delta \vec{P}_1 = \begin{pmatrix} x_{11} - x_{01} \\ y_{11} - y_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{u}_1 \\ \vec{v}_1 \end{pmatrix}; \quad \delta \vec{P}_2 = \begin{pmatrix} x_{12} - x_{02} \\ y_{12} - y_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{u}_2 \\ \vec{v}_2 \end{pmatrix}; \quad \delta \vec{P}_3 = \begin{pmatrix} x_{13} - x_{03} \\ y_{13} - y_{03} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{u}_3 \\ \vec{v}_3 \end{pmatrix}$$

$$\delta \vec{P}_4 = \begin{pmatrix} x_{14} - x_{04} \\ y_{14} - y_{04} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{u}_4 \\ \vec{v}_4 \end{pmatrix} \quad \text{Y} \quad \delta \vec{P}_5 = \begin{pmatrix} x_{15} - x_{05} \\ y_{15} - y_{05} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{u}_5 \\ \vec{v}_5 \end{pmatrix}$$

Donde $\left. \begin{matrix} \vec{u}_i = x_{1i} - x_{0i} \\ \vec{v}_i = y_{1i} - y_{0i} \end{matrix} \right\} i = 1, 2, 3, \dots$ en este caso. La separación entre cada punto se

representa como:

$$\Delta r_{01} = \begin{pmatrix} x_{02} - x_{01} \\ y_{02} - y_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \end{pmatrix}; \quad \Delta r_{02} = \begin{pmatrix} x_{03} - x_{02} \\ y_{03} - y_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \end{pmatrix}; \quad \Delta r_{03} = \begin{pmatrix} x_{04} - x_{03} \\ y_{04} - y_{03} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_3 \\ \Delta y_3 \end{pmatrix};$$

$$\Delta r_{04} = \begin{pmatrix} x_{05} - x_{04} \\ y_{05} - y_{04} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_4 \\ \Delta y_4 \end{pmatrix}$$

Ahora bien; restándole $\delta \vec{P}_1$ a los demás vectores de desplazamiento se tiene la traslación de los puntos.

$$\delta \vec{G}_1 = \delta \vec{P}_2 - \delta \vec{P}_1$$

$$\delta \vec{G}_2 = \delta \vec{P}_3 - \delta \vec{P}_1$$

$$\delta\vec{G}_3 = \delta\vec{P}_4 - \delta\vec{P}_1$$

$$\delta\vec{G}_4 = \delta\vec{P}_5 - \delta\vec{P}_1$$

Por otra parte, sea M_i la matriz de transformación lineal

$$M_i = \begin{pmatrix} \frac{\delta G_{x_i}}{\Delta x_i} & \frac{\delta G_{x_i}}{\Delta y_i} \\ \frac{\delta G_{y_i}}{\Delta x_i} & \frac{\delta G_{y_i}}{\Delta y_i} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} \frac{u_2 - u_1}{\Delta x_1} & \frac{u_2 - u_1}{\Delta y_1} \\ \frac{v_2 - v_1}{\Delta x_1} & \frac{v_2 - v_1}{\Delta y_1} \end{pmatrix}; \quad M_2 = \begin{pmatrix} \frac{u_3 - u_1}{\Delta x_2} & \frac{u_3 - u_1}{\Delta y_2} \\ \frac{v_3 - v_1}{\Delta x_2} & \frac{v_3 - v_1}{\Delta y_2} \end{pmatrix}; \quad M_3 = \begin{pmatrix} \frac{u_4 - u_1}{\Delta x_3} & \frac{u_4 - u_1}{\Delta y_3} \\ \frac{v_4 - v_1}{\Delta x_3} & \frac{v_4 - v_1}{\Delta y_3} \end{pmatrix};$$

$$M_3 = \begin{pmatrix} \frac{u_4 - u_1}{\Delta x_3} & \frac{u_4 - u_1}{\Delta y_3} \\ \frac{v_4 - v_1}{\Delta x_3} & \frac{v_4 - v_1}{\Delta y_3} \end{pmatrix}$$

Donde la matriz M_i puede descomponerse en una suma de una matriz simétrica y otra matriz anti-simétrica:

$$[M_i] = \underbrace{\frac{1}{2} \{ [M_i] + [M_i]^t \}}_{[D_i]} + \underbrace{\frac{1}{2} \{ [M_i] - [M_i]^t \}}_{[H_i]} \quad (3.4)$$

$[D_i]$ = Matriz simétrica \rightarrow Matriz de Deformación

$[H_i]$ = Matriz Anti-simétrica \rightarrow Matriz de Giro

$$[D_1] = \frac{1}{2} \left\{ \begin{pmatrix} \frac{u_2 - u_1}{\Delta x_1} & \frac{u_2 - u_1}{\Delta y_1} \\ \frac{v_2 - v_1}{\Delta x_1} & \frac{v_2 - v_1}{\Delta y_1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{u_2 - u_1}{\Delta x_1} & \frac{v_2 - v_1}{\Delta x_1} \\ \frac{u_2 - u_1}{\Delta y_1} & \frac{v_2 - v_1}{\Delta y_1} \end{pmatrix} \right\}$$

$$[D_1] = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2 \frac{u_2 - u_1}{\Delta x_1} & \frac{u_2 - u_1}{\Delta y_1} + \frac{v_2 - v_1}{\Delta x_1} \\ \frac{v_2 - v_1}{\Delta x_1} + \frac{u_2 - u_1}{\Delta y_1} & 2 \frac{v_2 - v_1}{\Delta y_1} \end{pmatrix} \text{ Matriz de Deformación} \quad (3.5)$$

$$[H_1] = \frac{1}{2} \left\{ \begin{pmatrix} \frac{u_2 - u_1}{\Delta x_1} & \frac{u_2 - u_1}{\Delta y_1} \\ \frac{v_2 - v_1}{\Delta x_1} & \frac{v_2 - v_1}{\Delta y_1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{u_2 - u_1}{\Delta x_1} & \frac{v_2 - v_1}{\Delta x_1} \\ \frac{u_2 - u_1}{\Delta y_1} & \frac{v_2 - v_1}{\Delta y_1} \end{pmatrix} \right\}$$

$$[H_1] = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & \frac{u_2 - u_1}{\Delta y_1} - \frac{v_2 - v_1}{\Delta x_1} \\ \frac{v_2 - v_1}{\Delta x_1} - \frac{u_2 - u_1}{\Delta y_1} & 0 \end{pmatrix} \text{ Matriz de Giro} \quad (3.6)$$

Análogamente se encuentra que

$$[D_2] = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2 \frac{u_3 - u_1}{\Delta x_2} & \frac{u_3 - u_1}{\Delta y_2} + \frac{v_3 - v_1}{\Delta x_2} \\ \frac{v_3 - v_1}{\Delta x_2} + \frac{u_3 - u_1}{\Delta y_2} & 2 \frac{v_3 - v_1}{\Delta y_2} \end{pmatrix}$$

$$[H_2] = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & \frac{u_3 - u_1}{\Delta y_2} + \frac{v_3 - v_1}{\Delta x_2} \\ \frac{v_3 - v_1}{\Delta x_2} - \frac{u_3 - u_1}{\Delta y_2} & 0 \end{pmatrix}$$

Generalizando se tiene:

$$[D_i] = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2 \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x_i} & \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta y_i} + \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta x_i} \\ \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta x_i} + \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta y_i} & 2 \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta y_i} \end{pmatrix} \text{ Matriz Deformación Generalizada} \quad (3.7)$$

$$[H_i] = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta y_i} + \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta x_i} \\ \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta x_i} - \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta y_i} & 0 \end{pmatrix} \text{ Matriz de Giro Generalizada} \quad (3.8)$$

En este caso (u_i, v_i) es el punto que se toma y $\left. \begin{array}{l} \Delta x_i = x_{0i+1} - x_{0i} \\ \Delta y_i = y_{0i+1} - y_{0i} \end{array} \right\}$ con $i = 1, 2, 3, 4$.

Si se tiene en cuenta la matriz de deformación generalizada, esta puede expresarse de la forma:

$$[D] = \begin{pmatrix} \frac{\Delta u}{\Delta x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u}{\Delta y} + \frac{\Delta v}{\Delta x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta v}{\Delta x} + \frac{\Delta u}{\Delta y} \right) & \frac{\Delta v}{\Delta y} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Si los diferenciales respecto a x e y se hacen lo suficientemente pequeños de tal manera que se puedan representar matemáticamente por medio del límite se tiene:

$$[D] = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{xy} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \varepsilon_y \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Representando la ecuación anterior la matriz de pequeñas deformaciones.

De forma similar se encuentra que la matriz de Giro se expresa como sigue

$$[H] = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -a_z \\ a_z & 0 \end{pmatrix}$$

La ecuación anterior representa la matriz de Pequeños Giros

3.1 DEFORMACIONES TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES

Las componentes de la matriz de deformación $[D]$ se relacionan con las componentes (u, v) del campo de desplazamiento $\delta \vec{p}$ mediante las ecuaciones:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

En nuestro caso las ecuaciones anteriores relacionan las derivadas del campo de desplazamiento con las componentes del campo de deformación en la hipótesis de pequeños desplazamientos. Son ecuaciones cinemáticas en el sentido que definen la deformación sin tener en cuenta la causa que la produce.

Los términos ε_x , ε_y de la matriz de deformación se conocen con el nombre de desplazamientos longitudinales; por otra parte el término γ_{xy} se llama desplazamientos transversales.

3.1.1 Deformaciones Longitudinales

Sea el vector $d\vec{r}_0 = (dx, dy)$ en el punto P supongamos que para determinado estado tensorial la matriz de deformación vale:

$$[D] = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 \\ 0 & \varepsilon_y \end{pmatrix} \text{ Y que } [H] = 0 \text{ Nula} \quad (3.11)$$

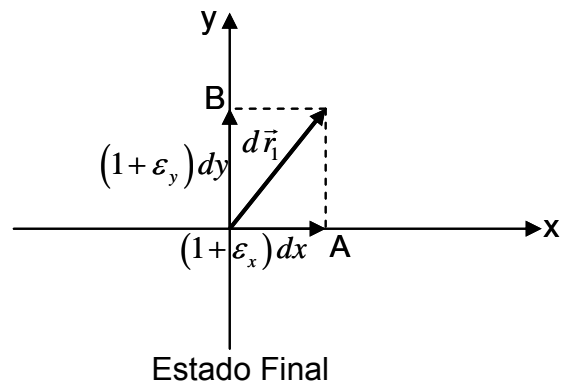
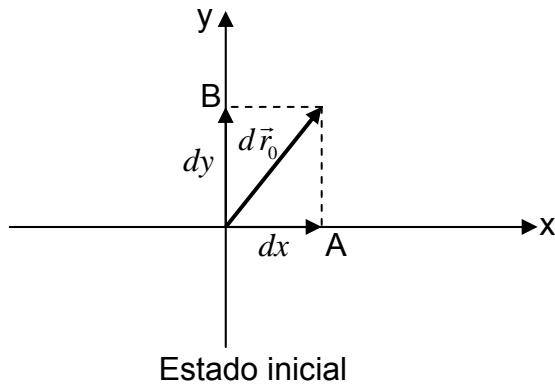
De acuerdo con lo anterior, la transformación del vector $d\vec{r}_0$ durante el proceso de aplicación de las ecuaciones será:

$$d\vec{r}_1 = d\vec{r}_0 + [D]d\vec{r}_0 \quad (3.12)$$

$$d\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 \\ 0 & \varepsilon_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}$$

$$d\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x dx \\ \varepsilon_y dy \end{pmatrix}$$

$$d\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} (1 + \varepsilon_x) dx \\ (1 + \varepsilon_y) dy \end{pmatrix} \quad (3.13)$$



Es decir las componentes de la diagonal principal $[D]$ producen el estiramiento de las longitudes según los ejes x e y respectivamente. Una longitud inicial dx pasa a ser la transformación, de $(1 + \epsilon_x)dx$. ϵ_x tiene el significado físico de alargamiento por unidad de longitud en el punto P en la dirección x .

Donde ϵ_x es una magnitud adimensional, como el resto de las componentes de $[D]$. El sentido físico de ϵ_y es el mismo referido al eje y .

3.1.2 Deformaciones Transversales

Sea ahora un estado tensional en el que la matriz de deformación vale:

$$[D] = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2}\gamma_{xy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & 0 \end{pmatrix} \text{ Y que } [H] = 0 \text{ Nula} \quad (3.14)$$

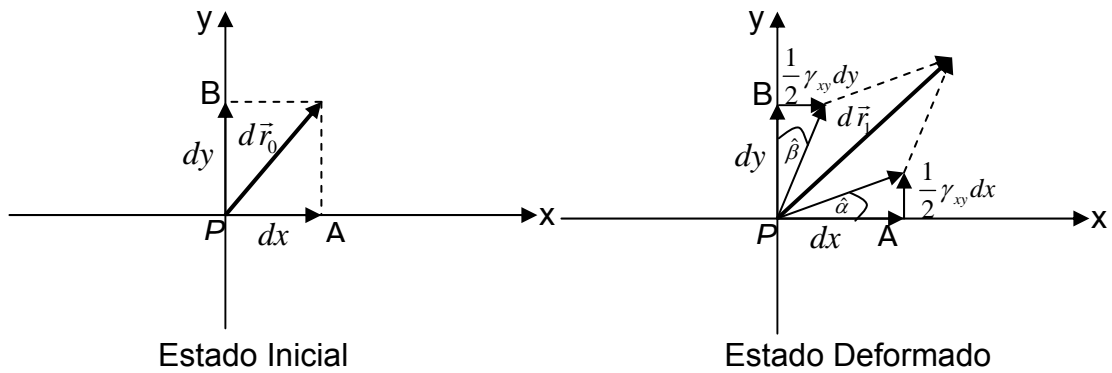
En este caso la transformación del vector $d\vec{r}_0$ durante el proceso de la aplicación de las acciones exteriores será

$$d\vec{r}_1 = d\vec{r}_0 + [D]d\vec{r}_0$$

$$d\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2}\gamma_{xy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}$$

$$d\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\gamma_{xy}dy \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy}dx \end{pmatrix}$$

Es decir el vector $(dx, 0)$ se transforma en el vector $\left(dx, \left(\frac{1}{2}\gamma_{xy}\right)dx\right)$; y el vector $(0, dy)$ se transforma en el vector $\left(\left(\frac{1}{2}\gamma_{xy}\right)dy, dy\right)$



Si las deformaciones son pequeñas se cumple que

$$\tan(\hat{\alpha}) = \frac{\frac{1}{2}\gamma_{xy}dx}{dx} = \frac{1}{2}\gamma_{xy} \approx \hat{\alpha} \tag{3.15}$$

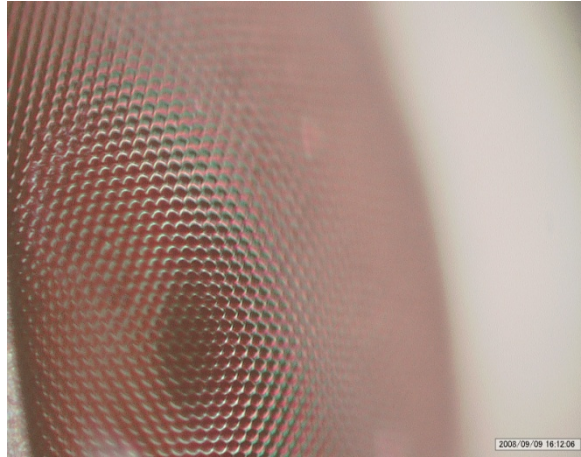
$$\tan(\hat{\beta}) = \frac{\frac{1}{2}\gamma_{xy}dy}{dy} = \frac{1}{2}\gamma_{xy} \approx \hat{\beta} \tag{3.16}$$

$\gamma_{xy} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} = \text{Distorsión del ángulo } \square ABP$

Como las deformaciones son pequeñas el ángulo $\hat{\alpha}$ es muy pequeño y en consecuencia la longitud del vector $(dx, 0)$ es prácticamente la misma que el vector

$\left(dx, \frac{1}{2}\gamma_{xy}dx\right)$. Por lo tanto la componente γ_{xy} No produce acortamiento o estiramiento en el material únicamente produce distorsión angular.

4. OJOS COMPUESTOS



En el presente capítulo, se hace una descripción de la estructura del ojo de los insectos, haciendo énfasis en el de la mosca; aspecto fundamental a tener en cuenta para la reconstrucción respectiva de la superficie externa del ojo de la mosca.

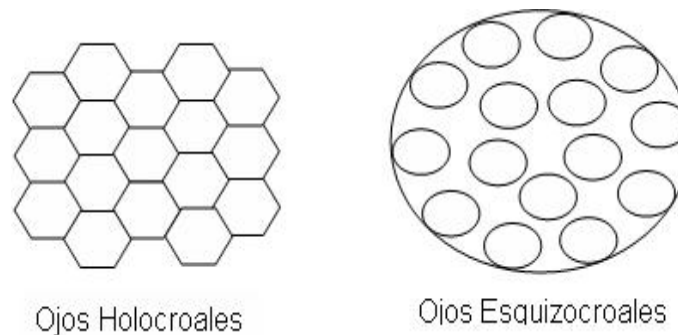
Para el caso del ojo de la mosca, resulta necesario tener una apreciación sobre la estructura del ojo de un insecto y algunos de los tipos de ojos según su forma de vida; resaltando que el de la mosca representa un ojo de aposición. Por tal motivo el presente capítulo se describe de forma sencilla alguno de estos aspectos.

Los ojos compuestos como una forma de órganos de la visión, se presentan en los insectos y algunos crustáceos. En el caso de los insectos adultos y los inmaduros activos, tanto terrestres como acuáticos, los ojos compuestos son los más difundidos como órganos de visión principal.

