

**EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA A PARTIR
DE FRANJAS DE IGUAL COLOR EN INTERFEROGRAMAS DE
LUZ BLANCA**

ERNESTO AGUILERA BERMÚDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
MAESTRÍA EN FÍSICA
BUCARAMANGA
2005**

**EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA A PARTIR
DE FRANJAS DE IGUAL COLOR EN INTERFEROGRAMAS DE
LUZ BLANCA**

ERNESTO AGUILERA BERMÚDEZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Maestría en Física**

Director

ARTURO PLATA GÓMEZ

Ph. D. en Física

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

MAESTRÍA EN FÍSICA

BUCARAMANGA

2005

AGRADECIMIENTOS

El autor del presente trabajo expresa sus más sinceros agradecimientos a las siguientes personas y entidades:

Al Doctor Arturo Plata, por su siempre oportuna asesoría y dirección, además de su calidad humana al creer siempre en la capacidad intelectual de sus estudiantes.

Al Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales por la acogida brindada en el momento de la reanudación de mis estudios de Maestría en Física.

A la Escuela de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por el apoyo brindado y la paciencia durante el presente trabajo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. EL MODELO DE COLOR	6
1.1 COLORIMETRÍA BÁSICA	6
1.1.1 La tricromaticidad	6
1.1.2 Metamerismo.....	7
1.1.3 La definición de un observador estándar.....	8
1.1.4 Las curvas de ajuste de la C.I.E.	8
1.1.5 El diagrama de cromaticidad de la CIE	10
1.2 CÁLCULO DE LAS COORDENADAS DE UN COLOR.....	12
2. APLICACIÓN DEL MODELO DE COLOR A LOS PROCESOS DE INTERFERENCIA CON LUZ POLICROMÁTICA	16
2.1 INTRODUCCIÓN	16
2.2 SIMULACIÓN DE LOS COLORES PRODUCIDOS EN UN PROCESO ESPECÍFICO DE INTERFERENCIA CON LUZ POLICROMÁTICA.	17
2.2.1 Dos y tres longitudes de onda	18
2.2.2 Trabajo con luz blanca	21
2.2.3 Conclusiones	26
3. MONTAJE EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA ASIGNACIÓN DE COLORES CON ALTURAS	28
3.1 INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO.....	28
3.1.1 Respuesta de los sistemas de captura de imagen.	28
3.1.2 La influencia y la caracterización de las superficies.	30
3.2 EL MONTAJE.....	33

3.3	OBTENCIÓN DE UN PERFIL DE ALTURAS DE UNA SUPERFICIE PLANA DE UN ESPEJO	34
4.	OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE ALTURAS DE LA SUPERFICIE PATRÓN Y UN ESCALÓN.....	41
4.1	EL EFECTO DE LAS VARIACIONES DE LA INTESIDAD DE ILUMINACIÓN	41
4.1.1	Variaciones en la coordenada R	41
4.1.2	Efecto de la normalización de la coordenada R.	42
4.1.3	Colores de una superficie llana en el espacio 2-D de la cámara.....	44
4.1.4	El efecto de la cuantización del color	45
4.2	OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE ALTURAS	46
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Interferograma de luz monocromática a la izquierda y con luz blanca a la derecha.....	2
Figura 2 Respuesta espectral de los tres tipos de conos en el ojo humano. .	7
Figura 3 Ejemplo de dos densidades espectrales diferentes que corresponden a un mismo color.....	7
Figura 4 Curvas de ajuste de colores espectrales con las luces primarias R,G,B de la CIE.	9
Figura 5 Curvas de ajuste de colores espectrales con las luces primarias X,Y,Z de la CIE.	10
Figura 6 (a) Normalización del espacio de colores XYZ al plano $X+Y+Z=1$, (b) diagrama de cromaticidad.....	11
Figura 7 Proceso de obtención de la coordenada cromática Y.....	13
Figura 8 Colores espectrales en el diagrama de cromaticidad	15
Figura 9 Ejemplos de aplicación del diagrama de cromaticidad	16
Figura 10 Color de la radiación de un cuerpo negro.....	17
Figura 11 Color observado en películas delgadas de diferente espesor.	18
Figura 12 Simulación de interferencia con luces espectrales roja (640nm) y verde(546nm).....	19
Figura 13 Simulación de interferencia de mayor contraste al ojo humano con luces espectrales roja (640nm) y verde (500nm).....	20
Figura 14 Simulación de interferencia con tres luces espectrales: roja (600nm), verde (510nm) y azul (480nm).....	21
Figura 15 Un resultado del programa de simulación que aparece en el apéndice C.....	23

Figura 16 Simulación del lugar geométrico ocupado por los colores en un proceso de interferencia con luz blanca sobre una superficie plana y colores esperados.....	24
Figura 17 Simulación del fenómeno de metamerismo del color.	25
Figura 18 Superficie con respuesta espectral y múltiples interferencias.....	26
Figura 19 Cámara de mosaico y cámara 3CCD.	30
Figura 20 Parámetros geométricos y ópticos que influyen en el estímulo que excita el sensor.	32
Figura 21 Esquema general del montaje utilizado.	36
Figura 22 Proceso de obtención de un perfil de alturas en una superficie llana.	38
Figura 23 Problemas detectados en el trazado de un perfil vertical.....	39
Figura 24 Problemas detectados en el trazado de un perfil horizontal.	40
Figura 25 Perfil vertical a ambos lados del contacto óptico.	41
Figura 26 Variación en la coordenada R de la cámara con el cambio en la intensidad de la fuente de iluminación.	44
Figura 27 Diferencia en el valor de la coordenada normalizada r.	45
Figura 28 Lugar geométrico de los colores de un perfil del interferograma en una superficie llana en el espacio cromático propio de la cámara.	45
Figura 29 Ejemplo de un interferograma con ruido de cuantización(a) y efecto del filtrado(b).....	46
Figura 30 Rampa de calibración cuantizada a 16 colores.	47
Figura 31 Curva para el proceso de calibración.....	48
. Figura 32 Perfil de alturas de la rampa con cinco niveles, cada paso vertical corresponde a 26/15 de nm aproximadamente.....	49
Figura 33 Perfil de alturas de la rampa con diez niveles, cada paso vertical corresponde a 26/15 de nm aproximadamente.....	49
Figura 34 Perfil de alturas a ambos lados del contacto óptico con cinco niveles, cada paso vertical corresponde a 26/15 de nm aproximadamente..	50

Figura 35 Proceso de obtención del perfil de alturas de una superficie tipo escalón. 51

Figura 36 Curvas de ajuste de colores espectrales con las luces X,Y y Z.... 57

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.....	55
ANEXO B.....	58
ANEXO C.....	59
ANEXO D.....	62
ANEXO E.....	63

TITULO: EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA A PARTIR DE FRANJAS DE IGUAL COLOR EN INTERFEROGRAMAS DE LUZ BLANCA*

Autor: Ernesto Aguilera Bermúdez

Palabras clave: Color, Microscopía Interferencial.

Descripción

El diagrama de cromaticidad C.I.E. ha sido utilizado como un medio que permite asociar la percepción visual del color con una gran cantidad de observables físicos de interés. La temperatura, el espesor de películas delgadas y la cantidad de material que participa en una aleación son algunos ejemplos. Quienes trabajan en el área de microscopía interferencial saben de la relación entre las curvas de igual color que se producen en un interferograma de luz blanca y la topografía del objeto en observación. En este trabajo se realiza un estudio del lugar ocupado dentro del diagrama de cromaticidad de los colores que se producen por la interferencia de frentes de onda planos de luz blanca para diferentes retardos y se utiliza para hacer una calibración que permita extraer topografía de algunos interferogramas reales. El efecto del error de cuantización de los colores de acuerdo a la altura es también estudiado.

* Trabajo de Grado

TITLE: EXTRACTION OF TOPOGRAPHIC INFORMATION BASED ON EQUAL COLOR FRINGES OF THE WHITE LIGHT INTERFEROGRAM*

Author:Ernesto Aguilera Bermúdez**

Key Words: color, interferencial microscopy.

Description:

C.I.E. chromaticity diagram has been used as a mean that permits to associate visual color perception with several interesting physics quantities. Temperature, thickness of thin films and the amount of material in alloys are some examples of these quantities. Who works in interferencial microscopy knows the relation between isocolor curves, which are produced in a white light interferogram, and the topography of the object under observation. A study about locus of colors into the Chromaticity diagram is done in this work. Colors are produced by interference among plane wave fronts of white light with different delays. By this study a calibration that permits to extract topography information from some real interferograms is obtained. The effect of color quantization error according to the height is also studied.

* Degree Project

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

INTRODUCCIÓN

Existe una gran cantidad de aplicaciones en donde el estado de la superficie de un objeto es importante para su buen funcionamiento: la acumulación de óxido de hierro en las cintas de video, problemas de corrosión en las superficies de algunos metales o aleaciones, la superficie de las esferas que conforman un engranaje, y la deposición de óxidos y metales en películas fotográficas[1].

Para obtener acabados de gran precisión o determinar el estado de una superficie, se hace necesario disponer de medios y técnicas especiales capaces de medir la rugosidad. La interferometría óptica ha permitido hacer medidas precisas de formas y distancias a una escala de 10^{-6} m hasta 10^{-9} m.

La microscopia interferencial es una herramienta muy importante que basa su funcionamiento en dos principios básicos: el proceso de interferencia de la luz y la microscopia clásica. Se obtiene así un análisis de campos de visión microscópicos y topografías nanométricas al mismo tiempo.

En el uso de la interferometría óptica, las técnicas utilizan la división de un frente de onda de luz, o la división de su amplitud. La interferencia causada por estos frentes luminosos, forma un patrón de franjas en el cual queda codificada la información topográfica de la superficie. Dependiendo de la densidad espectral de la fuente utilizada -ya sea luz blanca, monocromática o un ancho determinado de longitudes de onda- se presentan ventajas y desventajas al momento de decodificar dicha información.

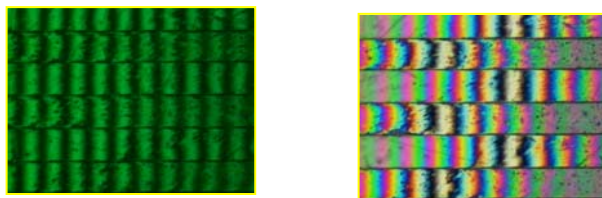
Una vez se tenga la información del interferograma, se deben usar las técnicas matemáticas adecuadas para obtener los datos útiles que guarden relación con la textura de la superficie. La topografía podría estar codificada en la inclinación de las franjas, su visibilidad o su fase; esta última, gradúa la intensidad de las

diferentes longitudes de onda de los frentes interferentes de acuerdo a la diferencia de camino óptico recorrido.

Del conjunto de técnicas utilizadas para reconstrucción topográfica de superficies: la microscopía confocal, interferometría, moiré, y triangulación entre otras[2], aquellas que se basan en los procesos de interferencia de la luz, presentan dificultad a la hora de interpretar los interferogramas, más aún cuando se trabaja con frentes de luz monocromática, ya que se pierde la identificación del contacto óptico y por consecuencia el orden de las franjas de interferencia. Además, si la topografía presenta cambios abruptos en la topografía mayores a $\lambda/2$ cuando se esté trabajando por reflexión aparecerán ambigüedades en la altura.

En la siguiente figura se puede observar una muestra iluminada con luz monocromática donde los escalones parecen estar a la misma altura, al ser observados con luz policromática, observamos que hay una variación aproximada de 750nm.

Figura 1 Interferograma de luz monocromática a la izquierda y con luz blanca a la derecha



Fuente: Autor

Entre las técnicas para decodificar la altura del interferograma, se pueden encontrar el Phase shifting, las técnicas de análisis en el dominio de la frecuencia y la detección de máximos[3]. Métodos como el phase Shifting o la detección de máximos, presentan la desventaja de requerir de más de un interferograma.

Diversos métodos se han utilizado para solucionar los anteriores problemas. Se trabaja con más de una longitud de onda, creando así longitudes de onda sintéticas. También se utiliza el método del unwrapping[4]. Otra forma de solventar

estas ambigüedades, y que puede ser vista como consecuencia del método de creación de longitudes de onda sintética, es trabajar con una fuente de luz policromática.

Este trabajo, plantea un análisis de la información topográfica que se codifica en las curvas de igual color en los interferogramas de luz blanca. No sobran herramientas que ayuden a la visualización topográfica a partir de un interferograma. Esto se puede hacer de manera poco detallada, interesante e intuitiva, o con una mayor exactitud pero con el manejo de la gran cantidad de información que aparece en las franjas de color de un interferograma de luz blanca.

Se presenta un problema interesante: ¿Cómo a partir de una percepción, como lo es el color, se puede deducir información topográfica de una superficie bajo estudio?. Desde hace tiempo, se ha relacionado el color con gran cantidad de variables físicas[5]: El PH de una solución, la temperatura de un cuerpo, la luminosidad de una fuente de luz. De aquí que, se realicen estudios de la composición espectral del color y de su percepción, como por ejemplo, para la reproducción de fuentes de luz artificiales que se asemejen a la Luz Día, pruebas de calidad del petróleo o del azúcar refinada, el color de franjas que se utilizan para medir esfuerzos en un material, o la determinación de la cantidad de hemoglobina en la sangre.

Estos análisis basados en el color, se pueden realizar destacando cualidades del color en escalas que determinen su brillo o saturación, pero en otros casos se requiere mucha más precisión para especificarlo, de aquí que haya la necesidad de estandarizarlo y así se pueda asegurar la transmisión de la información del color sin ambigüedades.

El diagrama de cromaticidad de la C.I.E. -Comisión Internationale de L'Eclairage- ha sido utilizado como un medio estándar que permite asociar la percepción visual

de un color con una gran cantidad de observables físicos de interés. Además, se utiliza como una guía para calibrar dispositivos que tengan que ver con el color: escáner, impresora, cámara digital o una pantalla de televisión [6][7].

El lugar ocupado dentro del diagrama de cromaticidad de la C.I.E. por los colores que se producen por la interferencia de dos frentes onda planos de luz blanca que interfieren con diferentes retardos, posteriormente, puede ser utilizado para hacer una calibración que permita asociar las diferentes alturas –retardos- que conforman la topografía de algunas superficies, con el color.

Siguiendo el modelo de color X,Y,Z de la C.I.E. para la percepción humana, también se hace posible una representación bidimensional del color para cualquier otro dispositivo receptor - una cámara digital basada en CCD, tubos fotomultiplicadores, etc.- el cual también podrá ser calibrado para posteriormente obtener información de carácter topográfico.

Se puede calibrar la respuesta de los sensores de color de cualquier dispositivo de acuerdo a la respuesta visual del ojo humano, ganando con ello el trabajar con un formato estándar de color –el del observador estándar definido por la C.I.E.- en esta área aparecen muchos trabajos donde se pone de manifiesto un gran número de complejidades. También se puede hacer una calibración independiente para cada dispositivo, sin embargo, la ambigüedad del color sea en el ojo humano o en cualquier otro dispositivo sensor siempre estará presente y debe por tanto ser tenido en cuenta.

El hecho de que el color provenga de la densidad espectral de la fuente de iluminación, la respuesta espectral de la superficie iluminada y la respuesta del detector hacen del problema de calibración algo demasiado amplio, por lo se debe restringir a ciertas características o parámetros específicos que sean de utilidad.

La estructura del presente trabajo consta de las siguientes partes: En el capítulo I, se expone la teoría general del color y se realiza una aplicación de la misma, para encontrar el espacio geométrico que ocupan los colores espectrales dentro del diagrama de cromaticidad. En el capítulo II, se realiza una aplicación de la teoría del color a un proceso específico de interferencia con luz blanca, se tiene en cuenta un modelo de interferencia a dos ondas sin respuesta espectral de la superficie. Aquí también se realizan una serie de simulaciones en las que se analizan algunos resultados de la teoría del color expuestos en el capítulo I, además, se encuentra el lugar que ocupan los colores de un interferograma con luz blanca de una superficie llana, dentro del diagrama de cromaticidad. En el capítulo III, se obtiene un perfil de las alturas que corresponden a cada uno de los colores de las franjas de un interferograma de luz blanca de un espejo patrón. Aquí se exponen algunos inconvenientes, consecuencia del proceso de adquisición de la imagen y del procesado de la misma. En el capítulo IV, se dan las pautas para solucionar los inconvenientes anteriores y se proponen un algoritmo para determinar un perfil de alturas a partir de los interferogramas de algunas superficies de interés. Finalmente, se realizan algunas conclusiones y recomendaciones para el mejoramiento del algoritmo.

1. EL MODELO DE COLOR

Se debe hacer un breve resumen de la teoría básica del color que sirva como guía del presente proyecto. Un desarrollo más completo se presenta en el libro de Wright[5]. Un punto de vista más moderno y con un buen análisis matemático, se presenta en el libro de Sharma[8].

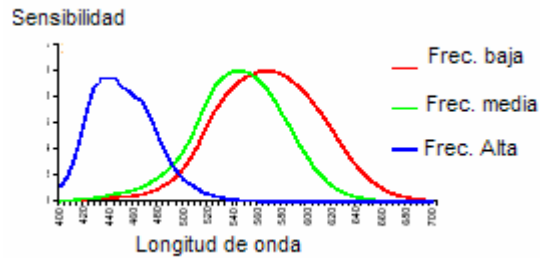
1.1. COLORIMETRÍA BÁSICA

1.1.1. La tricromaticidad

Una de las características de la visión que tiene su fundamento en la fisiología del ojo humano, y en particular de la respuesta de los conos al espectro visible -se encuentran tres tipos de respuestas bien diferenciadas a frecuencias ópticas altas, medias y bajas- se puede deducir que la percepción de un conjunto de colores puede ser ajustada mediante un estímulo luminoso que corresponda a una combinación de tres fuentes con colores diferentes¹. Hay que dejar en claro que este enunciado no asegura que con estas tres fuentes se puedan reproducir todos los colores perceptualmente visibles. La escogencia de fuentes de luz roja, verde y azul, asegura el ajuste de un mayor número de colores. En la figura 2, se puede apreciar la respuesta de los diferentes tipos de conos en el rango de luz visible.

¹ La característica de estos colores es muy importante, dadas tres luces, ninguna de ellas puede conseguirse como una combinación de las otras dos.

Figura 2 Respuesta espectral de los tres tipos de conos en el ojo humano.

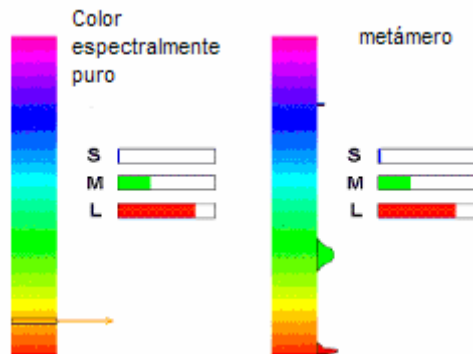


Fuente: Autor

1.1.2. Metamerismo

Dos estímulos que perceptualmente correspondan al mismo color, pueden tener densidades espectrales totalmente diferentes, la figura 3, da un ejemplo gráfico del significado de este fenómeno.

Figura 3 Ejemplo de dos densidades espectrales diferentes que corresponden a un mismo color.



Fuente: Autor

La definición de colores metaméricos se hace importante ya que deja de existir una relación uno a uno entre la densidad espectral de una fuente de luz y su color. Este fenómeno no solo es propio del ojo humano, si no que también aparece en la percepción del color de cualquier dispositivo, por ejemplo, una cámara CCD podría arrojar el mismo resultado en tensión asociado a diferentes combinaciones de intensidades de luz roja, verde y azul. Una cantidad física que se esté

relacionando con el color percibido por la cámara puede tener una magnitud totalmente diferente y sin embargo corresponder al mismo color.

1.1.3. La definición de un observador estándar

La percepción de un color depende de la fisiología del órgano visual de cada persona. Para evitar ambigüedades y tener acuerdos sobre medidas de cantidades físicas relacionadas con el color, hay que relacionarlo con cantidades no ambiguas y establecer un acuerdo entre estas medidas, de aquí que, se requiera una cantidad fácilmente cuantificable relacionada con el color y la definición de un observador estándar.

Ya que el color perteneciente a una parte del espectro visible, puede ser especificado en términos de sus valores triestímulo -una superposición de las tres luces que lo generan- lo primero que se necesita, es definir las luces con respecto a las cuales estos valores serán establecidos.

Ajustando los colores espectrales -los colores definidos por una única longitud de onda- con una combinación de los tres colores elegidos, se puede demostrar que todas las posibles combinaciones de colores obtenidas mediante colores espectrales, también quedan especificadas por una combinación de las tres luces.

1.1.4. Las curvas de ajuste de la C.I.E.

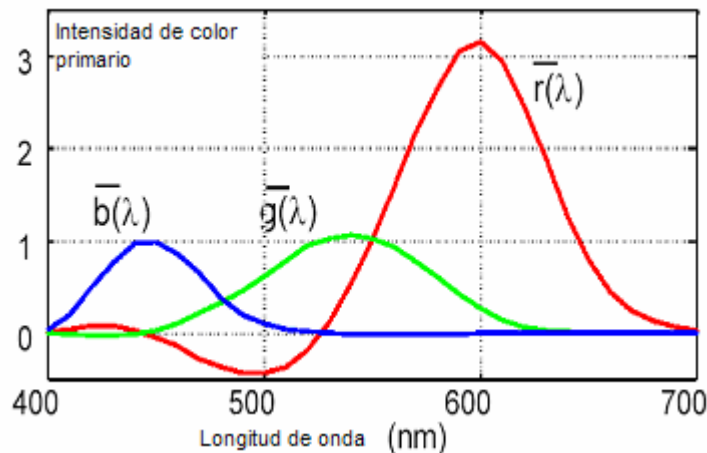
La C.I.E. en 1931, definió un observador estándar en cuanto al color, proveyendo dos tablas diferentes. La primera ajusta los colores con fuentes de luz roja, verde y azul, o RGB, con longitudes de onda de 700.0, 546.1 y 435.8nm respectivamente[5].

La distribución de coeficientes en esta tabla, da las intensidades de cada fuente de color requeridos para su ajuste, por ejemplo, para un color espectral de longitud

de onda λ , que quede expresado como $q(\lambda)=c_1R+c_2G+c_3B$; los coeficientes o pesos son c_1 , c_2 y c_3 .

El sistema RGB es un sistema apropiado para definir la mezcla de colores de un observador estándar, pero presenta el problema de que algunos colores espectrales deben ser ajustados con pesos o coeficientes negativos. La figura 4, muestra como los colores que tienen longitudes de onda alrededor de 500nm no pueden ser generados mediante estas tres luces ya que se requieren cantidades de luz roja negativa.

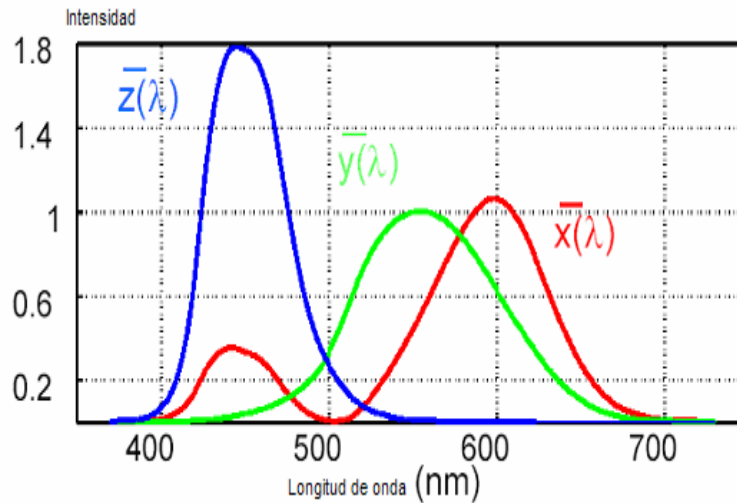
Figura 4 Curvas de ajuste de colores espectrales con las luces primarias R,G,B de la CIE.



Fuente: Autor

La C.I.E. entonces, toma como referencia una segunda tabla con los colores XYZ que corresponden a colores no reales. Así, un color se puede especificar como $q(\lambda)=aX(X)+b Y(Y)+c Z(Z)$, en donde para todo el ancho espectral los coeficientes son positivos. Dado un color, debe existir un cambio de coordenadas entre los sistemas RGB y XYZ.