Estos tipos de ojos, tiene una denominación, debido a que están conformados por una diversidad de dispositivos individuales llamados omatidios (del latín

ommatidium que significa ojito), fruto del proceso de evolución y adaptación del sistema de visión de los insectos, cuyos ojos son compuestos, condicionados por la actividad y estilo de vida , trayendo c como resultado una estructura que permite ser agrupada en dos tipos de ojos: los de apposicion(del latin appositus que significa vecinos cercanos) y de superposición.^{20 21 22}.

Figura. 4.1 Ojos compuestos (Holocroales y Esquizocroales)



Por otra parte los ojos compuestos pueden ser holocroales, esquizocroales y abatocroales, en los primeros las facetas están relativamente cerca una de otra y en la mayoría de los casos adoptan la forma de hexágonos; en los ojos esquizocroales las facetas están más separadas y tienden a adoptar la forma de círculos²³, así como se muestra en la figura 4.1.

Los ojos de aposición se presentan en los insectos de vida diurna, en un gran porcentaje en la mayoría de los casos; la característica de este tipo de ojos, radica en que la imagen que se forma al interior de cada ommatidio no se sobrepone con la de los vecinos debido a las células pigmentadas que presentan los límites de cada uno de estos; caso contrario a lo que sucede con los ojos compuestos de los

²⁰ GILOT, C. Entomology. (Third Edoition),University of Saskatchewan. Canada. 2005

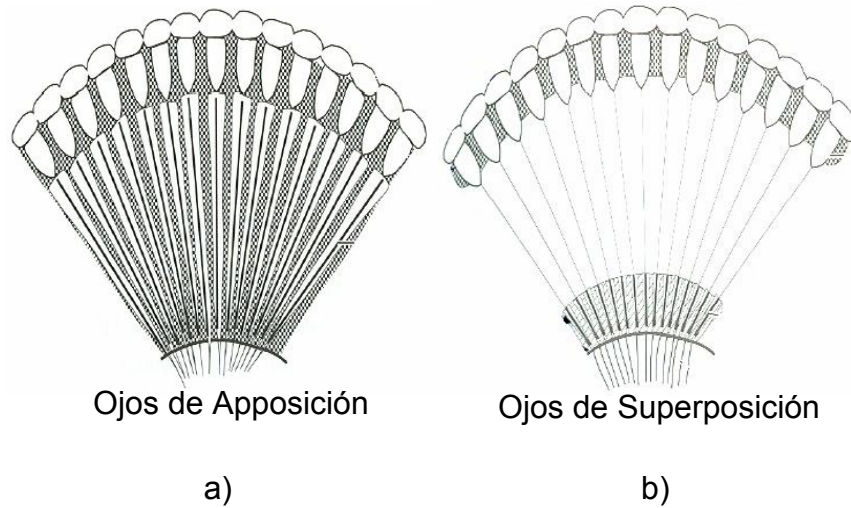
²¹ DALEN, W. Anatomía y fisiología de Insectos: Sensorios. Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú. Dugesiana versión 0.1.I17

²² DALEN, W. Anatomía y fisiología de Insectos: Sensorios, Dugesiana versión 0.1.T17

²³ LARA CAÑABERAS, Ricardo, *et al.* Modelización Primaria de la Estructura Interna del Ojo de los Trilobites: Universidad de Guadalajara. Dugesiana 11(2):1-18. México. 2004

insectos nocturnos (ojos de superposición) en los cuales las imágenes que se forman en cada omatidio se sobreponen. En la figura 4.2 muestran los ojos compuestos, de Apposición y los de Superposición.

Figura. 4.2 a) Ojos de visión diurna (Apposición) b) Ojos visión nocturna (Superposición)



Tomado de: DALEN, W

En la mayoría de los ojos de apposición la refracción más importante ocurre cuando la luz, transmitida en el aire, entra en la cornea cambiando su ángulo. En estos ojos los omatidios son cuasi independientes debido a que están ópticamente separados uno de los demás por el pigmento dentro de las células pigmentadas primarias y secundarias; cada omatidio produce así una imagen invertida (debido a la lente biconvexa de la cornea). La luz que llega a cada omatidio en un ojo compuesto es diferente debido a que estos están ubicados en una semiesfera y el ángulo de incidencia de la luz proveniente de una misma fuente cambia. De forma colectiva los Rhabdom de los diferentes omatidios perciben un mosaico que, en conjunto conforman la imagen del objeto percibido.

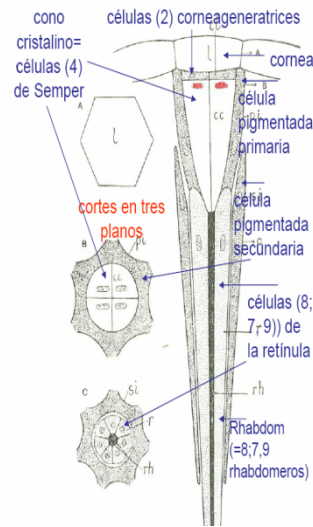
La imagen formada es invertida debido a que los lentes son biconvexos y tienen un solo índice de refracción²⁴.

²⁴ DALEN, W. Op. cit. Dugesiana versión 0.1.T17

Ahora bien; en los ojos de superposición, los ommatidios no son entidades ópticas independientes, debido a la existencia de la llamada zona clara carente de pigmentos. Ello hace que la imagen que se propaga por la cornea y el cono cristalino no solo llega a un Rhabdom sino al conjunto de rhabdomes en una imagen integrada. Estos ojos forman una imagen derecha, no invertida, interna en el sistema de lentes que poseen diferentes índices de refracción²⁵²⁶.

En la figura 4.3 se muestra un esquema de un ommatidio de un ojo de aposición.

Figura. 4.3 Esquema de un ommatidio de un ojo de aposición



Tomado de: DALEN, W

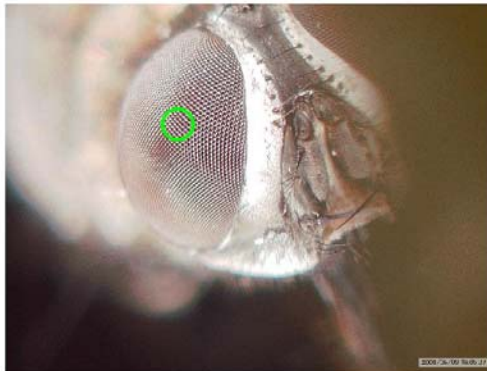
²⁵ RANDALL, D, BURGGREN, W and FRERICH, K. Fisiología Animal. Madrid. 1997. p. 277

²⁶ DALEN, W. Op. cit. Dugesiana versión 0.1.T17

5. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

En el presente capítulo se muestra el análisis respectivo de los datos que se obtienen con el microscopio con el objetivo interferométrico Mirau, los procedimientos implementados para extraer la información que permitió realizar la reconstrucción de la topografía de la superficie del ojo compuesto de la mosca y el posterior estudio de su dinámica. Inicialmente se reconstruyen los omatidios de una mosca. Teniendo en cuenta que las moscas son insectos diurnos (en el mayor de los casos) con ojos de aposición compuesto por una diversidad de omatidios así como se indica en la figura 5.1; esta imagen se adquirió con un microscopio cofocal, que se encuentra en el laboratorio de biomateriales de la Universidad Industrial de Santander.

Figura. 5.1 Imagen del ojo de una mosca casera



Posteriormente se adquirió el vídeo, a partir del cual se analizaron las variaciones de las franjas interferométricas, para poder tener una apreciación de la dinámica del ojo de la mosca.

5.1 RECONSTRUCCIÓN DE LAS FACETAS DEL OJO DE LA MOSCA

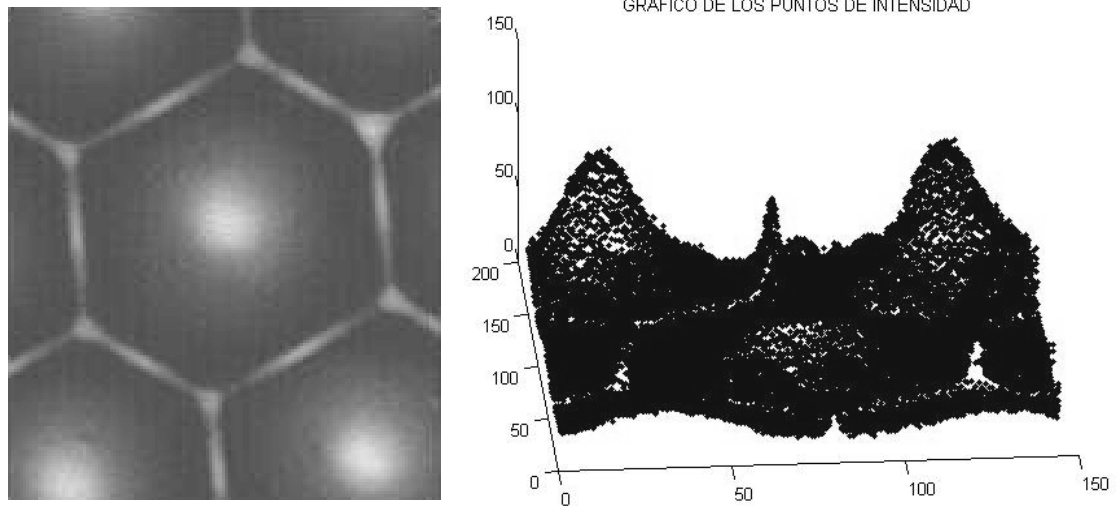
Utilizando el objetivo interferométrico, tipo Mirau, y el sistema de adquisición respectivo; se capturan las imágenes a través del software implementado, realizando el procesamiento respectivo para reconstruir las facetas que se iluminan; las mediciones se realizan en regiones donde la geometría tiende a ser homogénea, a modo de ejemplo, en la figura 5.1 se resalta una región.

En este caso se implementa el método de Detección de Máximos para la reconstrucción, debido a que el método de Phase-Shifting presentó discontinuidades que no existen debido a las variaciones mayores a $\frac{\lambda}{2}$ sobre la superficie del ojo de la mosca.

Recordando el método de Detección de Máximos descrito en el capítulo 2, se obtienen dos imágenes de una que presenta las intensidades de los puntos y otra que guarda la información sobre las coordenadas de dichos puntos presentando información sobre la topografía de la muestra. El software que se utilizó esta diseñado en lenguaje C, la distancia inter-píxel para los ejes x e y fue de 0.83 micras y el factor en z fue de 0.013 micras.

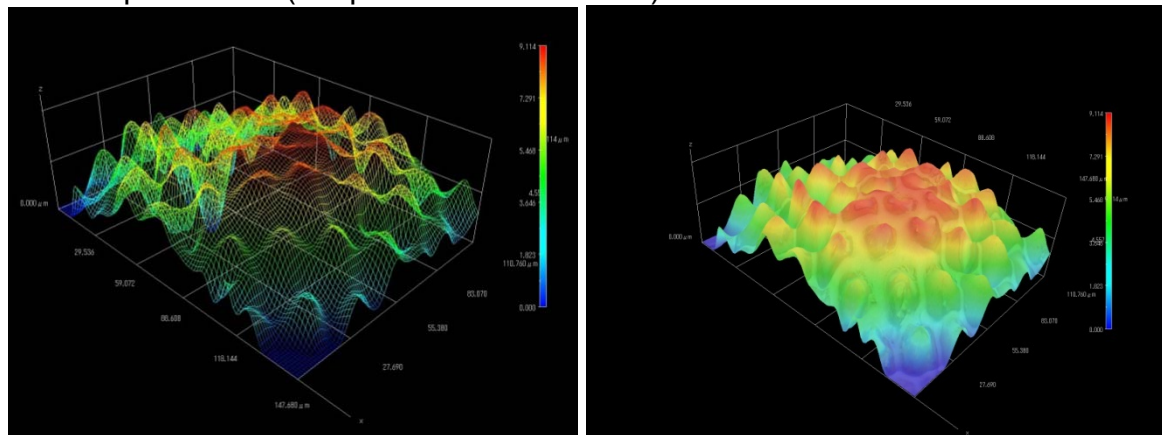
En la figura 5.2 se muestra la imagen de 166 X 144 pixeles de los niveles de intensidad del ojo de una mosca casera (fly house) y la respectiva grafica de los puntos. Esta imagen es adquirida por la cámara CCD a medida que se realizan desplazamientos axiales con el piezo-eléctrico; la intensidad en cada punto se registra cuando se logra el contacto óptico para dicho punto; en la imagen de intensidades se aprecia la geometría y la textura de las facetas.

Figura. 5.2 (a) Imagen de intensidad (b) grafico de los puntos de intensidad



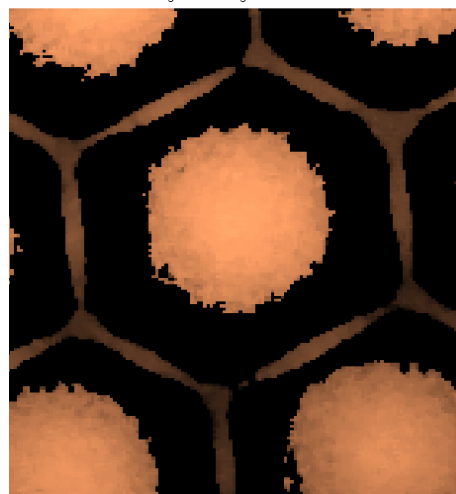
Una imagen de la estructura del ojo de una mosca, se obtuvo con el microscopio confocal, en esta se aprecia, aproximadamente, la geometría que tienen los ommatidios en el ojo, esta se muestra en la figura 5.3. Resaltando que en la parte superior hay deformación debido algún tipo de accidente en la manipulación de la muestra en ese instante.

Figura. 5.3 Imagen del ojo de una mosca casera (Fly House) obtenida con el microscopio confocal (Grupo Biomateriales UIS)



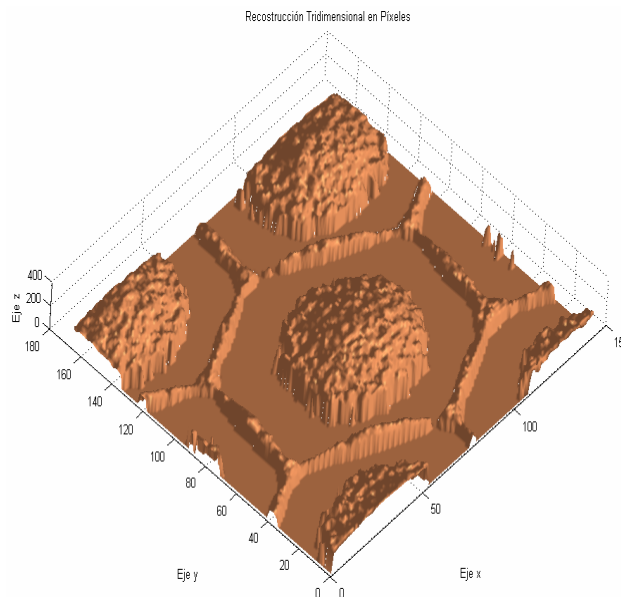
Como las imágenes de intensidades no brindan información de la topografía de la región en estudio se tienen en cuenta las imágenes de rango obtenidas con las cuales se encuentra presente dicha información, mostrándose en la figura 5.4 dicha imagen.

Figura. 5.4 Imagen de rango de la región iluminada



Y en la figura 5.5 la reconstrucción tridimensional en píxeles de la imagen anterior

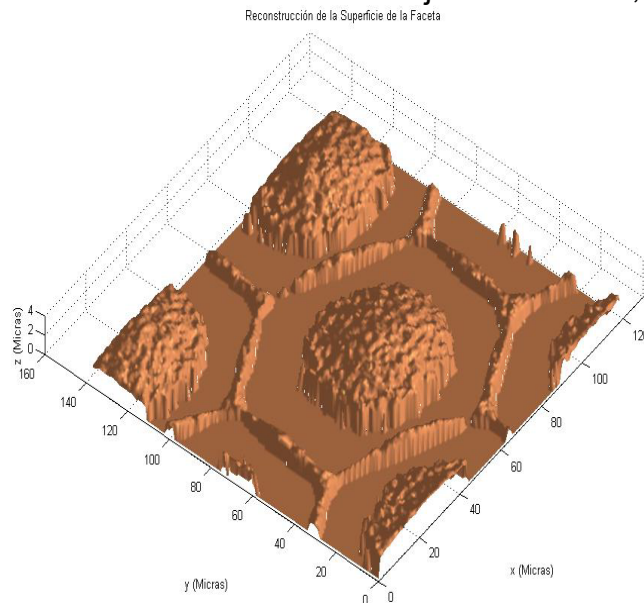
Figura. 5.5 Reconstrucción tridimensional de la faceta en píxeles



La conversión de píxeles a micras se hace teniendo en cuenta la calibración del equipo utilizado con los que se obtienen los valores de las distancias interpixel y el factor en z, los cuales se conocen en este caso. En este se tiene que para la escala en z el factor de conversión es de $0.013\mu\text{m}$, mientras que para las distancias interpixel de los ejes x e y fue de $0.83\mu\text{m}$.

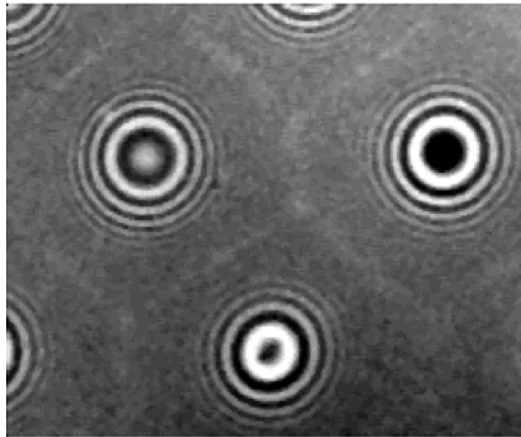
Teniendo en cuenta dichos valores se obtiene la imagen panorámica de la reconstrucción tridimensional, en micras, de la faceta y cornea del ojo de la mosca que se utilizó como muestra, así como se indica en la figura 5.6

Figura. 5.6 Reconstrucción 3D de la faceta del ojo de la mosca, dada en Micras

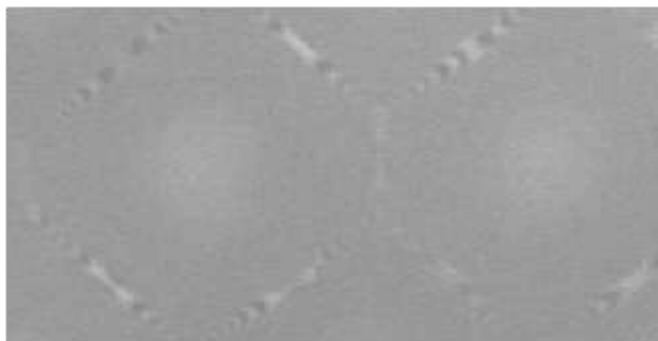


Debido a la geometría que presenta la cornea del ojo en cada omatidio, las franjas interferométricas se generan en ciertas regiones de la superficie de la cornea y no logran barrerla, por decirlo así, en toda su extensión; así en la figura 5.7 se muestran las imágenes de las franjas interferométricas sobre la superficie de la cornea y las facetas respectivamente. En la figura 5.6 (b) las franjas sólo se tienen en la región que delimita los omatidios vecinos.