Figura 5 Curvas de ajuste de colores espectrales con las luces primarias X,Y,Z de la CIE.



Fuente: Autor

1.1.5. El diagrama de cromaticidad de la CIE

Debido a que una representación en tres dimensiones de los colores no es tan intuitiva, como en el momento de trabajar con los colores en un proceso de segmentación de color, se define una representación en dos dimensiones denominada diagrama de cromaticidad. Del diagrama de cromaticidad se deducen las coordenadas de un color, y diferentes propiedades de la mezcla entre ellos, como por ejemplo:

Un color que resulte de la mezcla de dos colores espectrales -los cuales forman la frontera de diagrama de cromaticidad- cae dentro de la línea recta que los une.

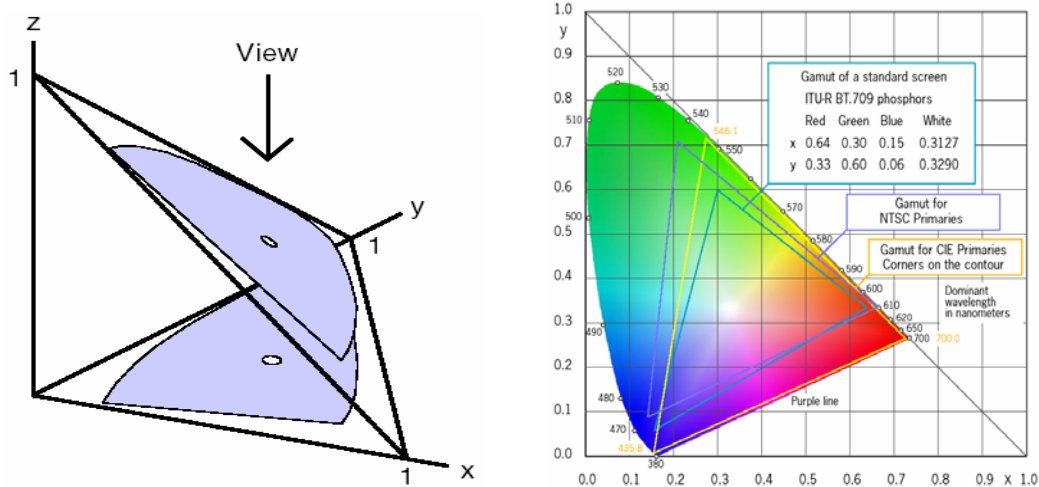
Cualquier color perceptualmente visible, estará dentro de los límites de diagrama de cromaticidad, independiente de su densidad espectral

Los colores perceptualmente no visibles quedan fuera de la frontera del diagrama de cromaticidad.

La especificación de las coordenadas espectrales de un color –el lugar ocupado en el diagrama de cromaticidad- proveniente de un estímulo, puede ser calculado

a partir de las curvas de distribución y la composición espectral del estímulo. Estas coordenadas también pueden ser medidas directamente con un colorímetro si sus fotodetectores presentan sensibilidades espectrales análogas a las curvas de ajuste.

Figura 6 (a) Normalización del espacio de colores XYZ al plano $X+Y+Z=1$, (b) diagrama de cromaticidad.



Fuente: <http://www.fho-empden.de/~hoffmann/cielab03022003.pdf>

En la figura 6 se muestra el lugar ocupado por los colores espectrales ajustados a las luces X, Y y Z dentro del respectivo espacio tridimensional y el subespacio plano que ocupa después del proceso de normalización, a su lado, el diagrama de cromaticidad.

Hasta aquí, lo que se ha hecho es llevar toda la información contenida en un color perceptible a dos coordenadas, obviamente, con la pérdida de información respectiva. Este procedimiento realizado para el ojo humano se puede realizar con cualquier otro dispositivo. Una cámara CCD envía primero la información de un color a tres tensiones R, G y B; luego se puede normalizar para obtener las dos coordenadas.

1.2. CÁLCULO DE LAS COORDENADAS DE UN COLOR

Surge la siguiente pregunta: ¿Cuales son las coordenadas cromáticas que corresponden a una distribución espectral de luz incidente $f(\lambda)$ sobre la retina?², aquí λ representa la longitud de onda.

La respuesta de los conos ante el estímulo con distribución espectral $f(\lambda)$ puede ser modelada por tres componentes [8]:

$$c_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_i(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

como se puede observar el mecanismo de respuesta de los conos c_i , corresponde a la proyección del espectro $f(\lambda)$ sobre el espacio de las tres funciones de sensibilidad $S_i(\lambda)$.

Este modelo puede tener en cuenta que la luz proviene de la reflexión sobre una superficie que es iluminada con una distribución espectral $P(\lambda)$, así $f(\lambda)$ quedaría dividida entre la densidad espectral $P(\lambda)$ de la fuente luminosa y la respuesta de la superficie bajo observación, $\beta(\lambda)$ ³:

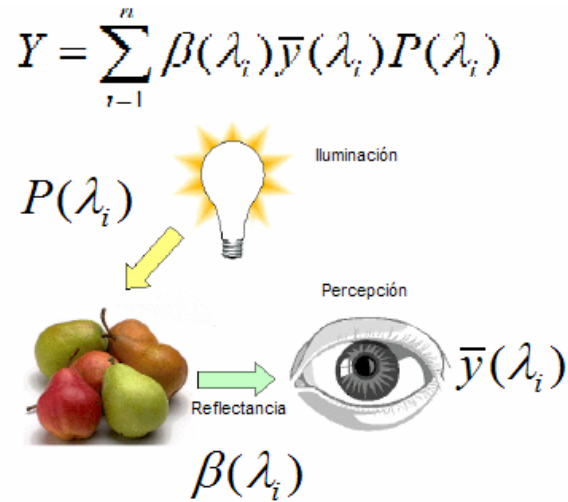
$$c_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_i(\lambda) P(\lambda) \beta(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

La figura 7 ilustra el modelo general de color que se expone en este apartado: en este caso Y es la coordenada tricromática correspondiente a la sensación del color que percibiría un observador estándar.

² Lo que se diga aquí para el ojo humano, también es válido para cualquier otro mecanismo de detección del color.

³ Una discusión mas en detalle acerca de la respuesta espectral de la superficie se encuentra en http://www.CS.Berkeley.EDU/~kobus/research/publications/camera_characterization/

Figura 7 Proceso de obtención de la coordenada cromática Y.



Fuente: Autor

En general, el procedimiento para derivar la especificación del color de un estímulo C a partir de su composición espectral $P(\lambda)$ en el sistema C.I.E. utiliza un modelo similar al anterior:

$$\xi_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \bar{\xi}_i(\lambda) P(\lambda) \beta(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

donde ξ_i representa la coordenada tricromática y $\bar{\xi}_i$ los respectivos valores triestímulo definidos por la C.I.E, para cada una de las luces. En el anexo A, aparecen el conjunto de valores triestímulo definidos por la C.I.E. en 1931 para el ajuste de los colores espectrales con las luces X,Y,Z.

Para obtener una versión normalizada de las coordenadas, se definen unas nuevas:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (6)$$

ya que $x+y+z=1$, quedan solo dos coordenadas independientes y cada color se puede mapear en un espacio de dos dimensiones formando el diagrama de cromaticidad.

La versión en forma discreta de la ecuación (3) para las coordenadas tricromáticas es:

$$X = \sum_{i=1}^n \beta(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) P(\lambda_i) \quad (7)$$

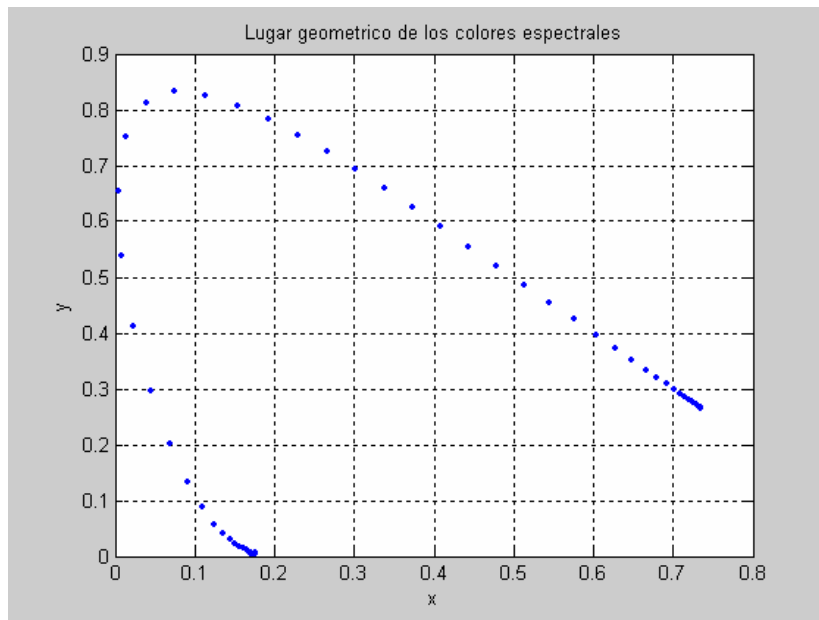
$$Y = \sum_{i=1}^n \beta(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) P(\lambda_i) \quad (8)$$

$$Z = \sum_{i=1}^n \beta(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) P(\lambda_i) \quad (9)$$

Para una superficie blanca de referencia tal como el óxido de magnesio, donde β (λ_i) es aproximadamente igual para toda λ_i , el color observado por un observador estándar, estaría únicamente dado por la respuesta óptica de sus ojos y la distribución espectral de la fuente de iluminación.

Es fácil realizar un ejemplo de aplicación de este último conjunto de ecuaciones, que consiste en determinar el lugar geométrico que ocuparían los colores espectrales en el diagrama de cromaticidad, esto genera la frontera de todos los colores perceptibles por el ojo humano. En el apéndice B se describe en detalle un programa sencillo en Matlab que genera la figura 8. Los puntos que aparecen en esta figura corresponden a los colores cuyas longitudes de onda van desde los 360nm, el primer punto del extremo derecho-rojos-, hasta los 830nm último punto del extremo izquierdo-azules-. Los colores son tomados cada 5nm, de acuerdo a la información de la tabla suministrada en el apéndice A.

Figura 8 Colores espectrales en el diagrama de cromaticidad



Fuente: Autor.

2. APLICACIÓN DEL MODELO DE COLOR A LOS PROCESOS DE INTERFERENCIA CON LUZ POLICROMÁTICA

2.1 INTRODUCCIÓN

Como ya se mencionó en la introducción, existen diferentes cantidades físicas que se asocian con el color. En la figura 9, sacada del libro de Wrioth[5], se muestran dos ejemplos específicos: el primero corresponde a la ubicación de los colores en el diagrama de cromaticidad de pintura blanca a la que se le añaden pigmentos metálicos de bronce en diferentes concentraciones, el segundo, corresponde a los colores que presenta la sangre con diferentes niveles de hemoglobina. Un medidor de color debidamente calibrado podría asociar una pareja ordenada –coordenadas cromáticas- a cada una de estas dos cantidades.

Figura 9 Ejemplos de aplicación del diagrama de cromaticidad

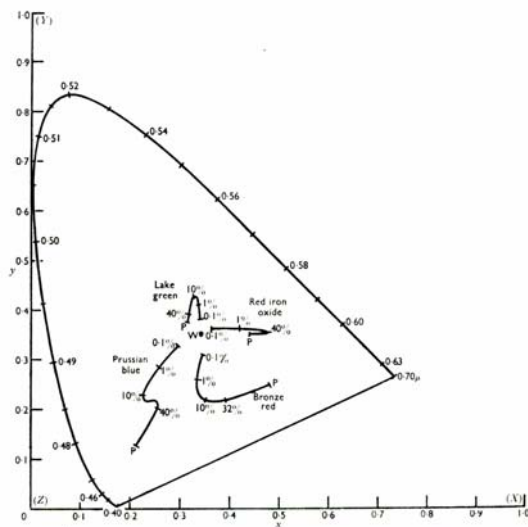


FIG. 84. The change in chromaticity of bronzing pigments when mixed with a white pigment and mounted in silicon-ester medium. The figures against the curves give the percentage of bronzing pigment in the mixture, starting from the pure colour P. The white illuminant is indicated by W (Paint Research Station)

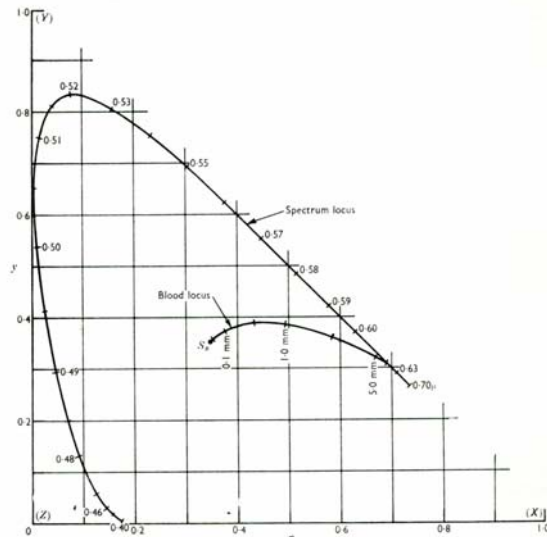
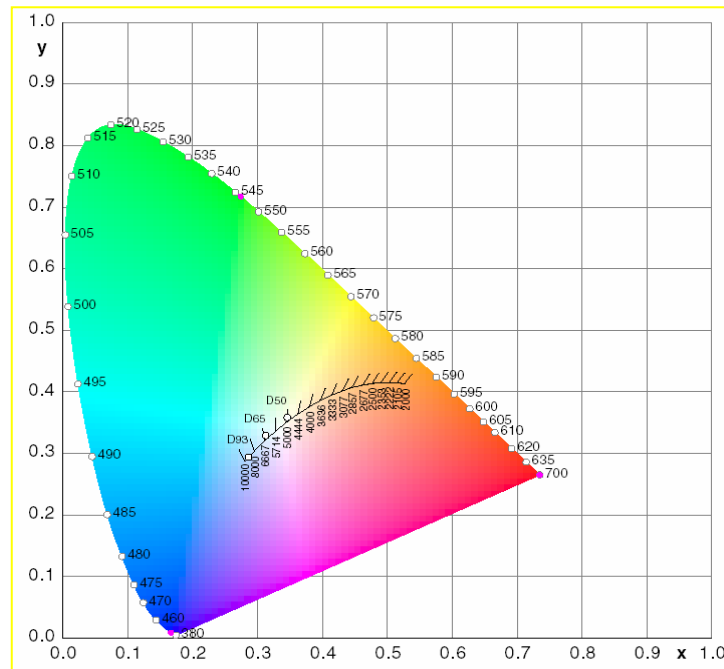


FIG. 97. The locus in the chromaticity chart of blood chromatocities for different thicknesses of blood using the illuminant S_B . The thicknesses of the haemoglobin layers are shown against the blood locus

Fuente: Wrioth[5].

Otro ejemplo interesante, lo constituye lo que se denomina el lugar ocupado por el color asociado a la radiación de un cuerpo negro que se encuentre a una determinada temperatura, como se muestra en la figura 10.

Figura 10 Color de la radiación de un cuerpo negro.



Fuente: <http://www.fho-empden.de/~hoffmann/cielab03022003.pdf>

En el mismo libro de Wrigth, aparece ya la caracterización del espesor de películas delgadas por medio del lugar ocupado en el diagrama de cromaticidad por los colores producidos en el proceso de interferencia. Un ejemplo de estas mismas características se muestra en la figura 11, que fue sacada del libro de Pluta[9]. Allí aparece una caracterización del espesor de películas delgadas de acuerdo al color observado por un observador estándar en un experimento de birrefringencia con polarizadores cruzados.

2.2 SIMULACIÓN DE LOS COLORES PRODUCIDOS EN UN PROCESO ESPECÍFICO DE INTERFERENCIA CON LUZ POLICROMÁTICA.

El color asociado al interferograma que se produciría cuando se trabaja con frentes planos de luz policromática, se determina a partir de la suma de las

intensidades resultantes con cada una de las longitudes de onda que componen el frente, luego de que cada una de estas intensidades ha sido modulada de acuerdo a la diferencia de camino óptico. Este proceso de determinación de intensidades, se realiza en forma individual para cada longitud de onda, debido a que cada una de ellas no interfiere mas que consigo misma.

Figura 11 Color observado en películas delgadas de diferente espesor.

TABLE 1.8
Scale of interference colours [1.31]

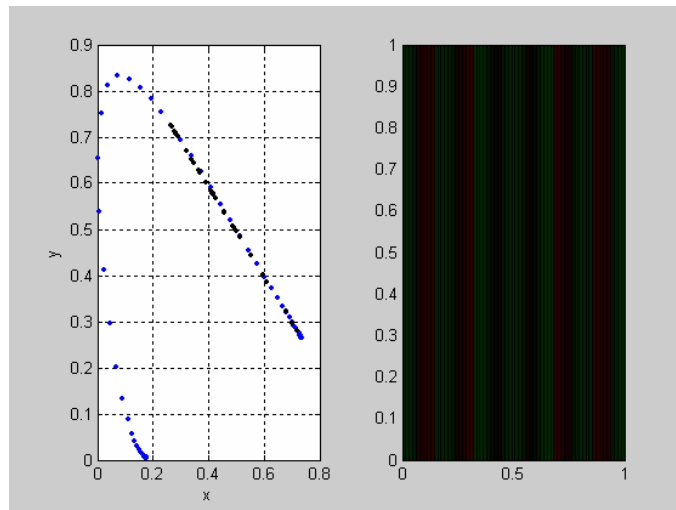
Optical path difference Δ [μm]	Interference colours of thin films	
	In reflected light	In transmitted light
	Interference colours of polarized light	
	Between crossed polarizers	Between parallel polarizers
0.000	Black	Bright white
0.040	Iron-grey	White
0.097	Lavender-grey	Yellowish white
0.158	Greyish blue	Brownish white
0.218	Clearer grey	Brownish yellow
0.234	Greenish white	Brown
0.259	White	Light red
0.267	Yellowish white	Carmine
0.275	Pale straw-yellow	Dark reddish brown
0.281	Straw-yellow	Deep violet
0.306	Light yellow	Indigo
0.332	Bright yellow	Blue
0.430	Brownish yellow	Greyish blue
0.505	Reddish orange	Bluish grey
0.536	Red	Pale green
0.551	Deep red	Yellowish green
0.565	Purple	Lighter green
0.575	Violet	Greenish yellow
0.589	Indigo	Golden yellow
0.664	Sky-blue	Orange
0.728	Greenish blue	Brownish orange
0.747	Green	Light carmine
0.826	Lighter green	Purplish red
0.843	Yellowish green	Violet-purple
0.866	Greenish yellow	Violet
0.910	Pure yellow	Indigo
0.948	Orange	Dark blue
0.998	Bright orange-red	Greenish blue
1.101	Dark violet-red	Green
1.128	Light bluish violet	Yellowish green
1.151	Indigo	Dirty yellow
1.258	Greenish blue	Flesh colour
1.334	Sea-green	Brownish red
1.376	Diamond green	Violet

Fuente: Libro de Pluta[9].

2.2.1 Dos y tres longitudes de onda

Si se trabaja con un tren de ondas conformado por dos longitudes de onda λ_1 y λ_2 , hay que tener en cuenta que únicamente las ondas que tengan la misma frecuencia podrán producir el fenómeno de interferencia. Sobre una superficie determinada, la luz de longitud de onda λ_1 formará su patrón de interferencia individual, al igual que la luz de longitud de onda λ_2 . Ambos patrones son mutuamente incoherentes y se superponen únicamente en intensidad.

Figura 12 Simulación de interferencia con luces espectrales roja (640nm) y verde(546nm).



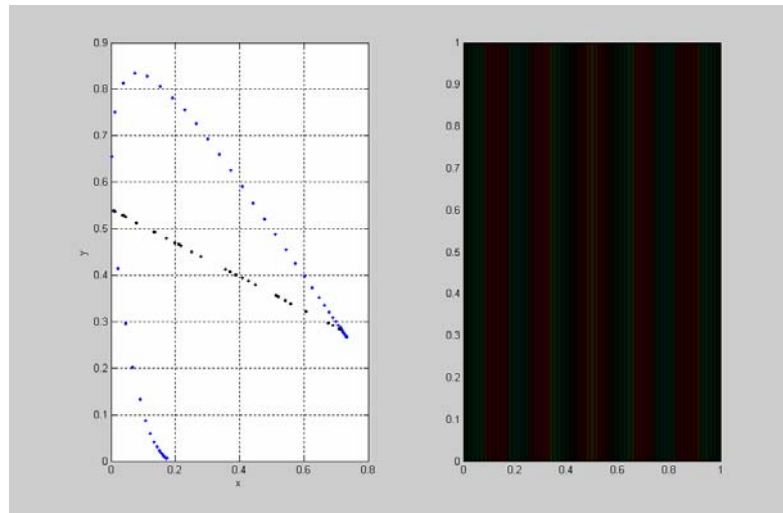
Fuente: Autor

En la figura 12, se puede observar el conjunto de colores que se obtendría con dos longitudes de onda, una roja de 640nm y la otra verde de 546 nm, aplicando el modelo de color de la CIE a una superficie con respuesta espectral plana, como se explicará con más detalle en el apartado de *interferencia con luz blanca*. De acuerdo a las reglas que deben cumplir los colores dentro del diagrama de cromaticidad, se pueden obtener únicamente colores que se encuentren a lo largo de la línea que los une, como se verifica en la figura.

Una diferencia de camino óptico equivalente al mínimo común múltiplo entre las longitudes de onda, repetiría un nuevo patrón de franjas de la misma configuración, esto daría lugar a la creación de longitudes de onda sintética que tienen la ventaja de discriminar cambios abruptos en la topografía de una superficie superior a $\lambda/2$ de cada uno de los colores participantes. Cada franja, corresponde a una gama de colores, la cual se compone de diferentes intensidades de los dos colores λ_1 y λ_2 , este principio constituye el fundamento de la interferometría phase-shifting a dos longitudes de onda[4].

Realizando una mejor “elección” de las dos longitudes de onda, se pueden obtener franjas con una gama de colores más discernibles por el ojo humano-mayor contraste-. En la figura 13, se puede apreciar que en el contacto óptico -raya central- se obtiene un color claro, producto de haber elegido dos longitudes de onda cuya gama de colores logra pasar cerca del centro del diagrama de cromaticidad donde se encuentran los “blancos”, que son en general los “colores” que se obtienen cuando todos los pesos son iguales en intensidad.

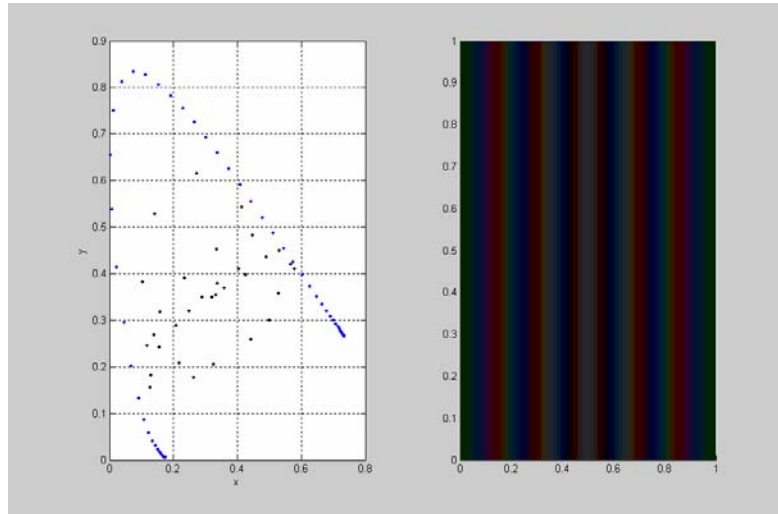
Figura 13 Simulación de interferencia de mayor contraste al ojo humano con luces espectrales roja (640nm) y verde (500nm).



Fuente: Autor

Ya con tres colores, las coordenadas ocupan ya no una línea, como en los dos ejemplos anteriores sino, una superficie dentro del diagrama de cromaticidad como se muestra en la figura 14.

Figura 14 Simulación de interferencia con tres luces espectrales: roja (600nm), verde (510nm) y azul (480nm).