Figura. 5.7 (a) Franjas sobre la región de la cornea (b) Franjas sobre las facetas



(a)



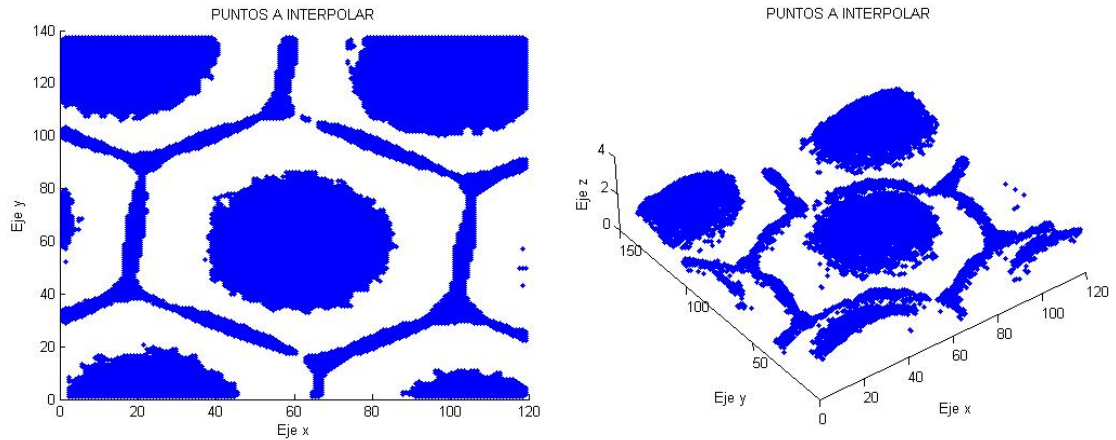
(b)

Lo expresado anteriormente, implica que en el proceso de reconstrucción no se tenga información de las regiones donde se presenta este fenómeno. Por el cual en las figuras 5.4 y 5.6 se aprecie el espacio entre los límites de las facetas y la parte superior de la cornea que logra reconstruirse.

De las imágenes de rango se toman los puntos que presentan información de la topografía de la muestra y se realiza la respectiva interpolación, en este caso

interpolación cúbica, para obtener la curva aproximada de la superficie del ojo. En la figura 5.8 se tiene la grafica de dichos puntos²⁷.

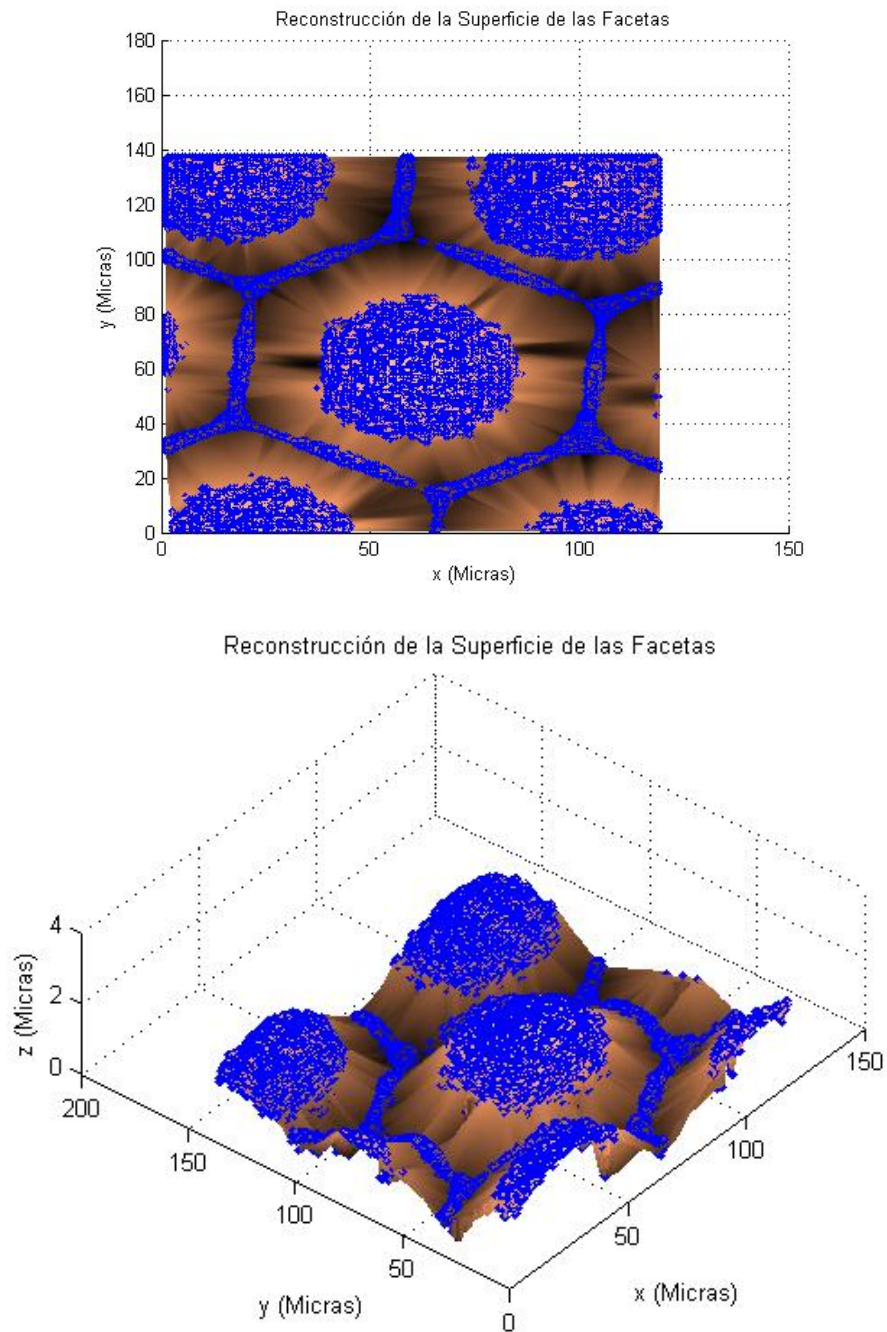
Figura. 5.8 Puntos a interpolar



En la figura 5.9 se tienen, desde una vista superior y tridimensional, de los puntos la respectiva interpolación.

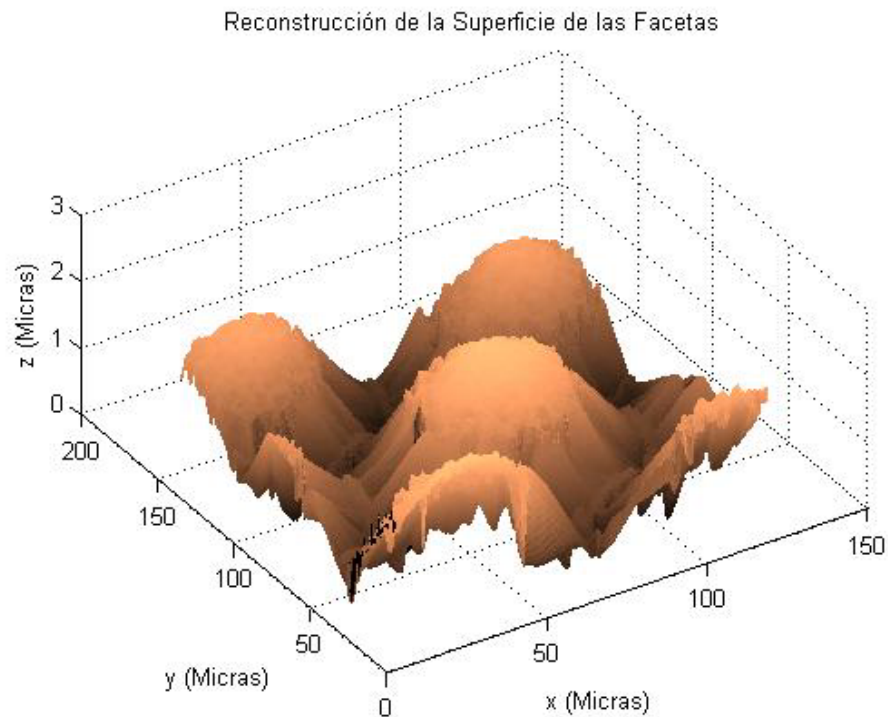
²⁷ GONZALEZ, R, WOODS, R and EDDINS, S. Digital Image Processing Using Matlab.

Figura. 5.9 Interpolación de los puntos



En las dos primeras imágenes se tiene la perspectiva superior y lateral e la reconstrucción, resaltando en color azul los puntos que se tomaron para la interpolación.

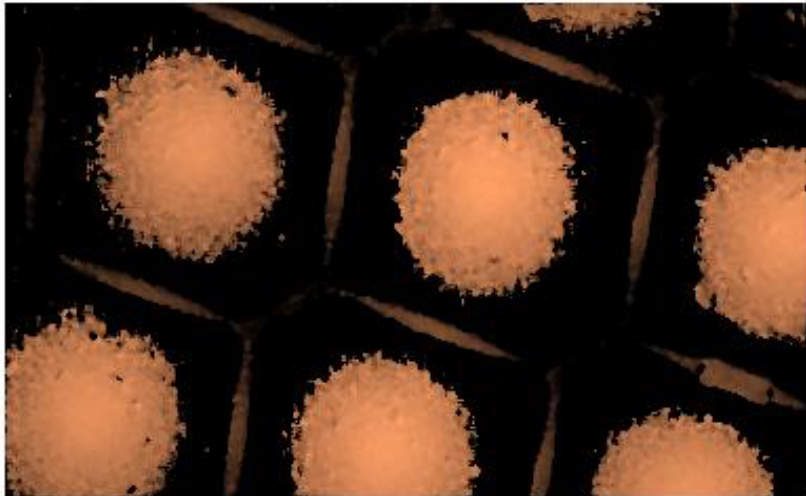
Figura. 5.10 Reconstrucción tridimensional de la superficie del ojo de la mosca



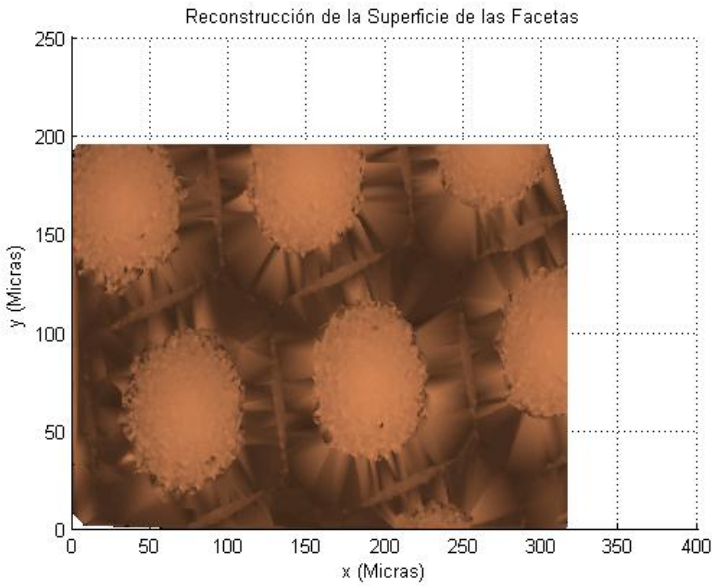
En la figura anterior se tiene la reconstrucción de la superficie del ojo de la mosca; en las imágenes que siguen se muestran las reconstrucciones de las facetas en muestras diferentes y la respectiva reconstrucción utilizando el método de interpolación antes mencionados.

En la Figura 5.11 se indica la reconstrucción de las facetas de diferentes muestras

Figura. 5.11 Reconstrucción de las facetas en diferentes muestras utilizando el método de interpolación

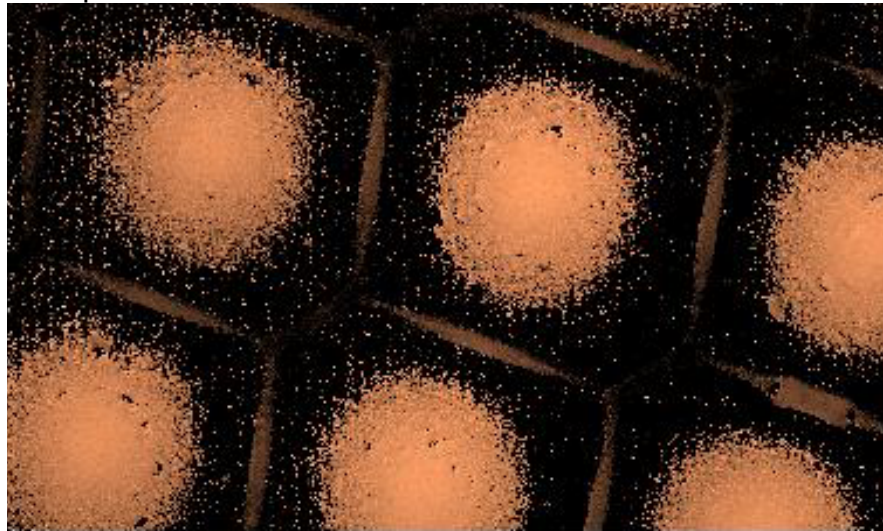


a)



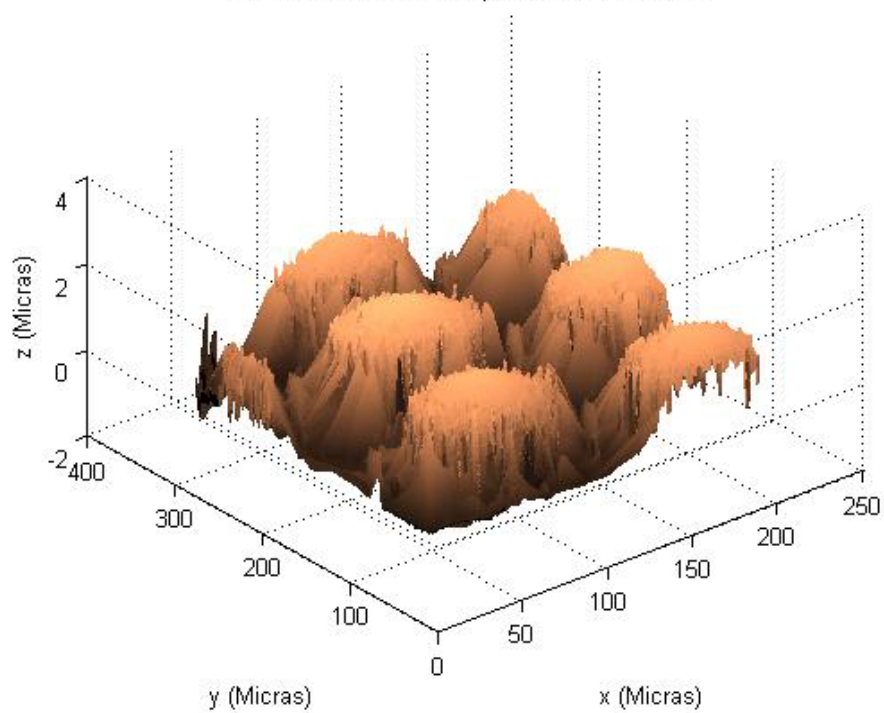
b)

Figura. 5.11 Reconstrucción de las facetas en diferentes muestras utilizando el método de interpolación



c)

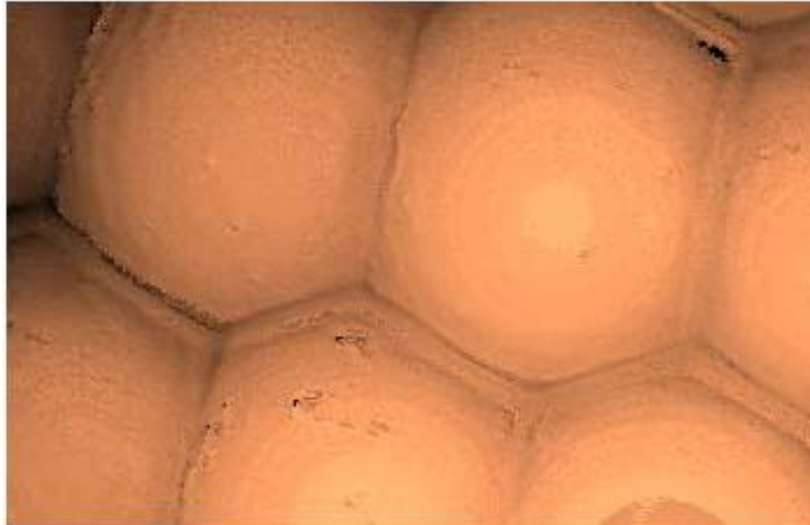
Reconstrucción de la Superficie de las Facetas



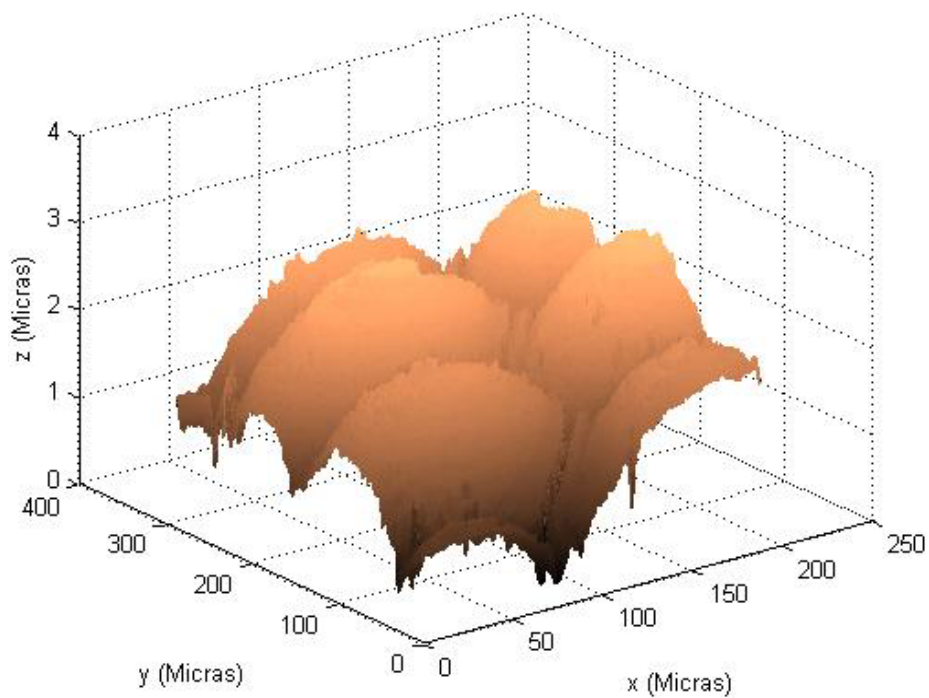
d)

Realizando la reconstrucción una región del ojo de una libélula se puede tener una apreciación de la estructura superficial entre los ojos de la mosca y el de la libélula.