Fuente: Autor

2.2.2 Trabajo con luz blanca

2.2.2.1 marco teórico

En un experimento de interferencia con luz blanca por división de amplitud, como el típico interferómetro de Michelson, para cada uno de los retardos entre los dos frentes, se obtiene un color que corresponde a una distribución espectral que es función de este retardo. Suponiendo igual división de amplitud, los pesos de cada color que son proporcionales a $P(\lambda)$ en la ecuación 3, quedan definidos por:

$$I = 4a^2 \cos^2(\psi / 2) \quad (10)$$

donde la diferencia de fase ψ correspondiente a una diferencia de camino óptico recorrido Δ es:

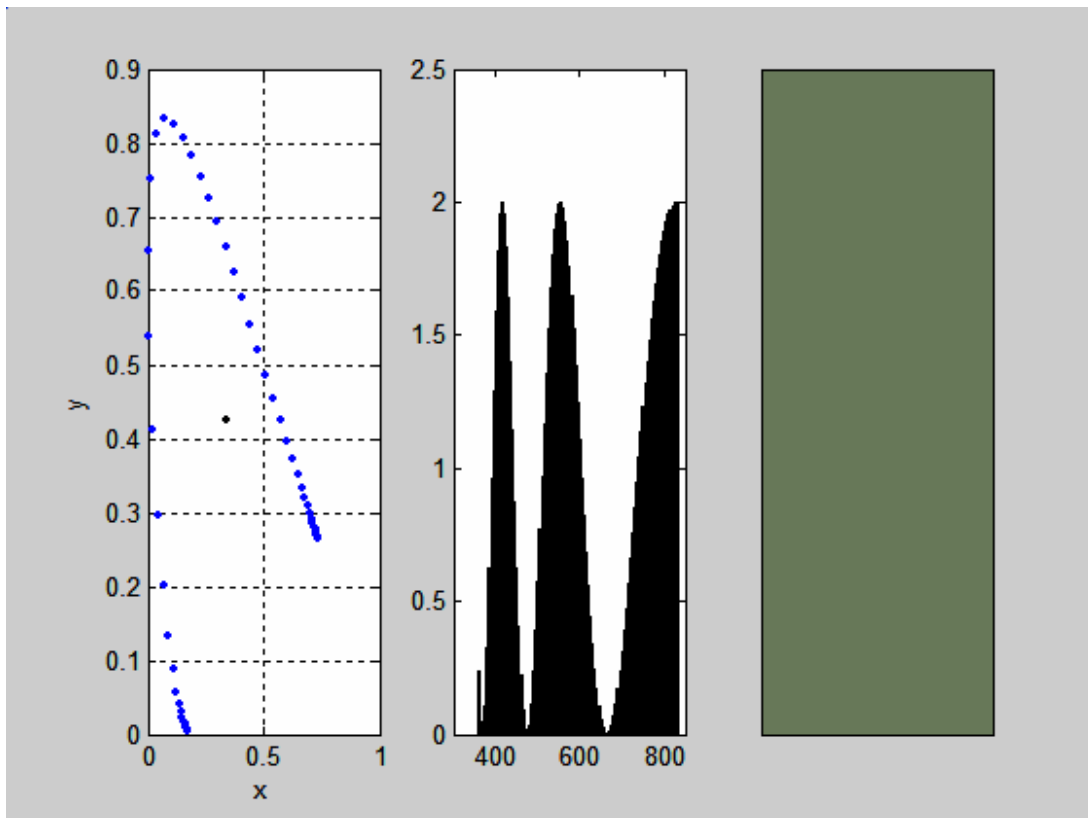
$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \quad (11)$$

Cada color tiene sus respectivas coordenadas cromáticas de acuerdo con las ecuaciones 7,8 y 9, que junto con las ecuaciones 10 y 11 son las básicas para las simulaciones que fueron realizadas. Fundamentalmente, para cada longitud de onda de las que componen un frente de onda particular, se calcula la diferencia de fase ψ para una diferencia de camino óptico determinado, mediante la ecuación 11. Esta información, es introducida en la ecuación 10 para determinar el peso $P(\lambda)$ con el que contribuye cada color espectral a las coordenadas de tricromaticidad, definidas en las ecuaciones 7, 8 y 9. Este proceso se repite para cada una de las diferencia de camino óptico Δ .

En la figura 15, se muestra una de las gráficas de una de las simulaciones donde se supone el frente de onda incidente compuesto por colores espectrales que van desde los 360nm hasta los 840nm. Aparece de manera simultánea la posición del color en el espacio cromático-lado izquierdo-, su distribución espectral para una diferencia de camino óptico determinado -parte central- y, la sensación óptica que debería ser vista por un observador estándar-lado derecho-.

Como se sabe, la gama de colores que es capaz de desplegar una pantalla es menor que la que es visible al ojo, por esto, los colores desplegados no son del todo “verdaderos” pero si una buena aproximación -el problema de la calibración del monitor-. El programa en Matlab® con el que son generadas estas simulaciones, aparece en el apéndice C. Una parte del programa hace uso de unas rutinas previamente cargadas que se encargan de leer la calibración de cada uno de los cañones y ajustar el error al mínimo al desplegar el color.

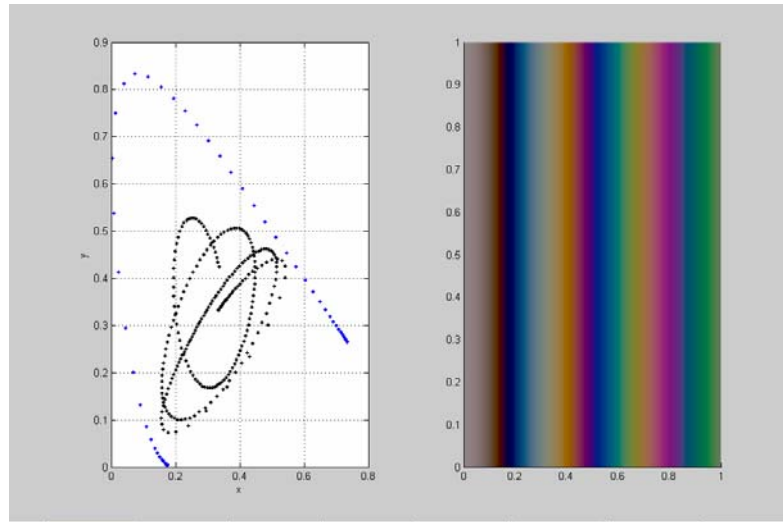
Figura 15 Un resultado del programa de simulación que aparece en el apéndice C.



Fuente: Autor

De acuerdo a la teoría anteriormente mencionada, como a cada diferencia de camino óptico corresponde un color, la topografía de una superficie ocupará un espacio geométrico dentro del diagrama de cromaticidad. Teniendo una curva cromática calibrada se puede decodificar automáticamente un interferograma de color en altura. En la figura 16, se tiene un ejemplo del lugar geométrico que ocuparía una superficie plana inclinada dentro del diagrama de cromaticidad utilizando el proceso de simulación.

Figura 16 Simulación del lugar geométrico ocupado por los colores en un proceso de interferencia con luz blanca sobre una superficie plana y colores esperados.



Fuente: Autor

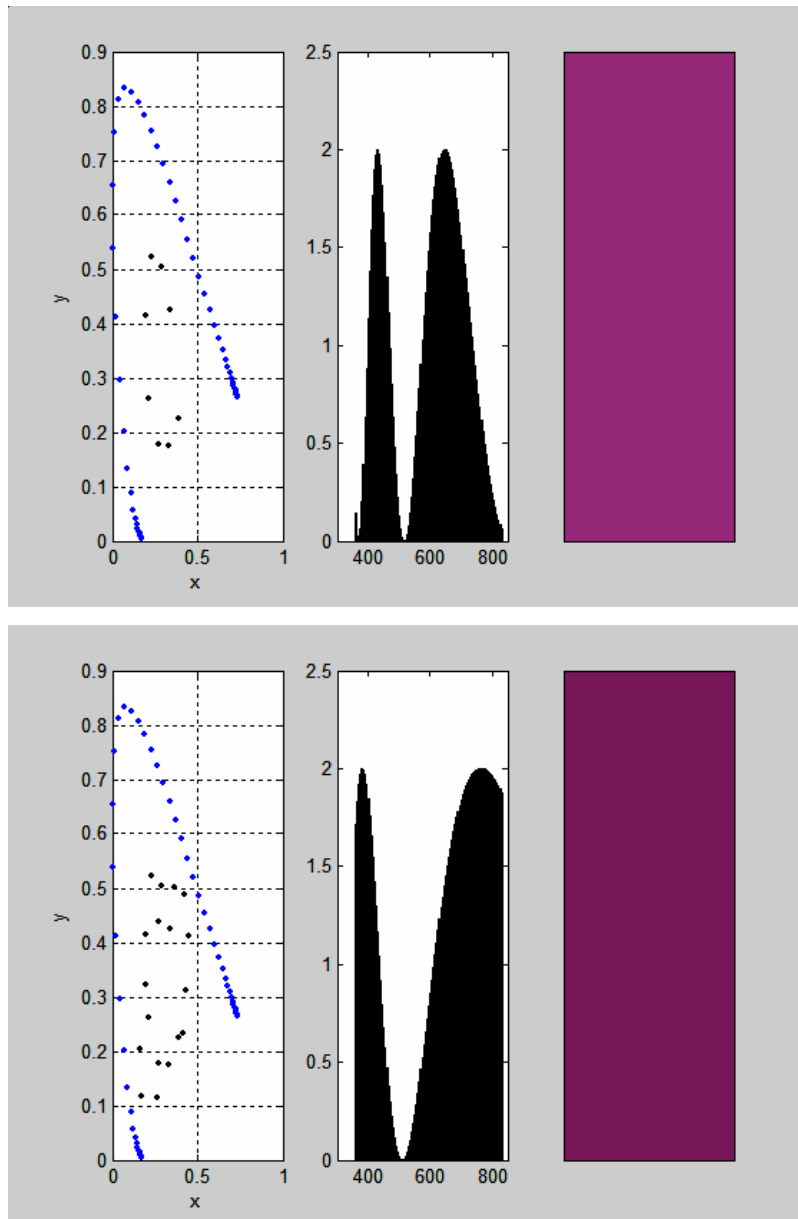
De la figura 16 se pueden sacar varias conclusiones:

Dentro de un rango de alturas determinado-diferentes diferencias de camino óptico- aparecen puntos de intersección que corresponden a las mismas coordenadas cromáticas y por lo tanto a la misma sensación visual. Esto no significa en ningún momento que dichas sensaciones tengan una distribución espectral idéntica. Por ejemplo, para un frente constituido con n longitudes de onda, una diferencia de camino óptico equivalente al mínimo común múltiplo de ellas, es quien determina la repetición de una distribución espectral idéntica. Debido al fenómeno de metamerismo de la visión, según el cual, diferentes distribuciones espectrales pueden generar el mismo color, las intersecciones en la figura 16 corresponden a un mismo color, pero a una distribución espectral diferente.

Si se tiene calibrada la curva de la figura 16 en altura, los metámeros determinarían una altura particular característica. En la figura 17 se aprecia un ejemplo del fenómeno de metamerismo del color sacado mediante la simulación,

en donde se observa en la parte central pesos muy diferentes y sin embargo al lado izquierdo aparece la misma sensación visual.

Figura 17 Simulación del fenómeno de metamerismo del color.



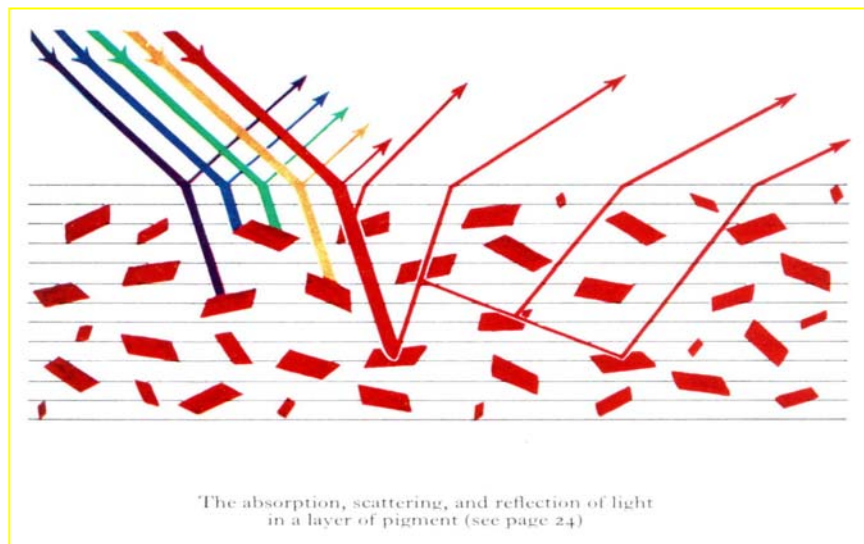
Fuente: Autor.