Figura. 5.12 Reconstrucción de las facetas de una libélula (odonato)



Reconstrucción de la Superficie de las Facetas

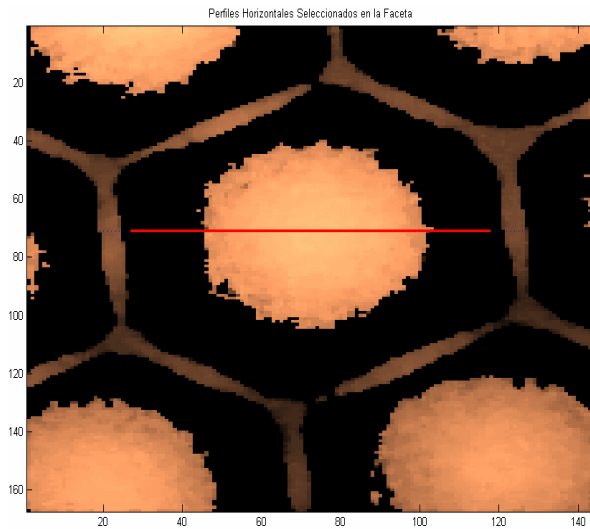


La figura 5.12 representa la reconstrucción de las facetas del ojo de una libélula; a pesar de representar ojos de apposición los ojos de la libélula presenta una geometría diferente al ojo de la mosca.

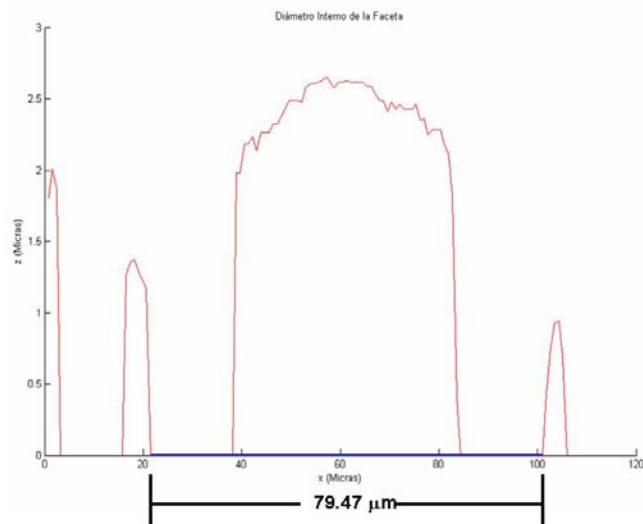
Realizando un corte horizontal de la imagen de la figura 5.4 se tiene el perfil de dicho corte con el cual se pueden obtener valores sobre el diámetro interno de la faceta y de la altura del omatidio respecto a la base de las facetas.

En la figura 5.13 a) se indica la región del corte y en b) el perfil respectivamente.

Figura. 5.13 a) Perfil seleccionado de la Faceta b) Diámetro interno de la faceta del perfil seleccionado



a)



b)

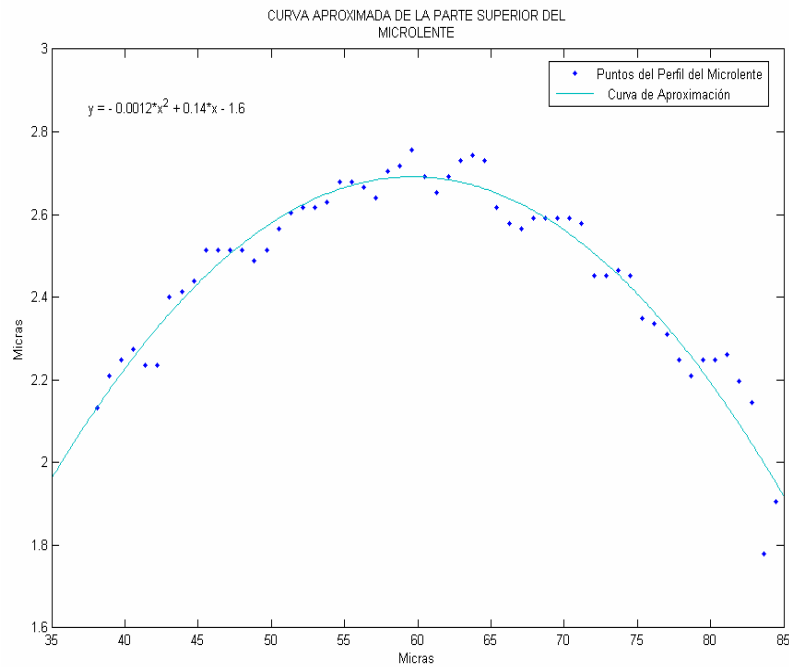
Tomando doce valores de las alturas de los puntos más altos sobre la cornea del perfil seleccionado se determinad, en este caso, que la altura de la cornea a lo largo de dicho perfil, fue de $2.62 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$. los valores de las alturas de los puntos seleccionados se dan en la tabla que sigue.

Tabla 5.1 Alturas del lente corneo

Alturas (μm)	2,59	2,62	2,62	2,62	2,62	2,63	2,62	2,58	2,62	2,65	2,63
---------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Por otra parte; la aproximación de la curvatura en la parte superior de la cornea se realiza teniendo en cuenta los puntos de la parte superior del perfil, esta aproximación se muestra en la figura 5.14

Figura. 5.14 Curva aproximada de la parte superior del micro lente



5.2 ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL OJO DE LA MOSCA

En esta sesión se presenta el análisis al movimiento del ojo de la mosca; caracterizando las variaciones de las franjas interferométricas que se tienen en un video adquirido con la cámara CCD, que hace parte del dispositivo óptico utilizado. Es de advertir que en esta parte no fue necesario utilizar el sistema piezo-eléctrico, debido a que el insecto de muestra se encontraba vivo.

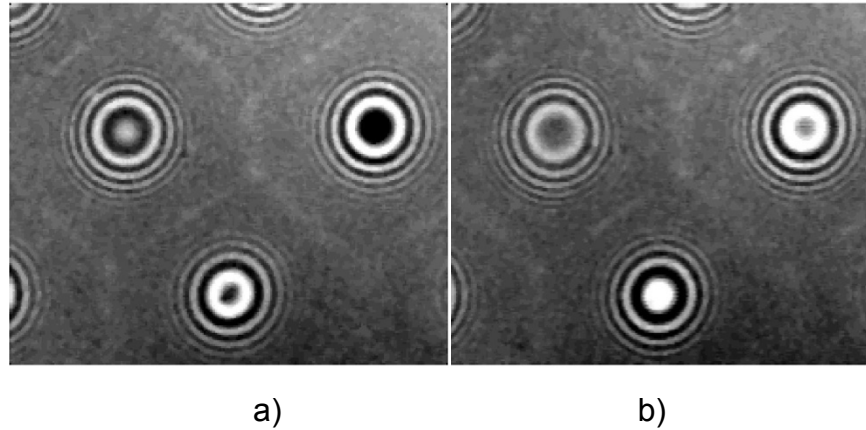
Utilizando el objetivo interferométrico Mirau de 50X, la adquisición del video se hace a 25 cuadro por segundo (cps), el tiempo de exposición de la muestra y del video respectivamente es de 5 a 10 segundos aproximadamente.

5.2.1 Variaciones de las Franjas Interferométricas

El tratamiento de las imágenes para analizar las variaciones se realiza cuadro a cuadro, escogiendo un intervalo de tiempo en el video adquirido donde se apreciaron variaciones de las franjas a lo largo de la secuencia de las imágenes en éste intervalo. Vale la pena resaltar que para eso se tomo una región del ojo de la mosca, donde estuvieron tres omatidios, para poder hacerle el seguimiento a los desplazamientos relativos de uno de ellos y al mismo tiempo poder hacerle también el seguimiento a la variación de las franjas interferométricas de estructura de anillos concéntricos en éste omatidio.

Se empezó el análisis al video denominado "Capture-006" en el intervalo de tiempo comprendido desde 0.48 a los 9 segundos, en el cual se aprecia el movimiento del ojo. En la figura 5.15 se muestran dos imágenes de los cuadros y el tamaño de estos en el vídeo analizado.

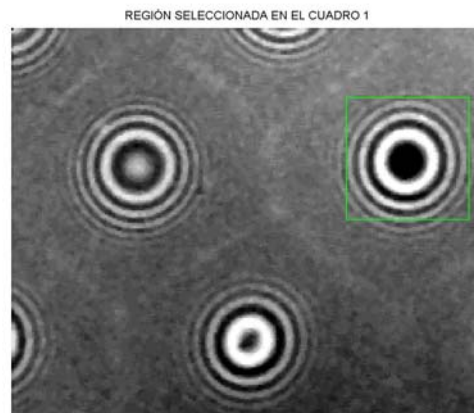
Figura. 5.15 Imágenes consecutivas donde se aprecian las variaciones de las franjas interferométricas, el tamaño de los cuadros es de 192X232 píxeles



En las imágenes que se obtiene se observan las franjas interferométricas sobre tres omatidios; por la geometría del ojo las franjas tienden a adoptar una forma circular y diferente en cada uno, características que se presenta por la diferencia de altura entre los omatidios, al comparar los cuadros sucesivos, se logra apreciar las variaciones de las franjas de uno a otro en cada una de las regiones, cerrándose en este caso.

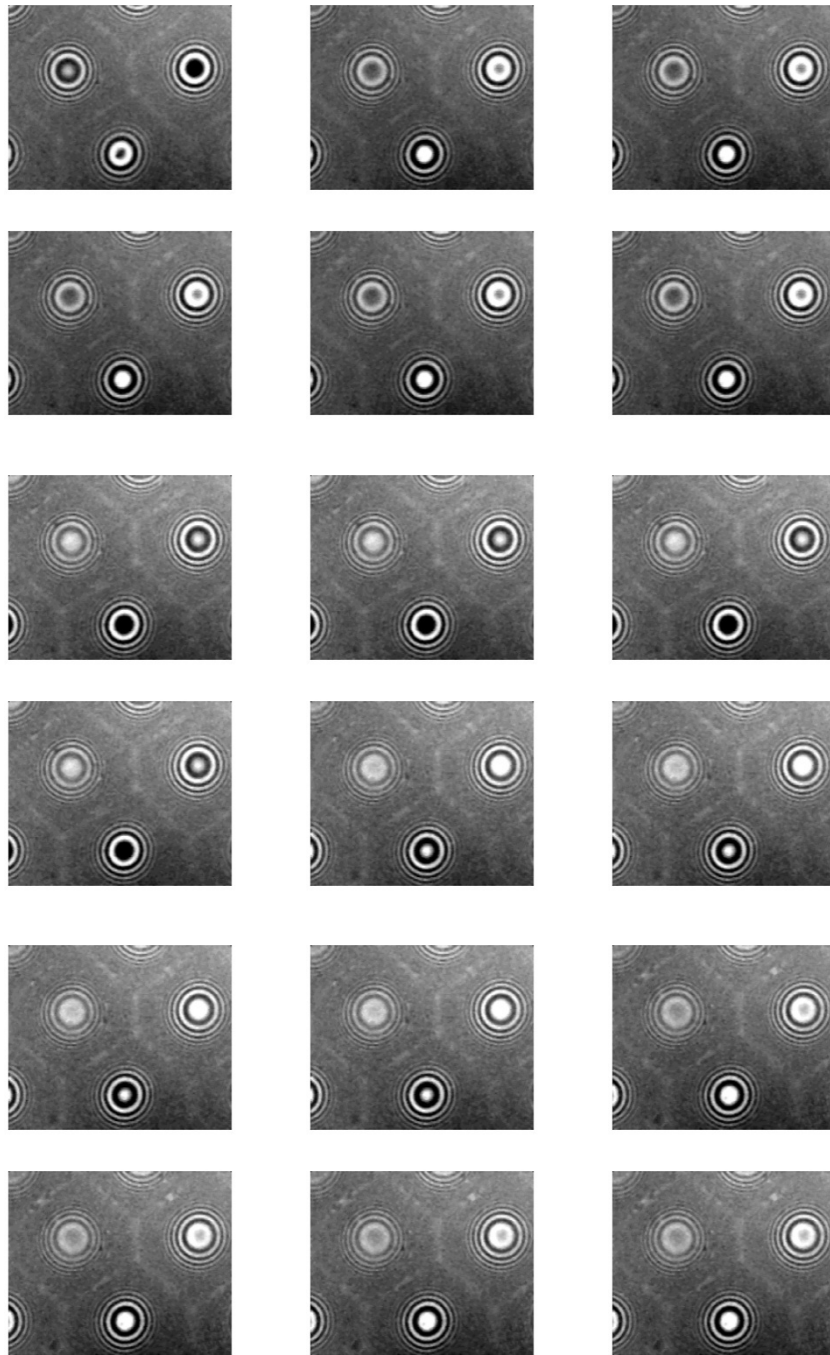
Se escogió una región específica y se analizaron las variaciones a medida que transcurre el tiempo, indicándose ésta en la figura 5.16.

Figura. 5.16 Región seleccionada, para analizar las variaciones en las franjas interferométricas a lo largo del video



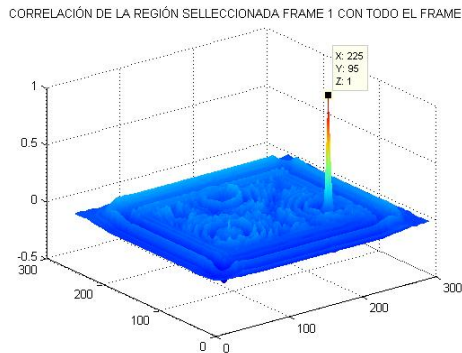
En la figura 5.17 se presenta parte de la secuencia de video analizado, para tener una apreciación de la variación de las franjas interferométricas en la secuencia.

Figura. 5.17 Imágenes consecutivas en la secuencia del video analizado



La auto correlación de la región seleccionada con el primer cuadro, figura 5.16, brinda la posibilidad de detectar las coordenadas del centro de ésta imagen, indicándose esta autocorrelación en la figura 5.18; en este caso las coordenadas en x e y respectivamente son (225,95) con las que se encuentra el valor de la intensidad.

Figura. 5.18 Auto correlación de la región seleccionada con el primer cuadro

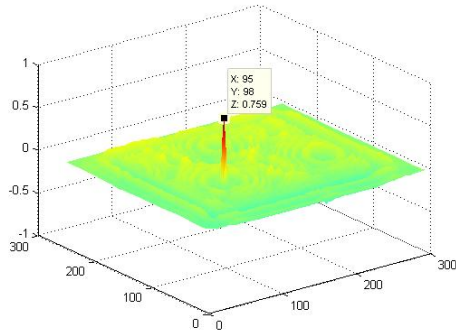


En la secuencia de las imágenes se tienen instantes en los que el ojo se mueve y se detiene, por ende las franjas varían en estos intervalos de tiempo y en otros permanecen constantes, determinándose que éstas se abren y cierran de forma a lo largo de la secuencia. Este abrir o cerrar de las franjas advierte que se presenta un descenso y un ascenso de la superficie del ojo.

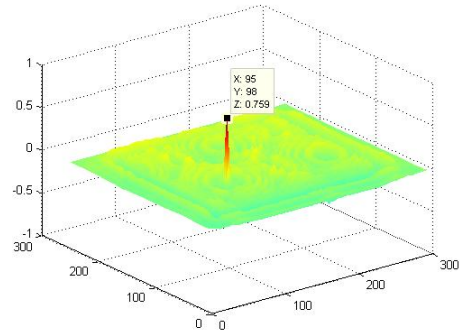
Teniendo en cuenta la región seleccionada en el primer cuadro, figura 5.16, se realizan correlaciones de ésta las imágenes consecutivas, algunas de las correlaciones que se muestran en la figura 5.19 a) y b) según el orden de la secuencia en el video.

Figura. 5.19 Correlaciones de la región seleccionada con las imágenes consecutivas en el video

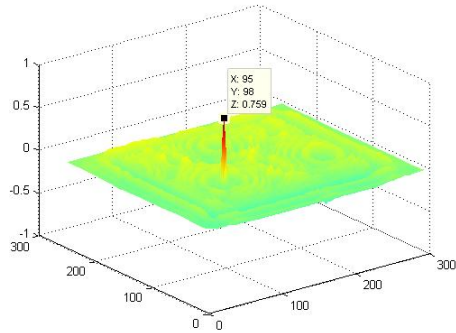
CORRELACIÓN DE LA REGIÓN SELLECCIONADA CUADRO 1 CON TODO EL CUADRO 2



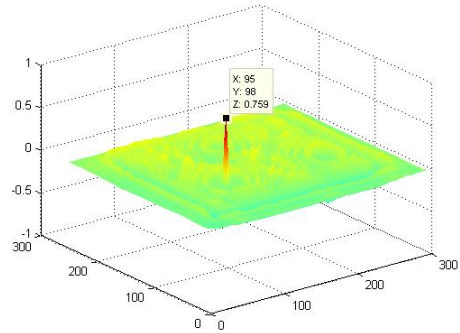
CORRELACIÓN DE LA REGIÓN SELLECCIONADA CUADRO 1 CON TODO EL CUADRO 3



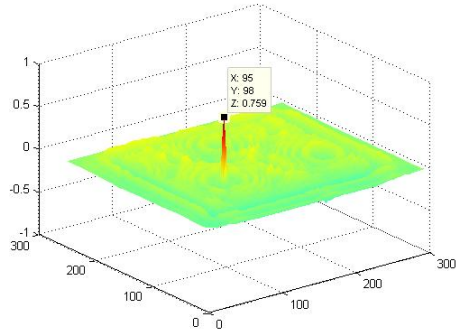
CORRELACIÓN DE LA REGIÓN SELLECCIONADA CUADRO 1 CON TODO EL CUADRO 4



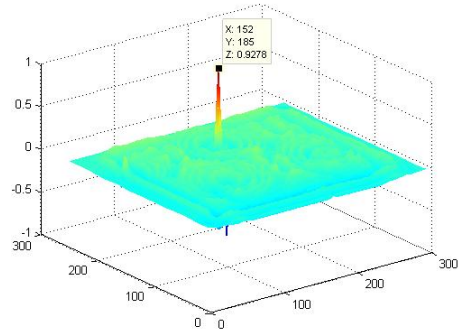
CORRELACIÓN DE LA REGIÓN SELLECCIONADA CUADRO 1 CON TODO EL CUADRO 5



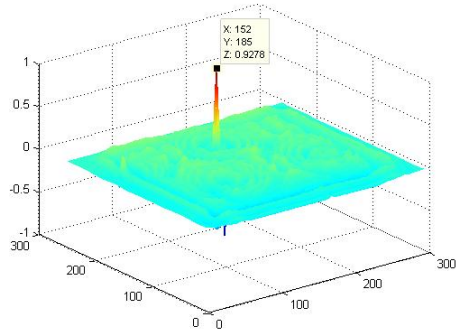
CORRELACIÓN DE LA REGIÓN SELLECCIONADA CUADRO 1 CON TODO EL CUADRO 6



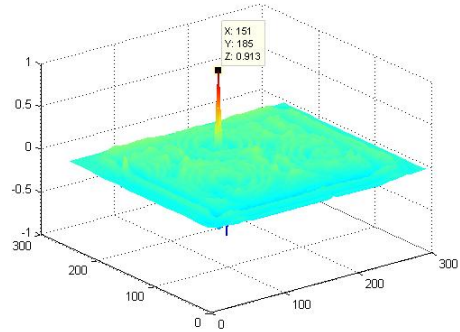
CORRELACIÓN DE LA REGIÓN SELLECCIONADA CUADRO 1 CON TODO EL CUADRO 7



CORRELACIÓN DE LA REGIÓN SELLECCIONADA CUADRO 1 CON TODO EL CUADRO 8

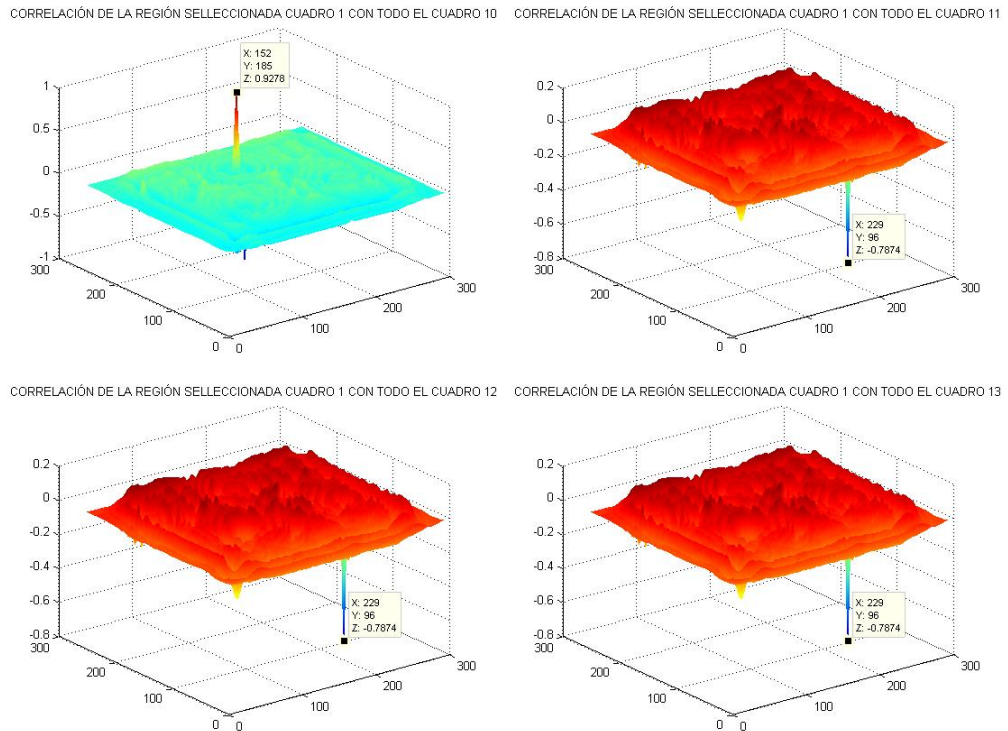


CORRELACIÓN DE LA REGIÓN SELLECCIONADA CUADRO 1 CON TODO EL CUADRO 9



a)

Figura. 5.19 Correlaciones de la región seleccionada con las imágenes consecutivas en el video



b)

El cambio en las graficas de correlación también advierte los posibles ascensos o descensos en la superficie, las coordenadas en cada pico de correlación dan una aproximación al desplazamiento que se tiene en cada imagen. La aparición de más de un pico en estas imágenes implica la similitud entre los pixeles de las regiones seleccionada con las demás regiones, lo cual puede presentar ambigüedades en las medidas.

Para tratar de evitar este tipo de inconveniente, se binarizan las imágenes y se toma como referencia una franja interferométrica a la cual se le realizó el seguimiento de la variación de ésta en la secuencia. En la figura 5.20 (a) se muestra la imagen binarizada del primer cuadro, la región y la franja a realizar el seguimiento; y en (b) la respectiva franja seleccionada.

Figura. 5.20 (a) Binarización del cuadro 1 (b) Franja seleccionada en el cuadro 1



(a)

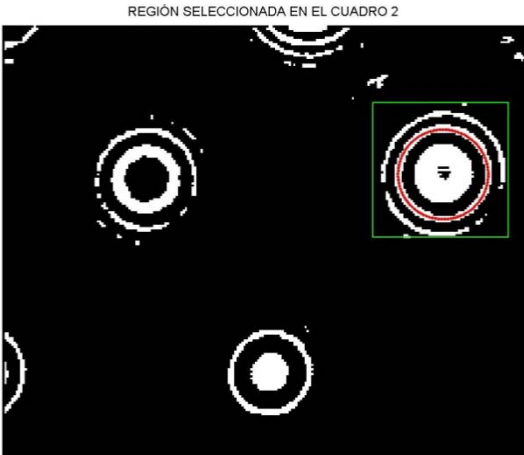
FRANJA INTERFEROMÉTRICA EN EL FRAME 1



(b)

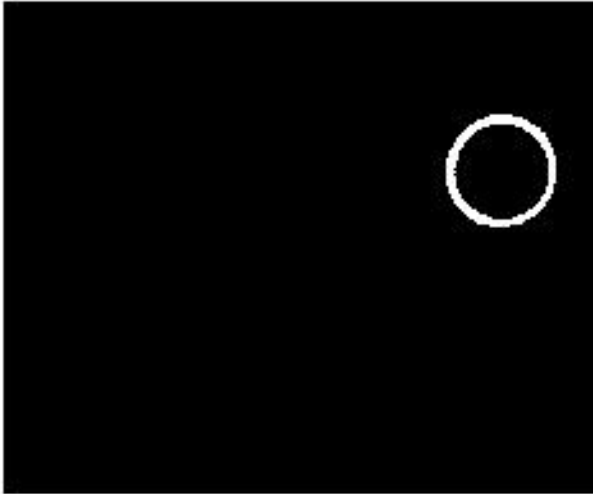
De forma similar para la siguiente imagen se determina la franja, indicada en la figura 5.21.

Figura. 5.21 (a) Binarización del cuadro 2 (b) franja seleccionada en la segunda imagen



(a)

FRANJA INTERFEROMÉTRICA EN EL FRAME 2



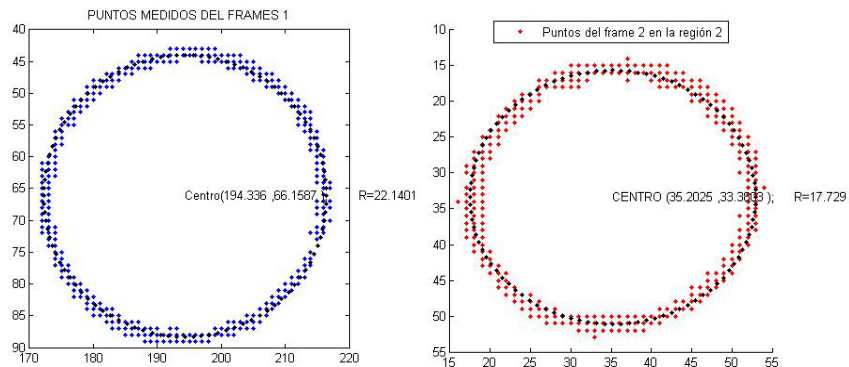
(b)

Figura. 5.22 superposición de las franjas en los cuadros sucesivos 1 y 2
FRAME 1 Y 2



En la figura 5.22 se tiene la superposición de las imágenes consecutivas, en la cual se observa la variación de la franja del primer cuadro al segundo; se realiza una aproximación circular con los puntos de las imágenes y se determina el radio y centro a cada una respectivamente, la representación de las aproximaciones se muestra en la figura 5.23.

Figura. 5.23 a) Aproximación circular de la primera franja b) aproximación circular de la segunda franja.



Teniendo en cuenta los valores de los radios se determinó, en este caso, que las franjas se desplazan 4 píxeles aproximadamente.

Al analizar los cuadros siguientes se identifica que del 2 al 6 cuadro no se aprecia variación en las franjas; cuando se llega a la imagen 7 se tiene cambio en las franjas, hasta este instante de la exposición de la mosca bajo el microscopio, las franjas se cierran, con lo cual se puede decir que el movimiento hasta este momento era descendente; el cuadro 2 y el 7 superpuestos, se indica la figura 5.24.

Figura. 5.24 Variaciones de las franjas del imagen 2 a la imagen 7

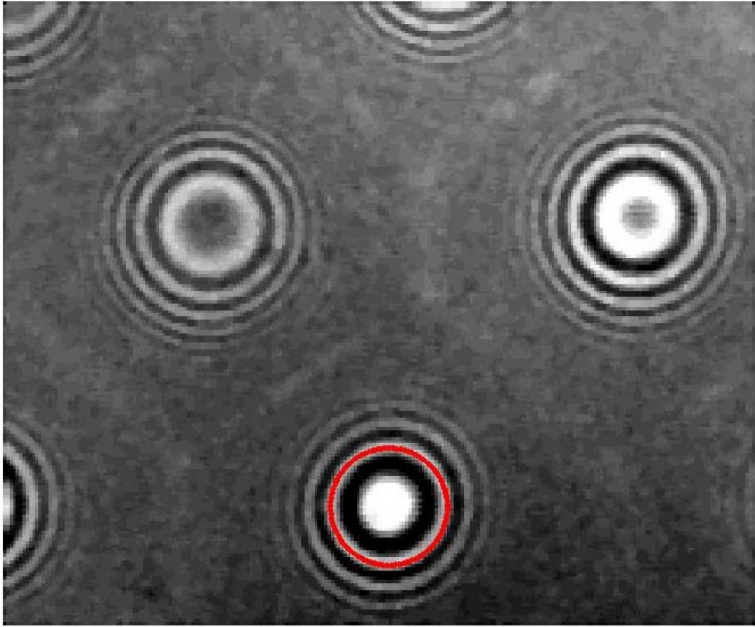
FRAME 2 Y 7



Para apreciar que las variaciones de las franjas en estos cuadros de las imágenes se están cerrando, se muestran las franjas en una región diferente a la seleccionada anteriormente. En las figuras 5.25 y 5.26 se indican la región seleccionada y la respectiva superposición de las franjas del cuadro 2 con el 7.

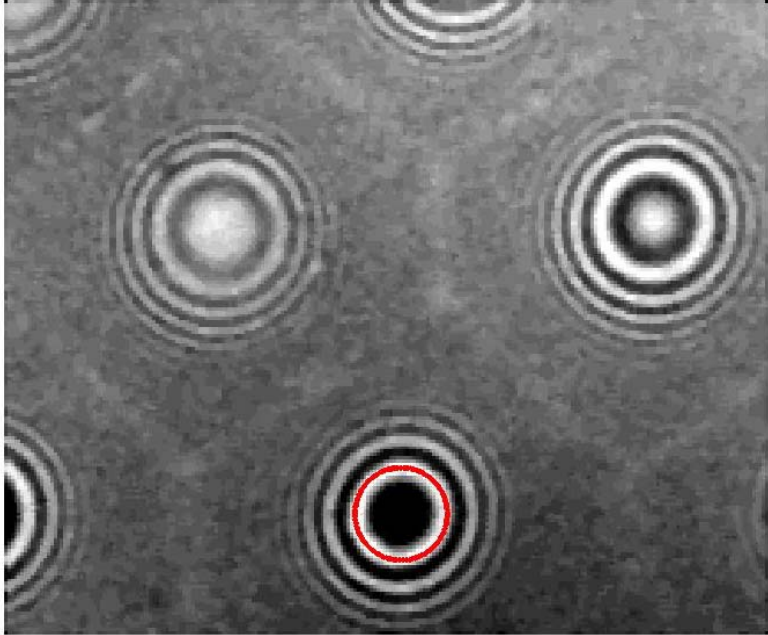
Figura. 5.25 (a) franja seleccionada en el cuadro 2 (b) franja seleccionada en el cuadro 7

FRANJA SELECCIONADA EN EL CUADRO 2



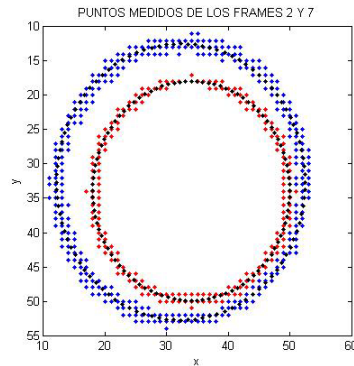
a)

FRANJA SELECCIONADA EN EL CUADRO 7



b)

Figura. 5.26 Superposición de las franjas seleccionadas de la imagen 2 y 7

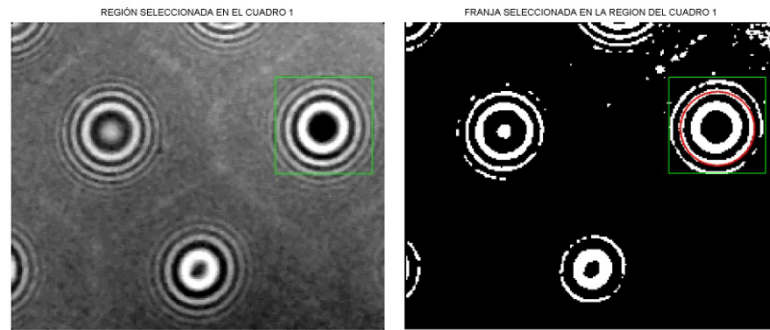


Desde el primer cuadro al séptimo se identifica que la superficie del ojo desciende. Teniendo en cuenta que en el ojo de los insectos los omatidios reposan sobre la membrana basal, cuando esta membrana se dilata todos los omatidios se ven afectados por dicha dilatación; lo cual conlleva a que las facetas se encuentren sometidas a las deformaciones que se den en dicha membrana.

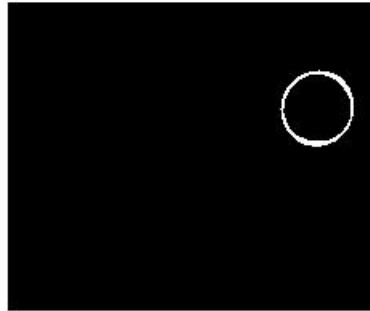
En la figura 5.27 a),b),c),d) y e); se tienen las imágenes de algunos de los cuadros donde se presentan variaciones en las franjas y se muestra la franja interferométrica binarizada al cual se le hace seguimiento, en la secuencia de video.

Se debe tener en cuenta que la selección de las franjas en la secuencia de las imágenes no es arbitraria; cuando se toma la franja en la primera imagen, se procede a realizarle el seguimiento en los cuadros siguientes. En las imágenes que se observen los cambios en que la franja se contrae o se dilata en la respectiva secuencia, presentan información del ascenso o descenso de la superficie y en este caso de la faceta en estudio.