Cada que se aumenta la profundidad respecto al contacto óptico, se genera una nueva vuelta en el diagrama de cromaticidad, pero el ancho se hace más pequeño. Los colores tienden a converger, volviéndose cada vez menos

saturados, exactamente a como sucede fuera de la longitud de coherencia de la fuente utilizada por lo que la visibilidad de las franjas disminuye.

La simulación aquí realizada, contiene el modelo más sencillo: interferencia a dos ondas y respuesta espectral plana de la superficie. El modelo se puede complicar tanto como se desee, teniendo en cuenta la respuesta espectral de la superficie del material, su rugosidad; la distribución espectral de la fuente, el número de frentes de onda que interfieren, la respuesta cromática del detector y, el ángulo de visión. La figura 18 puede dar una idea de estos grados de complejidad.

Figura 18 Superficie con respuesta espectral y múltiples interferencias.



Fuente: Libro de Wright[5]

Al momento ya de la realización de un algoritmo de reconstrucción topográfica que asocie cada color con su altura correspondiente, comienzan a aparecer diversos inconvenientes, ya que el mismo color aparece por encima y por debajo del contacto óptico. Salvo en contornos cerrados, esto se puede solucionar teniendo en cuenta un ordenamiento en los colores, luego de asignarles una dirección, de izquierda a derecha por ejemplo.

En un estudio de superficie en microscopía interferencial con luz blanca, la cámara de adquisición de imágenes puede ser calibrada en color de acuerdo a la

respuesta de sensibilidad espectral del ojo humano, actualmente existen muchos estudios de calibración de dispositivos cuya especificación del color sea estándar⁴. Sin embargo, se puede realizar una calibración particular –con sus respectivos inconvenientes- para cualquier dispositivo de sensado de color.

Las tres tensiones R, G, y B adquiridas por una cámara a color, pueden ser calibradas en altura y normalizadas a dos dimensiones siguiendo el modelo de color X,Y,Z de la C.I.E. , se logra una visualización directa de la superficie en el espacio cromático de la cámara que debe ser independiente de la intensidad.

2.2.2.2 Conclusiones

En resumen:

Cuando se trabaja interferometría con dos o más longitudes de onda, nace un nuevo ordenamiento de franjas correspondientes a colores producto de la superposición de intensidades de los colores individuales, que ayudan a desdoblarse ambigüedades cuando la superficie tiene cambios en altura superiores a $\lambda/2$.

Se presenta dificultad con los colores metaméricos, ya que no se puede asociar un color con una altura, este es un problema que se presenta en cualquier dispositivo de detección de color incluyendo el ojo humano. Sin embargo estos pueden ser utilizados y calibrados para producir un “nuevo orden de interferencia”.

Una de las dificultades cuando se trabaja interferometría con luz blanca es la interpretación de los colores en el interferograma. Debido a la ambigüedad del color se hace necesario estandarizarlo. El modelo de color de la CIE, permite asociar cada color del interferograma con un punto en el espacio cromático. El estudio del lugar ocupado por los colores de una superficie en cuña que se tome

⁴ Una discusión mas en detalle acerca del proceso de calibración de la cámara en colores estándar se puede encontrar en:

http://www.CS.Berkeley.EDU/~kobus/research/publications/camera_characterization/

como referencia, permite calibrar los colores en altura para luego poder hacer reconstrucción topográfica de superficies, este trabajo se puede efectuar calibrando los sensores de acuerdo a las curvas de ajuste de la C.I.E. con lo que queda el color estandarizado, o se puede realizar una calibración particular para cada dispositivo de adquisición de color.

3 MONTAJE EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA ASIGNACIÓN DE COLORES CON ALTURAS

3.1 INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

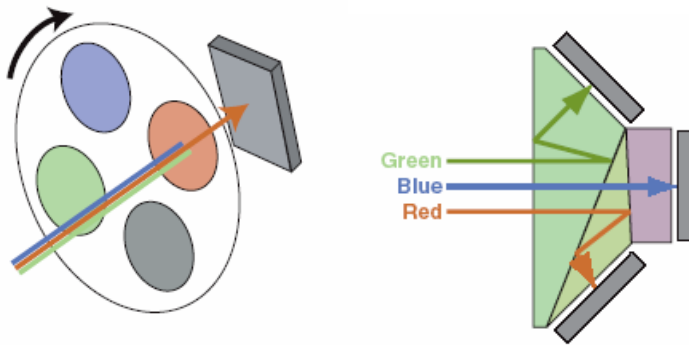
Es indispensable conocer algo acerca de la procedencia de las coordenadas R, G y B en un dispositivo de captación de imagen, en capítulos anteriores, se mencionó ya brevemente la teoría que define las coordenadas cromáticas para un estímulo de excitación luminoso que reciba el ojo humano. Aquí también se describe la influencia y caracterización de las superficies reflectantes sobre la señal que registra el detector.

3.1.1 Respuesta de los sistemas de captura de imagen.

Existen en general dos tipos de cámaras a color CCD. Aquellas que utilizan un sensor de imagen y tres filtros de color: rojo, verde y azul -cámaras de mosaico- y las de tres sensores -Cámaras 3CDD- en donde un arreglo de prismas descompone la luz proveniente de la imagen en sus componentes roja verde y azul que son detectadas por sensores individuales. La figura 19 muestra el fundamento básico de este tipo de cámaras.

En las cámaras 3CCD, la localización de la muestra en cada sensor es la misma dentro de ciertos rangos de tolerancia, pero en las cámaras de mosaico, la información que llega a cada sensor es interpolada con la de sensores adyacentes [10]. Este último problema se convierte en un inconveniente cuando se quiere asociar un color espectral con una altura determinada, ya que deja de existir una relación uno a uno entre la respuesta de cada sensor y el color asociado a esta altura. Este problema aparece también en cámaras de alta resolución -gran cantidad de sensores por unidad de superficie- sobre todo en los cambios de color que suceden en fronteras bien definidas de la imagen.

Figura 19 Cámara de mosaico y cámara 3CCD.



Fuente: libro de Russ[10]

La respuesta de los sistemas de captura de imagen ρ a una señal $L(\lambda)$, asociada con un píxel se puede modelar como:

$$\rho = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad (12)$$

Donde $R(\lambda)$ es la respuesta espectral del píxel. En la respuesta del píxel, influyen varias características del funcionamiento de la cámara: la influencia debida a la apertura del diafragma, la longitud focal, y la posición del píxel en el plano focal. Si se desea hacer una buena calibración de la cámara, estos parámetros deben ser ajustados de la mejor forma posible.

En este trabajo - capítulo 4- se realiza brevemente un análisis de la variación en la respuesta de los píxeles a lo largo de un perfil de la imagen cuando son sometidos a una misma señal, pero se determina una mayor influencia en la respuesta debido a variaciones en la intensidad de la fuente de iluminación. Aquí, hay que de nuevo recordar que la información de brillo puede ser ignorada cuando se realiza un proceso de normalización como el que ocurrió con la definición de las coordenadas de cromaticidad. Lo que se desea es adjudicar coordenadas cromáticas independientemente de las variaciones de intensidad, siempre y cuando la densidad espectral de la fuente no se vea alterada.

Como ya se mencionó en el primer capítulo, el modelo de respuesta asumido en la ecuación 12, es también asumido para el sistema de visión humano y forma la base para la colorimetría estándar de la CIE. El conjunto de simulaciones hechas en el capítulo dos se basaron en este modelo.

El modelo asumido en la ecuación 12 para la respuesta de un píxel ante un estímulo luminoso, determina que el proceso de captura de imágenes proyecta un vector de un alto espacio dimensional -la densidad espectral del estímulo- en un espacio con dimensión $N=3$ -una dimensión para cada filtro de color- obviamente, hay gran pérdida de información y recuperar el espectro a partir de la respuesta del sistema de visión no es posible. Además, hay que recordar que este modelo tiene en cuenta que diferentes densidades espectrales pueden tener exactamente la misma respuesta del sensor.

3.1.2 La influencia y la caracterización de las superficies.

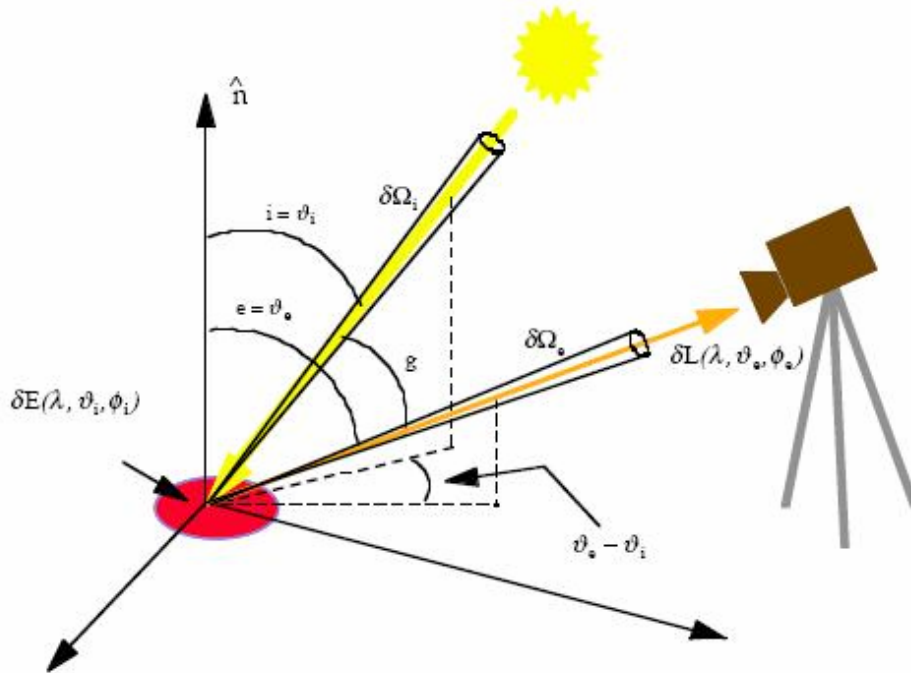
Con luz proveniente de un proceso de reflexión sobre superficies, la señal de entrada en el sensor $L(\lambda)$, es el resultado de la densidad espectral del iluminante $E(\lambda)$, con la interacción en la superficie.

Se define la reflectancia de una superficie como la razón entre la luz reflejada y la luz incidente. Esta razón depende de una gran cantidad de factores: la dirección de la iluminación respecto de la superficie, la dirección de la cámara respecto de la superficie, la polarización de la luz al interaccionar con la superficie. Estos son parámetros que no dependen de las características en sí -forma y tipo de material- de la superficie.

La señal proveniente de un pedazo de superficie iluminada por una fuente extendida esta dada por:

$$L(\lambda, \nu_c, \phi_c) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\lambda, \nu_i, \phi_i, \nu_c, \phi_c) E(\lambda, \nu_i, \phi_i) \cos \nu_i \sin \nu_i d\nu_i d\phi_i \quad (13)$$

Figura 20 Parámetros geométricos y ópticos que influyen en el estímulo que excita el sensor.



Fuente:

http://www.CS.Berkeley.EDU/~kobus/research/publications/camera_characterization/

donde $f(\lambda, \nu_i, \phi_i, \nu_c, \phi_c)$ se define como la función de reflectancia bidireccional BDRF, ya que tiene en cuenta los ángulos de la fuente de iluminación y la cámara. En la figura 20 se muestra en forma gráfica los parámetros principales que influyen en las características del estímulo luminoso que excita el detector.