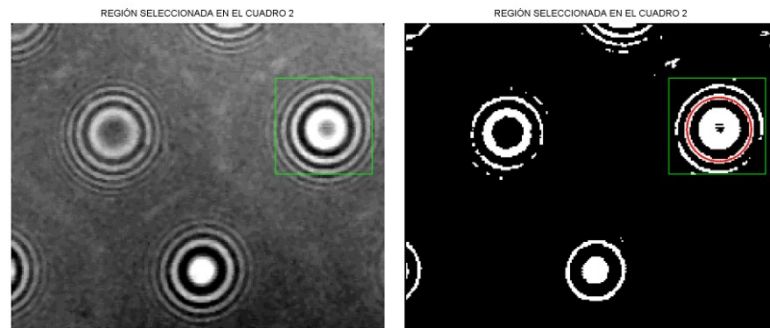
Figura. 5.27 Binarización y selección de las franjas donde se tienen variaciones



FRANJA INTERFEROMÉTRICA EN EL FRAME 1



a)

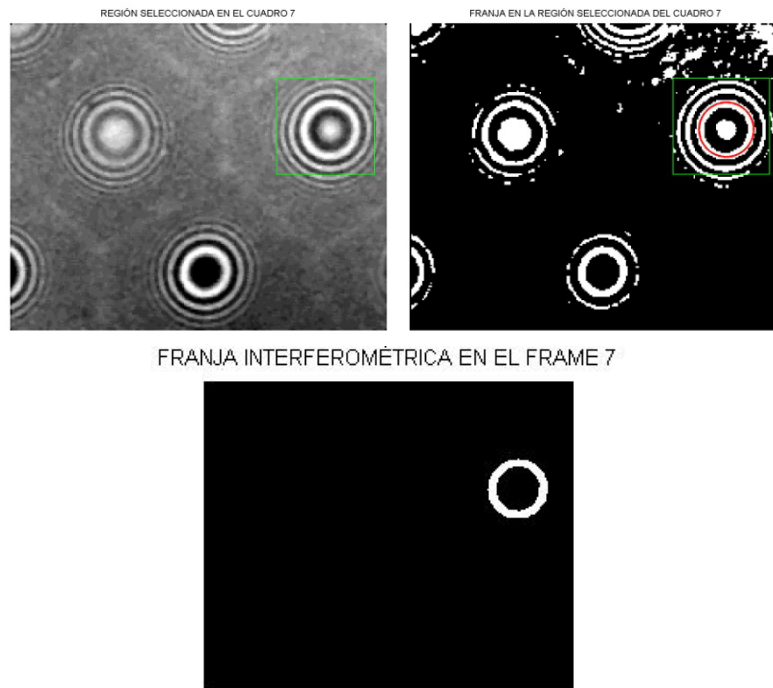


FRANJA INTERFEROMÉTRICA EN EL FRAME 2

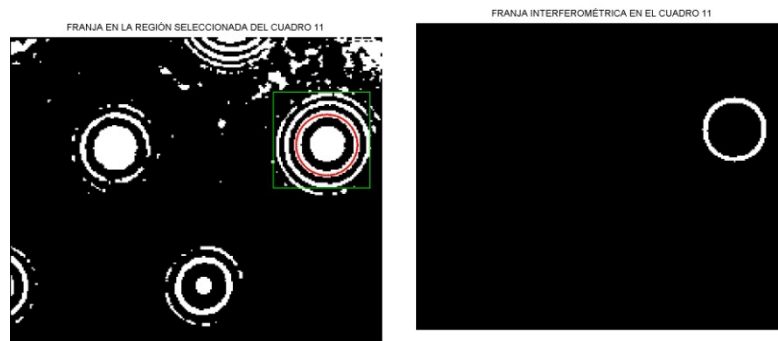


b)

Figura. 5.27 Binarización y selección de las franjas donde se tienen variaciones

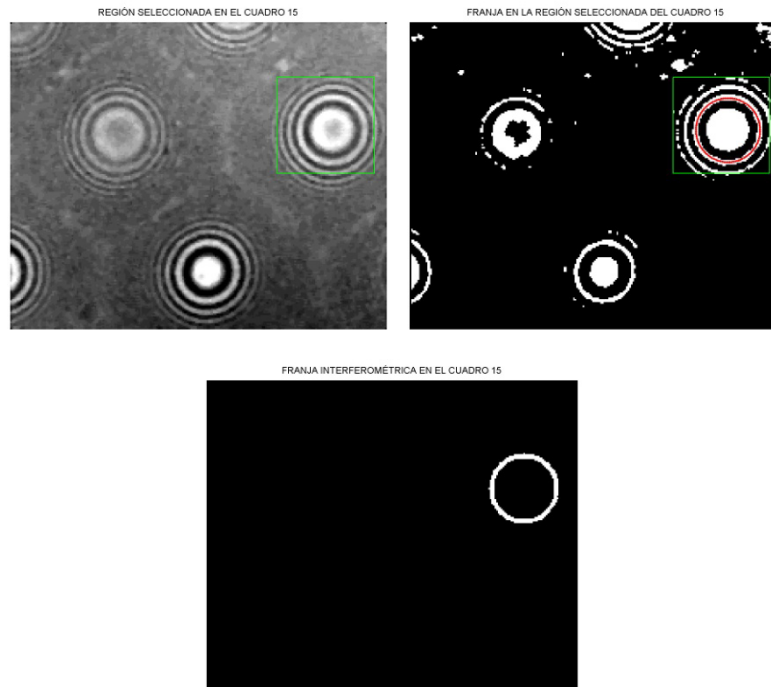


c)



d)

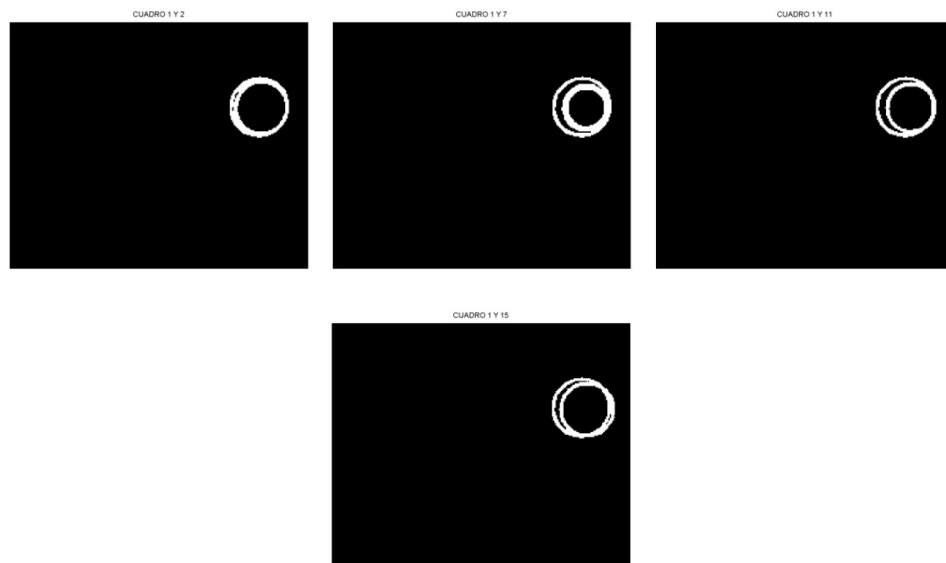
Figura. 5.27 Binarización y selección de las franjas donde se tienen variaciones



e)

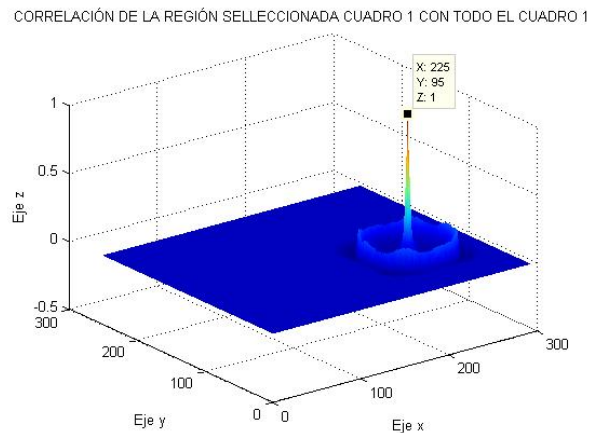
De los cuales se realiza la superposición de la franja del primer cuadro con las otras franjas, así como se tiene en la figura 5.28

Figura. 5.28 Superposición de la franja 1 con las franjas de los cuadros 2, 7, 11 y 15 en la secuencia de vídeo



Se realizan las respectivas correlaciones de las imágenes binarizadas de la franja seleccionada en el primer frame, con cada uno de las franjas seleccionadas en los demás. Dichas correlaciones presentan una aproximación a los desplazamientos que se presentan en las franjas. Se comienza realizando la auto correlación del frame uno, región de la franja uno con todo el frame 1; posteriormente se realiza la correlación cruzada de la región de la franja uno con cada uno de los frames de las siguientes franjas interferométricas. En la figura 5.29 se tiene la autocorrelación del primer cuadro, en la cual se muestra la coordenada del pico de correlación más alto, este valor representa el centro de la imagen en estudio.

Figura. 5.29 Autocorrelación de la franja seleccionada en 1 en el primer cuadro



En las figuras siguientes se indican las coordenadas de los picos de correlación, con estas coordenadas se puede determinar cuánto se desplaza la franja aproximadamente.

Figura. 5.30 Correlación cruzada de la franja seleccionada en la imagen 1 con la franja de la imagen 2

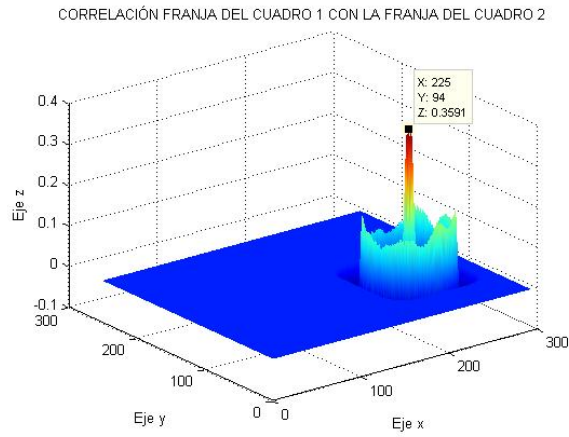
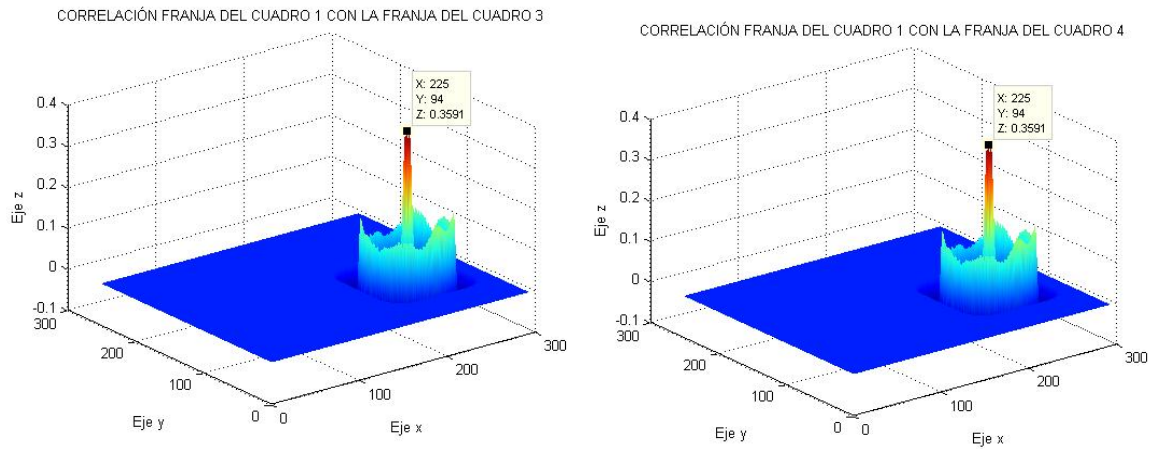
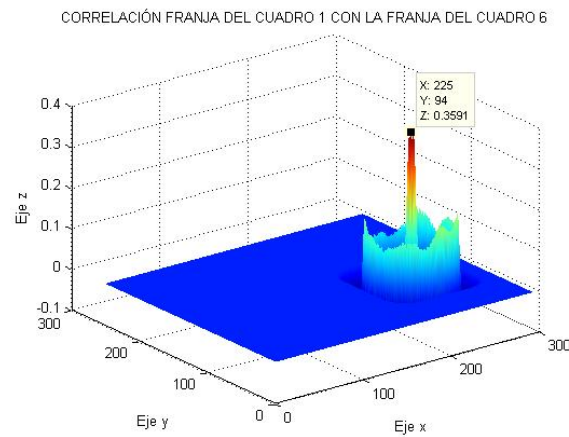


Figura. 5.31 Las imágenes a, b y c representan las correlaciones cruzadas de la franja de la primera imagen con la franja de las imágenes 3, 4 y 6 respectivamente



(a)

(b)

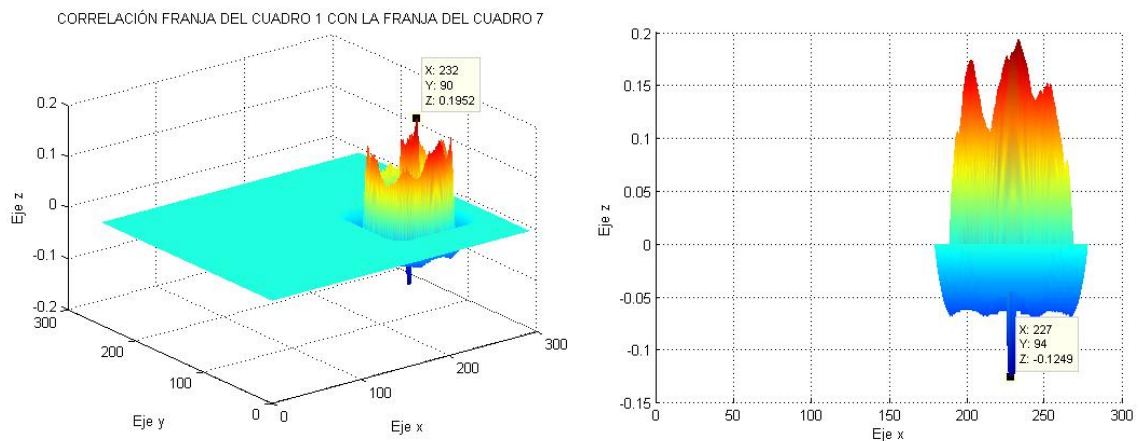


(c)

De la figura anterior se determina, por lo menos, que las franjas interferométricas no presentan variación, como se había estipulado con anticipación. A pesar de esto no se puede argumentar a ciencia cierta que sobre la superficie no se tengan desplazamientos, es posible que no se pueda detectar si el movimiento es mínimo. Por otra parte en la figura 5.32 se tienen dos imágenes de la correlación de la franja 1 con la franja 7.

En la cual se aprecian varios picos de correlación; esto implica que hay valores que e están superponiendo, debido a que las franjas no son concéntricas.

Figura. 5.32 Correlación cruzada de la franja de la primera imagen 1 con la franja de la imagen 7, se indican los dos picos de correlación



De forma similar se realizan las respectivas correlaciones con el frame 11 y 15, estas correlaciones se muestran en las figuras 5.33 y 5.34

Figura. 5.33 Correlación cruzada de la franja 1 con la franja de la imagen 11

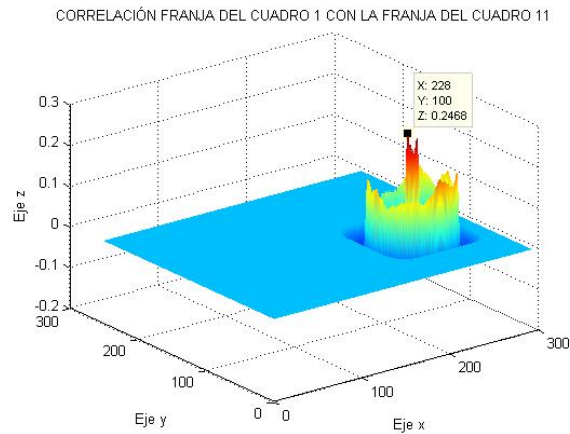
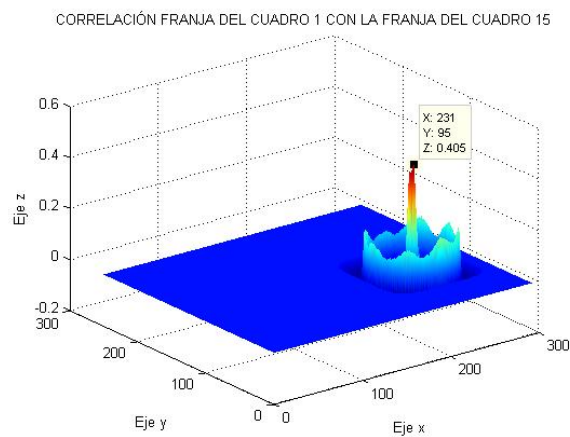
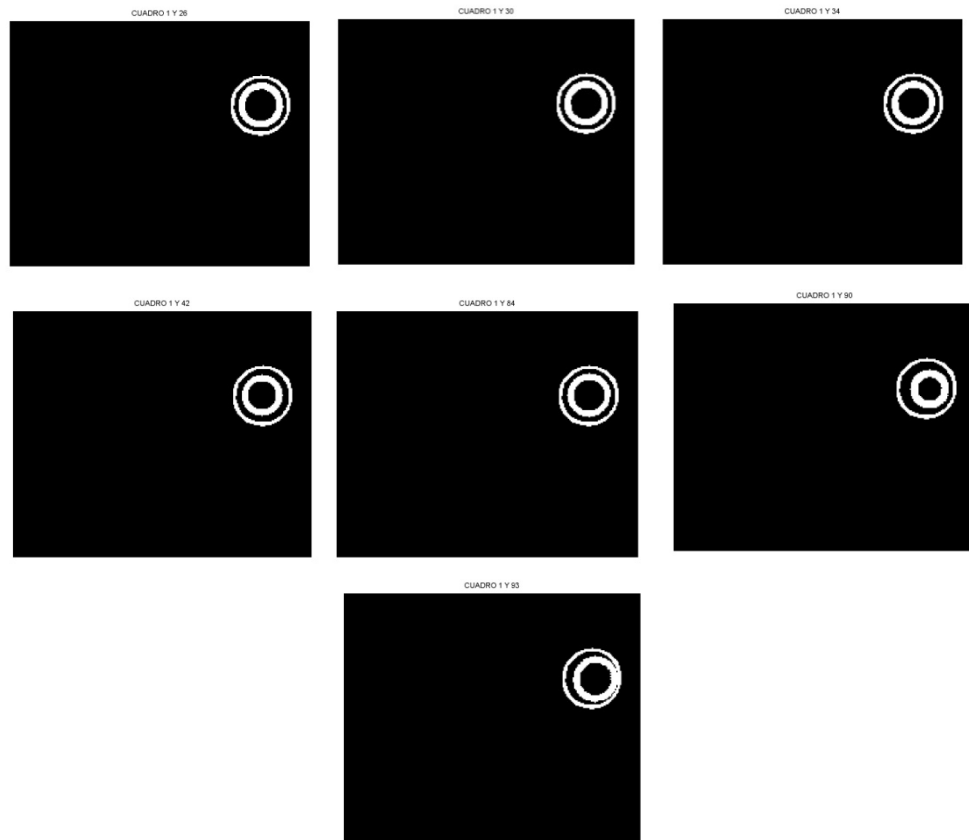


Figura. 5.34 Correlación cruzada de la franja de la imagen 1 con la de la imagen 15



De forma similar en la figura 5.35 se tienen las imágenes de las superposiciones de la franja seleccionada en el primer cuadro con la correspondiente a la imagen donde se presentaba variación.