Esta función de reflectancia es inapropiada cuando se trabaja con superficies fluorescentes, ya que en estas se absorbe energía de una longitud de onda y se emite parte de esa energía en otras longitudes de onda. Una función de reflectancia que tenga en cuenta este fenómeno podría tener la siguiente forma:

$$f(\lambda_i, \lambda_o, \nu_i, \phi_i, \nu_c, \phi_c) \quad (14)$$

con λ_i las longitudes de onda absorbidas por el material y λ_o las longitudes de onda reflejadas mediante el fenómeno de fluorescencia. También en la función de reflectancia se podría incluir la polarización como un parámetro.

Como la BDRF es función de tres o cuatro parámetros geométricos, su medida es complicada. El modelo mas simple de la BDRF es una constante. Esto corresponde a una reflexión perfectamente difusa. Así aparecería igual brillo independientemente de la dirección del punto de visión. Si no hay pérdidas -la respuesta espectral de la superficie es la misma para todas las longitudes de onda incidentes-, entonces la BDRF es constante, como el caso analizado en el capítulo 2 para el óxido de magnesio. El que un modelo como este sea adecuado o no en la práctica, depende del análisis que se desee realizar sobre un tipo de superficie en particular. También algunas variables geométricas se pueden fijar como parámetros, como por ejemplo fijar la superficie en incidencia normal respecto a la fuente de iluminación.

Existen varios modelos del proceso de reflexión en superficies, hay modelos de reflectancia que tienen en cuenta principalmente dos procesos: la luz reflejada en la interfaz y la luz que entra en el substrato y luego es reflejada por dispersión en el material⁵.

Para la mayoría de materiales no metálicos la reflexión en la interfaz es poco dependiente de la longitud de onda y así la luz reflejada tendrá el mismo espectro del iluminante. Los procesos de dispersión que conducen a la reflexión del cuerpo son normalmente dependientes de la longitud de onda.

⁵ la teoría básica de este apartado fue extractada de

http://www.CS.Berkeley.EDU/~kobus/research/publications/camera_characterization/

Los metales no tienen reflexión de cuerpo y la reflexión en la interfaz depende de la longitud de onda, lo que explica los colores de los metales tal como el oro y la plata. También aquí se pueden separar los detalles espectrales de los netamente geométricos.

La rugosidad de la superficie afecta la reflexión especular. Se utiliza la óptica física y la óptica geométrica para determinar la respuesta de la superficie. La óptica geométrica produce muy buenos resultados cuando los detalles de la superficie son grandes comparados con la longitud de onda.

De todo lo anteriormente mencionado, se deduce que se deben hacer modelos para analizar la dependencia de la densidad espectral de un estímulo luminoso proveniente de un proceso de reflexión, aquí también juega un papel muy importante los modelos estadísticos.

3.2 EL MONTAJE

Para realizar el análisis de la extracción de topografía de una superficie a partir de los interferogramas de color que esta forma con luz blanca, se realizaron principalmente dos montajes: el primero, cuya finalidad era analizar la respuesta del pixelado ante cambios de intensidad en la lámpara de iluminación y el segundo para la adquisición de los interferogramas de la superficie de calibración y de medida.

En el primer montaje, para lograr una distribución uniforme de color sobre el plano del sensor, se iluminó uniformemente un cartón de color rojo patrón -también se utilizó cartón verde y azul- con dos lámparas cruzadas idénticas. Una de las lámparas ilumina el cartón de izquierda a derecha y la segunda al contrario. De esta forma, se logra que la parte iluminada del cartón que se capta con la cámara sea más uniforme que si se alumbrará con una sola lámpara desde una dirección determinada.

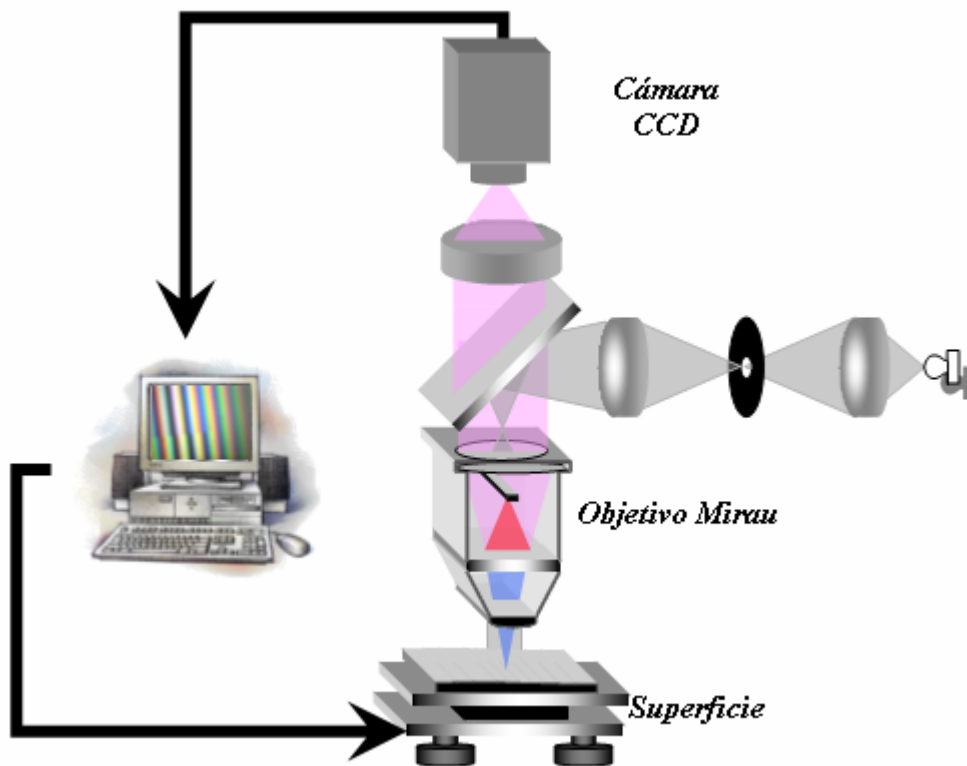
Para la obtención de los interferogramas, se utilizó un microscopio interferencial, cuya fuente de iluminación es una lámpara de incandescencia. Dos polarizadores cruzados permitieron un control continuo de la intensidad de iluminación. Para homogenizar la distribución de luz en el plano imagen se utilizó un vidrio esmerilado que actúo como dispersor. La creación de los frentes de luz interferentes, esta a cargo del objetivo Mireau del microscopio. El proceso de adquisición y registro de los interferogramas se hace mediante una cámara a color común conectada a un computador. El software encargado de la adquisición de las imágenes se basa en las librerías de la tarjeta de adquisición Matrox®. La figura 21 ilustra un esquema general del montaje.

Si se quieren comprobar los resultados de las simulaciones realizadas en el segundo capítulo, es necesario caracterizar la densidad espectral de la fuente de iluminación. En este trabajo, se procedió directamente a realizar la calibración color Vs altura en el espacio de color propio de la cámara en tres dimensiones. En particular en el capítulo 4, se encuentra el lugar ocupado por los colores de la superficie de calibración en dos dimensiones.

3.3 OBTENCIÓN DE UN PERFIL DE ALTURAS DE UNA SUPERFICIE PLANA DE UN ESPEJO

El propósito de este apartado es el de presentar un desarrollo general y directo que permita extraer un perfil de las alturas encontradas a partir del contacto óptico -nivel de referencia- en una superficie llana que pueda ser utilizada posteriormente como parámetro de calibración de las alturas presentes en la topografía de otras superficies. El perfil se obtiene por medio de las coordenadas de color RGB asociadas a cada una de las franjas de color que aparecen en el interferograma de luz blanca, las cuales son a su vez calibradas

Figura 21 Esquema general del montaje utilizado.



Fuente: Suarez Sanabria Miguel Angel, Clasificación de superficies basadas en propiedades de la compresión de imágenes, Tesis de maestría, UIS, 2001.

con el patrón de interferencia producido con una fuente de luz monocromática. La figura 22 detalla cada uno de los pasos para llevar a cabo este proceso:

1. A partir del patrón de interferencia obtenido del espejo, se traza un perfil desde el contacto óptico. Esto genera las componentes de color RGB asociadas a cada píxel en el perfil. Para trabajar con un menor número de datos, se obtiene del primer conjunto de colores una tabla de 64 colores. De acuerdo a una calibración hecha sobre la misma superficie con una luz monocromática, a cada tripleta en la tabla de colores -la cual tiene un índice de color- se le asocia una altura.

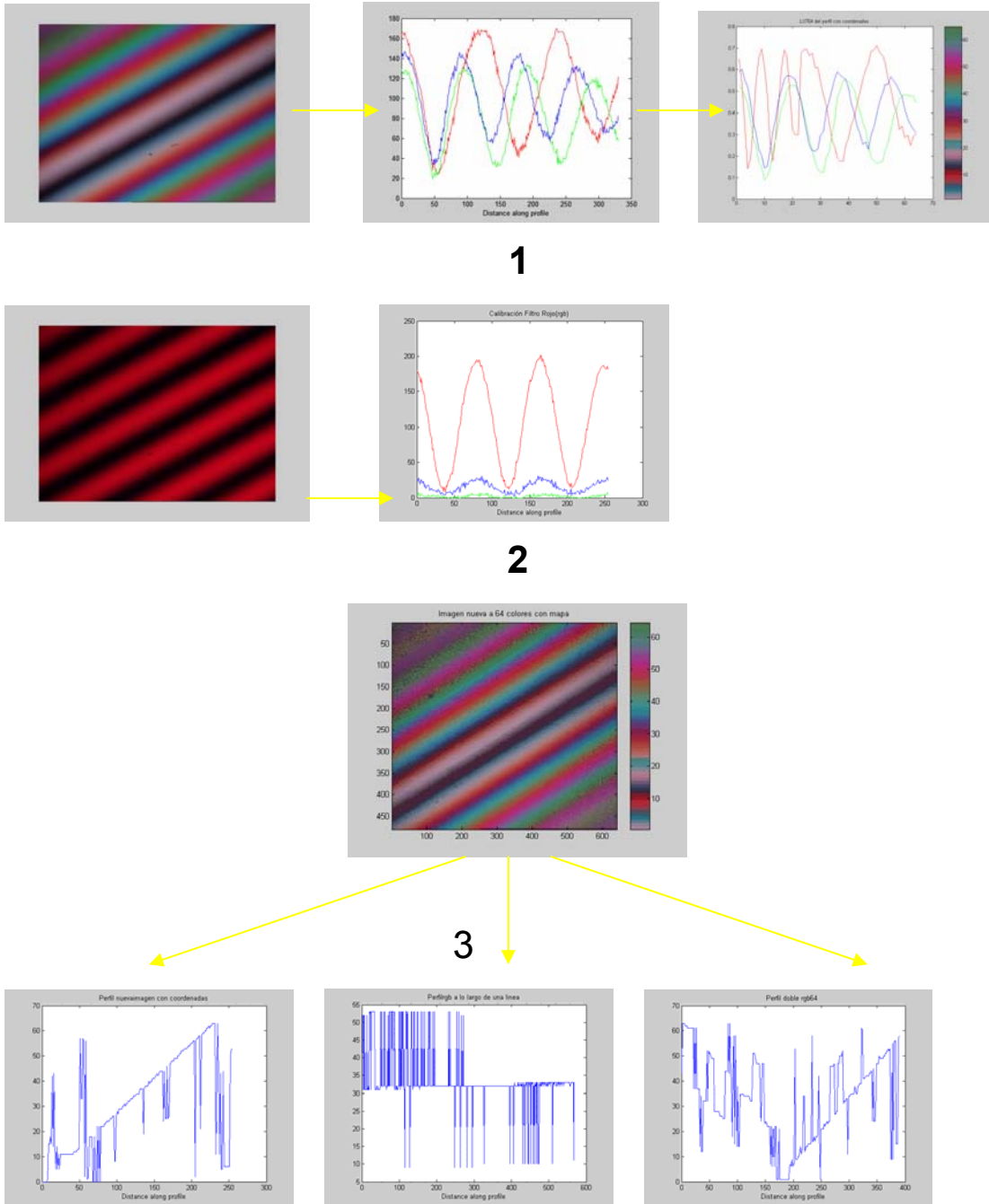
2. Cualquier imagen y su conjunto de colores, puede ser cuantizada a los colores de la tabla que se obtuvieron en el paso 1. Durante el proceso de cuantización aparece en forma natural ruido de cuantización lo que tiene como consecuencia el asociar gran cantidad de colores de la imagen real a un solo color dentro de la tabla, la relación color Vs altura de nuevo deja de ser uno a uno. El ruido de cuantización es inversamente proporcional al número de colores de la tabla. El proceso de cuantización de la imagen, tiene la ventaja de trabajar con una imagen de menor número de datos para posteriores procesamientos con la menor pérdida de información. Esta información puede estar asociada a la calidad visual de una imagen algo que no es necesario en este trabajo.