Figura. 5.35 Superposición de la franja seleccionada de la primera imagen con las franjas de la imagen donde se presentan variaciones



Luego se determinan las funciones y los respectivos picos de correlación de cada caso. Los valores de las correlaciones de la franja del primer cuadro que no se indican entre cada salto permanecen invariantes hasta la siguiente correlación. En este caso las correlaciones se hacen desde la imagen 1 hasta la imagen 109. En la figura 5.36 (a) se tiene la correlación de la franja del primer cuadro con la franja del cuadro 25 y en (b) la correlación con la franja del cuadro 30.

Figura. 5.36 (a) Correlación cruzada de la franja seleccionada en la imagen 1 con la franja de la imagen 26 (b) correlación de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 30

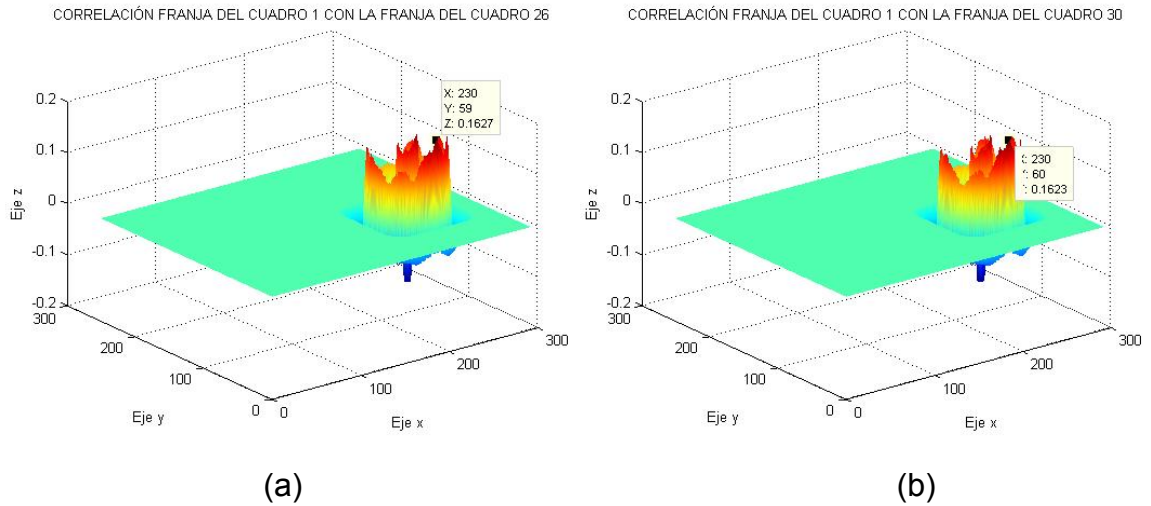


Figura. 5.37 (a) Correlación cruzada de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 34 (b) correlación de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 42

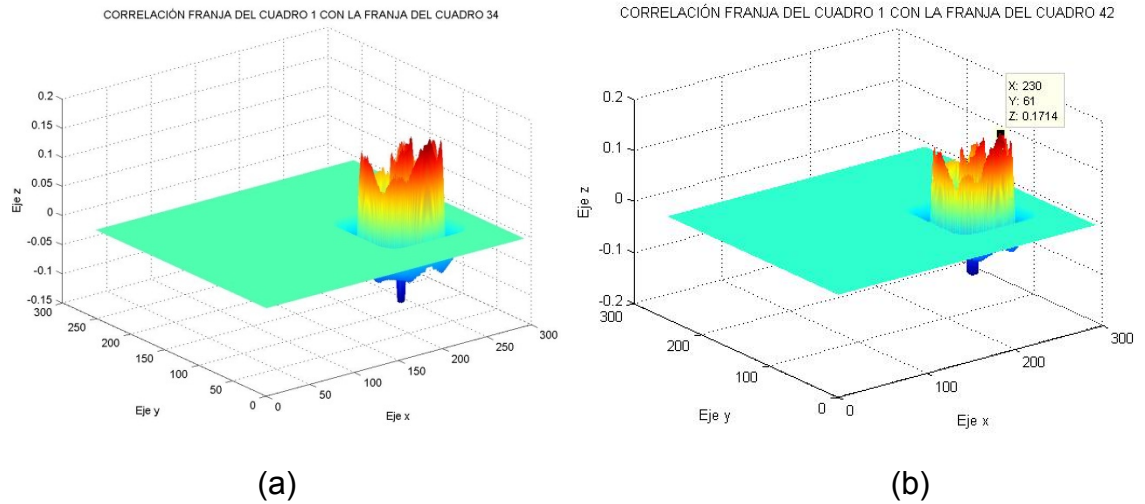
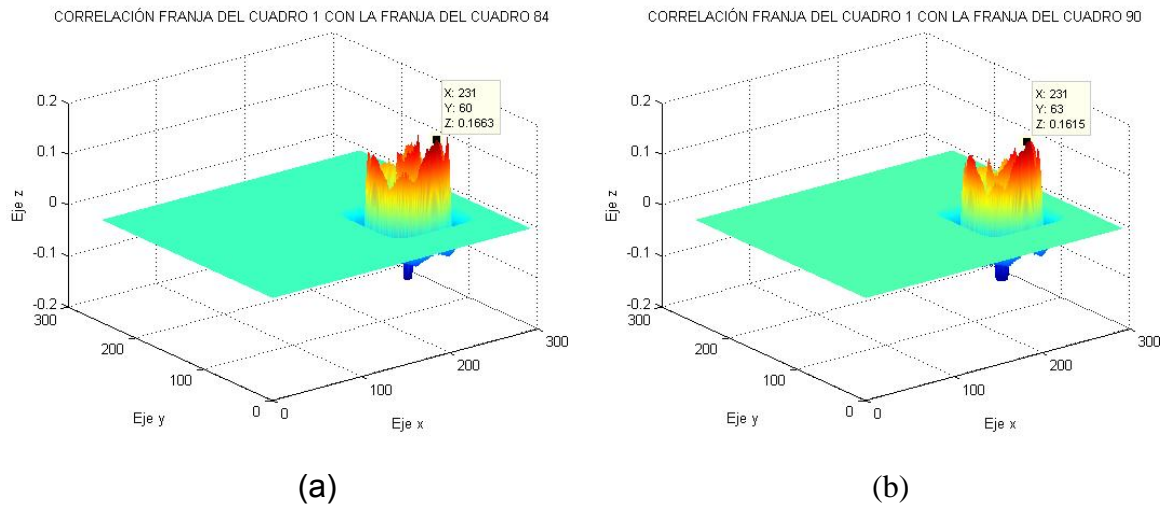


Figura. 5.38 (a) Correlación cruzada de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 84 (b) correlación de la franja de la imagen 1 con la franja de la imagen 90

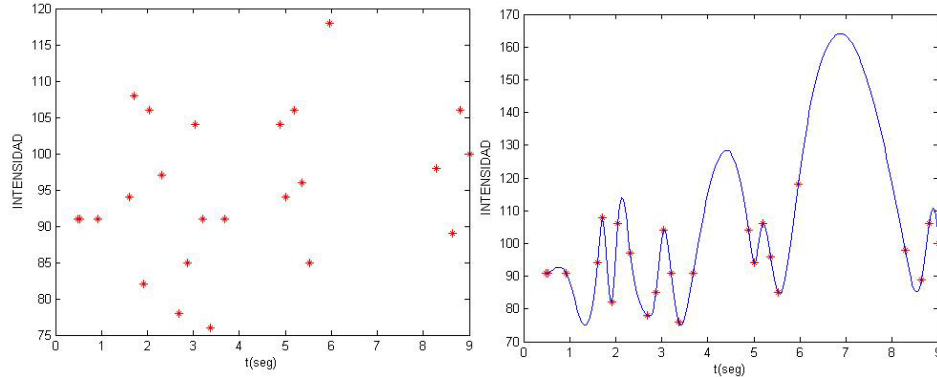


Con las coordenadas que se obtienen, de los puntos más altos, en los picos de correlación de las imágenes se determina el valor de la intensidad en las imágenes del video y el intervalo de tiempo de las respectivas variaciones de las franjas, en este caso se analizan los cambios de las franjas claras. En la Tabla 5.2 se muestran los datos de los valores de intensidad y los tiempos de cada cuadro del video analizado.

Tabla 5.2 Intensidades respecto al tiempo en el video 1

INTENSIDAD	t (seg)	INTENSIDAD	t (seg)
91	0.48	91	3.68
91	0.52	104	4.88
91	0.92	94	5.00
94	1.60	106	5.20
108	1.72	96	5.36
82	1.92	85	5.52
106	2.04	118	5.96
97	2.32	104	6.60
78	2.68	98	8.28
85	2.88	92	8.52
104	3.04	89	8.64
91	3.20	106	8.80
76	3.36	100	9.00

Figura. 5.39 Variación de las intensidades respecto al tiempo en el video 1



La grafica anterior muestra como es el cambio de franjas claras y teniendo en cuenta que la distancia entre franjas es de $\lambda/2$ donde la longitud de onda en promedio fue de 540nm, debido a que se trabajó con luz policromática. Determinándose una rapidez promedio de 0.83 $\mu\text{m/s}$.

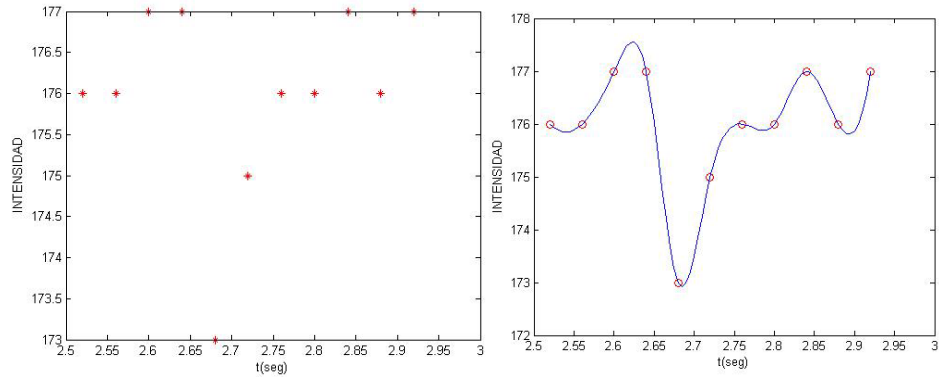
De forma similar para la secuencia de otro video en un intervalo de tiempo, donde se apreció las variaciones de las franjas interferométricas, se obtienen los valores de la Tabla 5.3

Tabla 5.3 Intensidad respecto al tiempo en video 2

INTENSIDAD	t (seg)
176	2.52
176	2.56
177	2.60
177	2.64
173	2.68
175	2.72
176	2.76
176	2.80
177	2.84
176	2.88
177	2.92

Con los datos anteriores se realiza la grafica de los puntos, mostrándose ésta en la figura 5.40

Figura. 5.40 Variación de las intensidades respecto al tiempo en el video 2



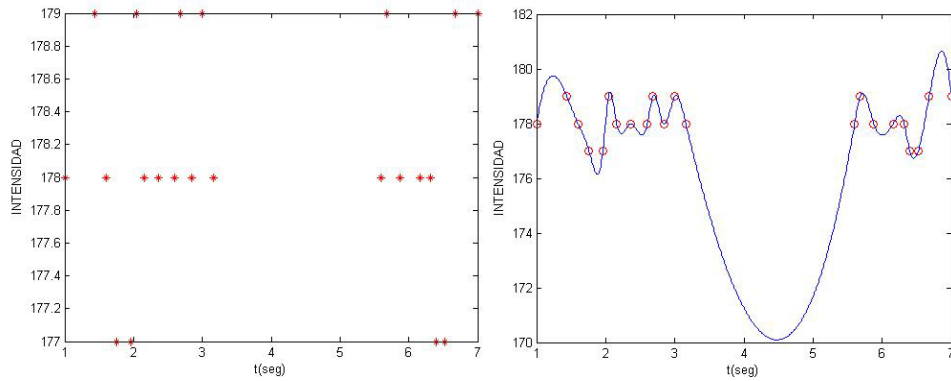
Teniendo en cuenta, la grafica anterior se determinó la rapidez de la variación en el intervalo temporal 2.64 y 2.84 s, dando variación de 0.2 s, por tanto la rapidez fue de 1.35 $\mu\text{m/s}$.

Después de un tiempo de estar sometida a la iluminación las moscas entran en un estado de estrés, lo cual implica que la rapidez de adaptación disminuya. Teniendo en cuenta este aspecto se realizaron las mediciones de la rapidez de adaptación a estas moscas. Obteniéndose los resultados que siguen.

Tabla 5.4 Intensidad respecto al tiempo video 3

INTENSIDAD	t (seg)	INTENSIDAD	t (seg)
178	1	179	3.00
179	1.44	178	3.16
178	1.60	178	5.60
177	1.76	179	5.68
177	1.96	178	5.88
179	2.04	178	6.16
178	2.16	178	6.32
178	2.36	177	6.40
178	2.60	177	6.52
179	2.68	179	6.68
178	2.84	179	7.00

Figura. 5.41 Variaciones de la intensidad respecto al tiempo en el video 3

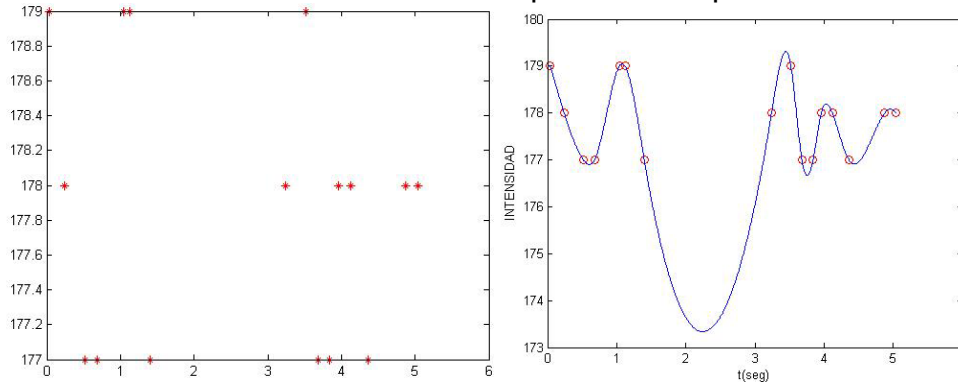


La rapidez en el video 3 fue de $0.433 \mu\text{m/s}$.

Tabla 5.5 Intensidad respecto al tiempo video 4

INTENSIDAD	t (seg)	INTENSIDAD	t (seg)
179	0.04	179	3.52
178	0.24	177	3.68
177	0.52	177	3.84
177	0.68	178	3.96
179	1.04	178	4.12
179	1.12	177	4.36
177	1.40	178	4.88
178	3.24	178	5.04

Figura. 5.42 Variaciones de la intensidad respecto al tiempo en el video 4



En el video 4 la rapidez que se determinó fue de $0.260 \mu\text{m/s}$.

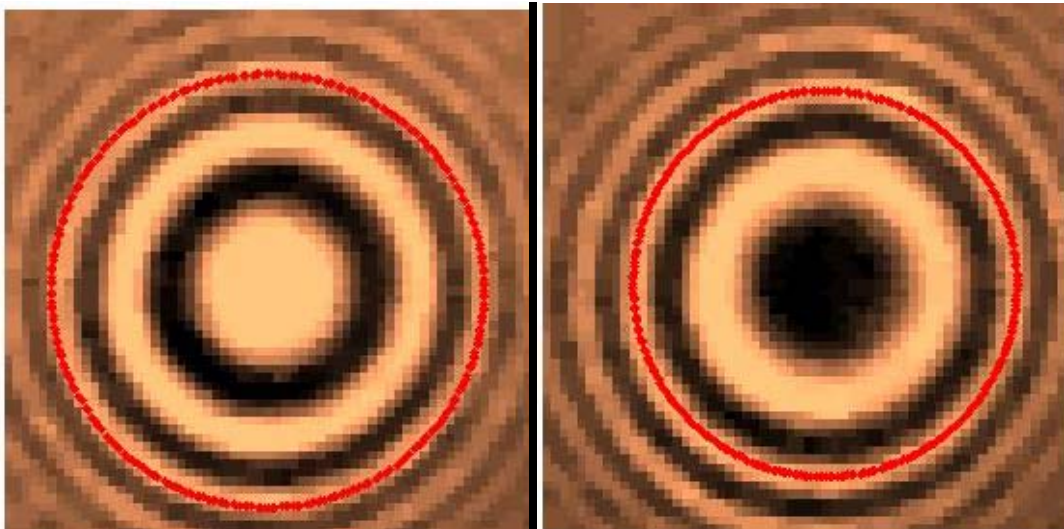
5.2.2 Matrices de transformación lineal, de desplazamiento y de giro

Para tener una aproximación de las posibles deformaciones que se genera en la superficie de los omatidios que conforman el ojo de la mosca, se tiene en cuenta la teoría de elasticidad.

De acuerdo al análisis realizado en el capítulo 3 se determinaron las deformaciones de alguno de los puntos de las franjas interferométricas²⁸, en algunas de las secuencias de los videos obtenidos y estudiados en la sesión anterior.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tomaron dos imágenes consecutivas en las cuales se tiene en cuenta las franjas seleccionadas, para tener una aproximación a la posible deformación de la superficie del ojo, mostrando una de las secuencias de las imágenes del primer video en la figura 5.43.

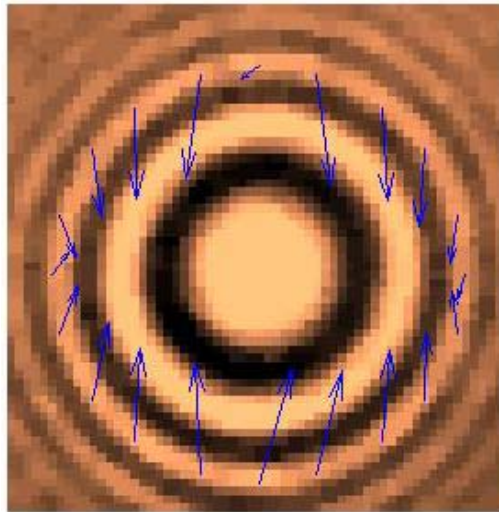
Figura. 5.43 Región seleccionada en dos cuadros consecutivos



²⁸ RESISTENCIA DE MATERIALES I. Escuela Técnica Superior de Materiales de Madrid. Curso 2006-07. p. 49

En la figura 5.44 se indica el sentido de la variación de algunos de los puntos de las franjas en las imágenes, tomando como referencia a la primera.

Figura. 5.44 Sentido de las variaciones de los puntos de una franja a otra



Teniendo en cuenta los procesos matemáticos realizados en el capítulo 3, se encontró la matriz del desplazamiento, de la cual se obtienen las matrices de transformación lineal M_i , ecuación (3.3), y de cada una de estas las respectivas matrices de deformación y de giro, recordando que:

$[D_i]$ = Matriz simétrica \rightarrow Matriz de Deformación

$[H_i]$ = Matriz Anti-simétrica \rightarrow Matriz de Giro

En las expresiones que siguen se muestra algunas de estas matrices:

Matrices de transformación lineal.

$$M_6 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, M_8 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 2.0000 \\ -0.5000 & -1.0000 \end{bmatrix} \text{ y } M_{11} = \begin{bmatrix} -0.4000 & 1.0000 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrices de deformación

$$D_6 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.5000 \\ 0.5000 & 0 \end{bmatrix}, D_8 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.7500 \\ -0.7500 & -1.0000 \end{bmatrix},$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} -0.4000 & 0.5000 \\ 0.5000 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrices de giro

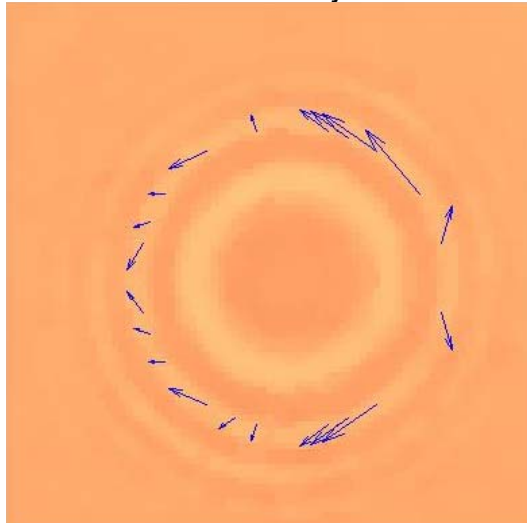
$$H_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0.5000 \\ -0.5000 & 0 \end{bmatrix}, H_8 = \begin{bmatrix} 0 & 1.2500 \\ -1.2500 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5000 \\ -0.5000 & 0 \end{bmatrix}$$

Según la teoría de pequeños desplazamientos se tienen en cuenta los valores para los cuales H es pequeña comparada con las dimensiones de la superficie en estudio.

De forma similar para el video 2 se muestra en la figura 5.45 el sentido de las variaciones de las franjas.

Figura. 5.45 Sentido de la variación de la franja en el video 2



Determinándose las matrices de transformación lineal, de deformación y de pequeños giros alguna de las cuales se muestran a continuación.

Matrices de transformación lineal

$$M_3 = \begin{bmatrix} -0.6667 & -0.6667 \\ -1.5000 & -1.5000 \end{bmatrix}, M_6 = \begin{bmatrix} -0.6667 & 2.0000 \\ 0.3333 & -1.0000 \end{bmatrix}$$

$$M_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1.1667 & -1.1667 \end{bmatrix}$$

Matrices de deformación

$$D_3 = \begin{bmatrix} -0.6667 & -1.0833 \\ -1.0833 & -1.5000 \end{bmatrix}, \quad D_6 = \begin{bmatrix} -0.6667 & 1.1667 \\ 1.1667 & -1.0000 \end{bmatrix} \quad y$$

$$D_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0.5833 \\ 0.5833 & -1.1667 \end{bmatrix}$$

Matrices de pequeños giros

$$H_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.4167 \\ -0.4167 & 0 \end{bmatrix}, \quad H_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0.8333 \\ -0.8333 & 0 \end{bmatrix} \quad y$$

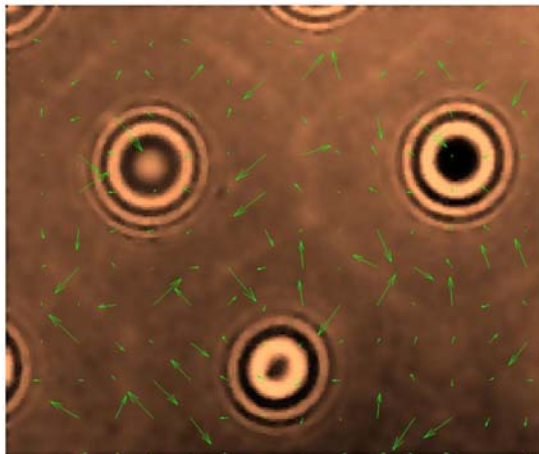
$$H_8 = \begin{bmatrix} 0 & -0.5833 \\ 0.5833 & 0 \end{bmatrix}$$

5.2.3 Flujo óptico

Para complementar el análisis de las variaciones de las imágenes se aplica la teoría de flujo óptico^{29 30}. En el cual se procede a determinar el sentido del movimiento de objetos entre otros. En este caso el objetivo era apreciar el sentido de las variaciones de las franjas interferométricas en la secuencia de las imágenes.

En la figura 5.46 se muestra el sentido de las variaciones, pero debido a la sensibilidad del método, al bajo contraste de las imágenes y al ruido de la imagen se presentan ambigüedades en los resultados, de tal forma que los datos que se obtienen sobre las variaciones y el sentido mostrado en dicha figura no resulta ser confiable para advertir el sentido de las variaciones.

Figura. 5.46 Representación del sentido de las variaciones en la imagen utilizando flujo óptico



Para tener una apreciación de las variaciones utilizando el método del flujo óptico se realizó lo siguiente. Se tomó una región en la secuencia y se aplicó

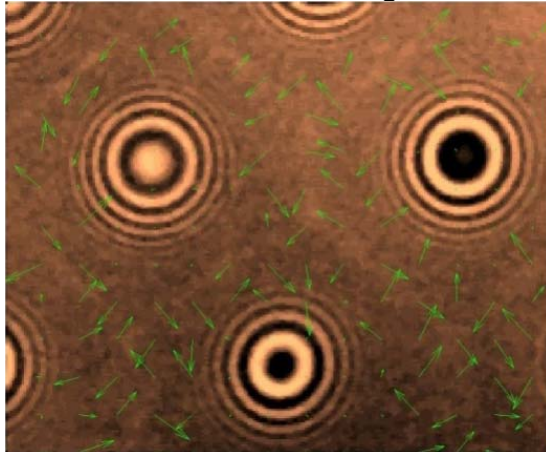
²⁹ HIGUERA, O. Estimación de Movimiento en Secuencia de Imágenes una Aplicación de la Visión Artificial. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Revista Colombiana de Física. ISSN: 1692-7257. Vol. 1 Número 7. 2006

³⁰ SORIANO, R. Del Procesamiento a la Visión Artificial. Departamento de Ciencias de la Computación Universidad de Granada.

nuevamente el método, determinándose así el sentido de las variaciones de las imágenes en la región seleccionada el cual se muestra en la figura 5.46.

De forma análoga en para otra secuencia en el vídeo se tienen la imagen de la figura 5.47

Figura. 5.47 Sentido de las variaciones de la imagen en la secuencia 165-166



6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los objetivos planteados para el desarrollo del presente proyecto de investigación sobre la dinámica del ojo de la mosca se advierte lo siguiente.

Primero que todo; utilizando el método de detección de máximos se procede a realizar la reconstrucción de la topografía de la región externa de la superficie de los omatidios que conforman el ojo de una mosca casera, pero la geometría que presenta el ojo de la mosca no permite que con el método se logre reconstruir toda la superficie; se utilizó el método de interpolación cúbica con el que se logra tener una aproximación de la superficie.

En esta parte del proyecto se obtuvo la altura y diámetro aproximada de uno de los omatidios con una precisión de 10 nm.

Para el análisis del movimiento del ojo de la mosca se tenía a disposición cuatro videos, de diferentes tiempos de exposición y distintas moscas pero de la misma especie (fly House). Para cada video analizado se determinó el valor de la rapidez de las variaciones de las franjas lo cual advertía el movimiento; los valores respectivos de la razón de cambio en cada caso fue de 0.83 $\mu\text{m/s}$, 1.35 $\mu\text{m/s}$, 0.433 $\mu\text{m/s}$ y 0.260 $\mu\text{m/s}$. Las variaciones en los valores obtenidos se deben, posiblemente, al tiempo de exposición al que se sometía cada una de las muestras y al grado de estrés en que se encontraban en el instante que se realizaba la adquisición. Resulta necesario resaltar las limitaciones que presenta la cámara CCD en el tiempo de integración cuando se toma el video, y teniendo en cuenta que actualmente se tienen dispositivos de video que realizan capturas a velocidades altas; se recomienda utilizar una cámara que adquiera imágenes a mayor velocidad en investigaciones futuras referentes al tema.

Los videos adquiridos para el análisis del movimiento correspondían a moscas distintas y de diferentes tamaños pero a la misma especie cada video fue realizado en días diferentes y sin tener en cuenta muchos aspectos que se deben tener en trabajos posteriores que vinculen el utilizar un insecto.


En la parte referente a las deformaciones se encontraron las matrices de deformación y las matrices de pequeños giros, con las cuales se pueden tener apreciaciones, de forma simple, respecto a las deformaciones que se tenían en los ojos estudiados a través de los interferogramas de la secuencia de los videos. Con el método utilizado se puede realizar investigaciones sobre pequeñas deformaciones que se presenten en un fenómeno determinado, en el cual se pueda utilizar el método según las características que se necesiten para tal efecto.

Debido a los problemas en el proceso de adquisición de los videos; estos presentaron un contraste bajo y ruido, lo cual implicó que al utilizar el método del flujo óptico no se podían apreciar las variaciones de las imágenes de una forma confiable.

BIBLIOGRAFÍA

BORN Max and WOLF Emil. Principles of Optics. Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. SEVENTH (EXPANDED) EDITION. Cambridge UNIVERSITY PRESS. Seventh (expanded) edition © Margaret Farley-Born and Emil Wolf 1999

SALEH Bahaa and TEICH Malvin Carl. Fundamentals of Photonics. Department of Electrical and Computer Engineering University of Wisconsin — Madison Madison, Wisconsin. Department of Electrical Engineering Columbia University New York, New York. Copyright ©1991 by John Wiley & Sons, Inc.

HARIHARAN P. Basics of Interferometry. School of Physics, University of Sydney, Sydney, Australia. Second Edition,  Copyright ©2007, Elsevier Inc. All rights reserved.

TUCHIN Valery V. Coherent-Domain Optical Methods, Biomedical Diagnostics, Environmental and Material Science., Kluwer Academic Publishers New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. © 2005 Springer Science + Business Media, Inc.

BASS Michel, Editor in Chief, VANSTRYLAND Eric W, WILLIAM David R and WOLFE William L. Handbook of Optics. Volumen I, fundamentals, Techniques, and Design. Second Edition. Sponsored by the Optical Society of America.

LEE Luke P. and SZEMA Robert. Inspirations From Biological Optics for Advanced Photonic Systems. 18 November 2005 Vol. 310 Science.

GILLOTT Cedric. Entomology. (Third Edoition). University of Saskatchewan, Canada. Published by Springer. All Rigths Reserved © 2005 Spriger.

OSUNA Eduardo. Morfología del Exoesqueleto de los insectos. Volumen 1, origen y Evolución. El Exoesqueleto. Eduardo Osuna. Volumen 1, origen y Evolución. El Exoesqueleto.

SMITH Graham and KING Uk Terry. Optics and Photonics: An Introduction. University of Manchester, USA Copyright © 2007 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.

WANG Yao, OSTERMANN Joern and ZHANG Ya-qin. Video Processing and Communications. (2002 by Prentice-Hall).

DALEN William E. Anatomía y fisiología de insectos: Sensorios. Universidad Nacional Agraria de Lima. Perú. Dugesiana Version 0.1.117.

http://www.lamolina.edu.pe/profesores/wdale/anat_fisio_insect/2/ANATOM%C3%8DA%20FISIOLOG%C3%8DA%20INSECTOS.%20SENSORIOS.%20VERSI%C3%93N%2001.117.%20WILLIAM%20E.%20DALE%20PHD..pdf

----- Perú. Dugesiana Version 0.1.T17.

http://www.lamolina.edu.pe/profesores/wdale/anat_fisio_insect/ANATOMIA%20FISIOLOGIA%20INSECTOS.%20SENSORIOS.%20VERSI%C3%93N%2001.T17.%20WILLIAM%20E.pdf

LARA CAÑABERAS Ricardo, ARROYO REY Fernando Agustín, TORICES HERNÁNDEZ Angélica y MORA NUÑEZ Margarito. **Modelización primaria de la estructura interna de los ommatidia de los ojos de los trilobites.** Departamento de Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad

Complutense de Madrid. 28040 Madrid. España; **Centro de Estudios en Zoología, Universidad de Guadalajara, Apdo. Postal 234, 45100, Zapopan, Jalisco, México. Dugesiana 11(2): 1-18, 2004. Fecha de publicación: 28 de diciembre 2004 © Universidad de Guadalajara.

PLATA G. Arturo, MENESES Jaime Enrique, SUAREZ S Miguel Ángel y GARZÓN Johnson. Reconstrucción Topográfica Combinando Simultáneamente Métodos de Luz Monocromática con Luz Blanca. Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, VII Encuentro Nacional de Óptica. Universidad del Quindío. Armenia, Sep. 25 - 29 de 2000. Resumen: Óptica Luz y Futuro VII Encuentro Nacional de Óptica. Página 26.

SUÁREZ Miguel Ángel, PLATA G. Arturo y GARZÓN Johnson. Polychromatic local reflectivity of materials. Proceedings of SPIE Vol. 4419. pag 748.

SUÁREZ Miguel Ángel. Implementación y aplicación de un perfilómetro óptico basado en microscopia interferencial. Proyecto de Pregrado II/2000 Universidad Industrial de Santander.

MOLINA SORIANO Rafael. Del Procesamiento a la Visión Artificial. Departamento de Ciencias de la Computación e I.A. Universidad de Granada.


ARTIFICIAL COMPOUND EYE, Fabricated in Lab Liese Greensfelder. Media Relations UC Berkeley. Abril 2006.

CAHPMAN R. F. The Insects. Structure and Function.. Cambrige University Press. New York. IV edition. 1998.

LEZAMA Humberto J. La Visión en los Insectos. Museo de insectos CIPROC. Escuela de Agronomía Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Universidad de Costa Rica, San Pedro, San José de Costa Rica.

EL DISEÑO EN LA NATURALEZA. <http://www.harunyahya.com/es/naturaleza02>
Entomología. http://scriptusnature.8m.com/III_ento/indice.htm

HIGUERA MARTINEZ Oscar Iván. Images Sequence Movement Estimatiion. An Artificial Vison Application. (Revista Colombiana de Física Pg. 48-3) ISSN;1692-257 Volumen 1 Número 7 año 2006.

RESISTENCIA DE MATERIALES I: Resúmenes y Problemas de Clase. Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales U.D. de Resistencia de Materiales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid Curso 2006-07 .

http://books.google.com.co/books?id=CX9oXycO0KMC&printsec=frontcover&dq=resistencia+de+materiales+%2B+escuela+tecnica+superior+de+ingenieros+industriales+septiembre+2006&source=gbs_similarbooks_r&cad=3#v=onepage&q=&f=false.

OMAR Mayer. Teoría de la Deformación. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica; Agosto 31 2006.

RESH Vincent H. Encyclopedia of Insects. University of California, Berkeley; Ring T. Cardé, University of California, Riverside.

GONZALEZ Rafael, WOODS Rafael and EDDINS Steven. Digital Image Processing Using Matlab.

JAHNE Bernd. Digital Image Processing. Springer, 2001.