En este ejemplo sencillo se realiza el proceso de cuantización sobre la misma rampa de calibración. La figura que se obtiene es prácticamente la topografía de la superficie a 64 alturas, cada una de ellas asociada a un índice de color dentro de la tabla.

De aquí en adelante, lo único que se requiere es un buen algoritmo que asocie índices con alturas evitando algunos los degeneramientos de color. Se tiene ya con los índices un ordenamiento de franjas de color, el cual no se tendría con un interferograma monocromático en el que se desconozca el contacto óptico. Un buen algoritmo debe explotar esta ventaja sacando provecho del valor del índice y de sus variaciones: diferencias y gradientes.

En la literatura existen principalmente dos procesos de cuantización: la cuantización uniforme y la cuantización de varianza [11]. Aquí se utilizó el proceso de cuantización de varianza, sin embargo, pruebas realizadas con cuantización uniforme no arrojaron mejores resultados y presentaron los mismos problemas que se mencionan a continuación en el parágrafo 3.

Figura 22 Proceso de obtención de un perfil de alturas en una superficie llana.



Fuente: Autor

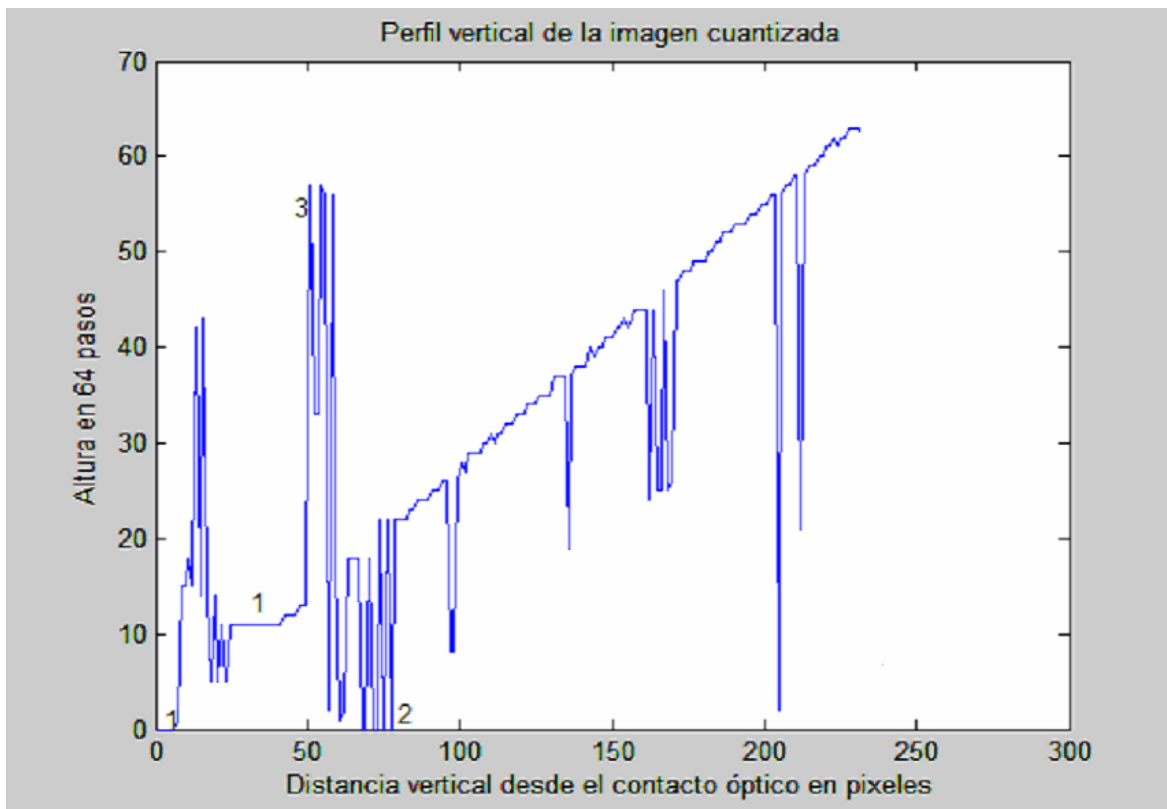
3. Aparecen problemas cuando se eligen perfiles de tipo horizontal y vertical. Se denomina aquí un perfil de tipo horizontal a un trazado a lo largo de una franja de "igual" color, y un perfil de tipo vertical a un trazado transversal a las mismas franjas. Estos problemas surgen principalmente durante el proceso de

adquisición de la imagen -promediado entre píxeles adyacentes- y por el ruido introducido en el proceso de cuantización de los colores.

Problemas sobre un perfil de tipo vertical, figura 23.

- En 1, el proceso de cuantización hace que en algunas partes del perfil no haya cambio en el índice de color aunque la altura vaya aumentando o disminuyendo.

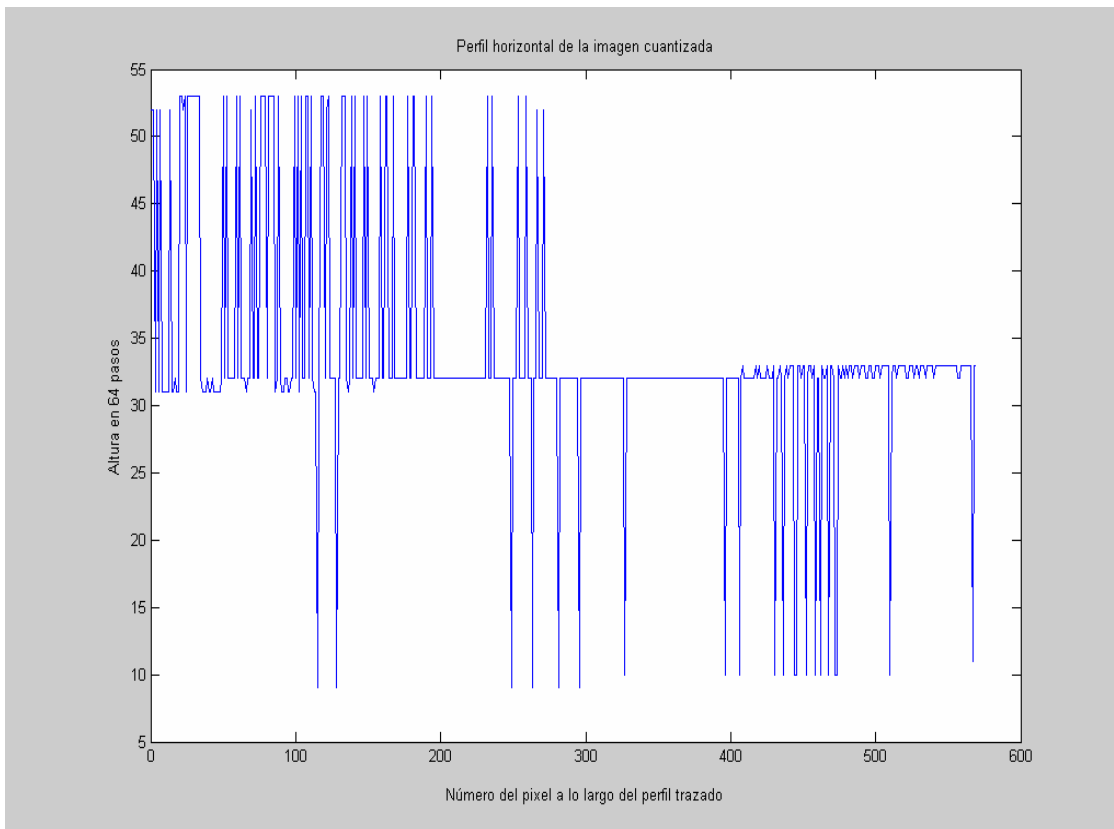
Figura 23 Problemas detectados en el trazado de un perfil vertical.



Fuente: Autor.

- En 2, el índice asociado al color presente en el contacto óptico se repite principalmente por el efecto de cuantización de los colores. También puede ser producto del metamerismo presente en la cámara o el promediado entre píxeles durante el proceso de adquisición de la imagen. En este caso eso es así, ya que la superficie –rampa- no repite alturas, la superficie se supone sin defectos puntuales y el trazado se realizó a lo largo de donde se escogieron los colores de calibración.
- En 3, efecto producido por la cuantización de los colores.

Figura 24 Problemas detectados en el trazado de un perfil horizontal.



Fuente: Autor.

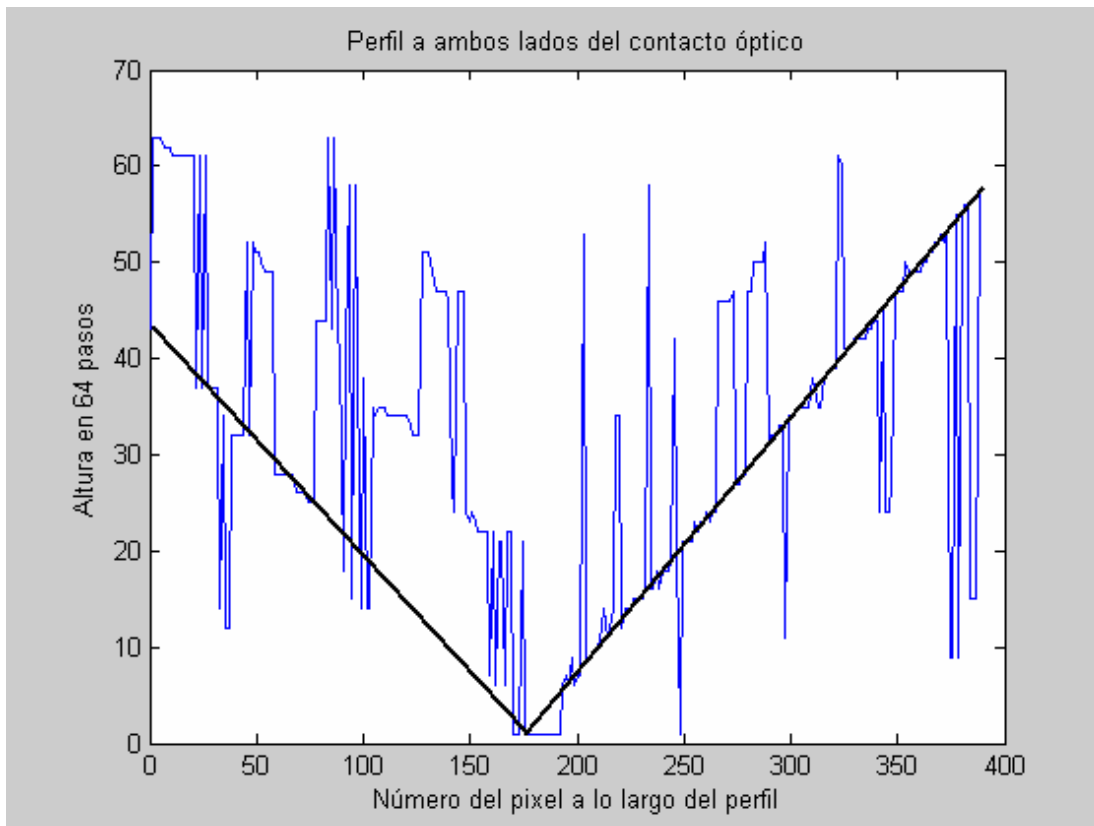
Problemas sobre un perfil de tipo horizontal, figura 24.

Debido a los dos problemas mencionados anteriormente y la variación en la intensidad -hay que recordar que se está trabajando sobre un espacio tridimensional- a lo largo de un perfil horizontal se presenta una especie de moteado, consecuencia de que el proceso de cuantización trata de emular el color asociado a una franja con combinaciones espaciales de varios colores.

Finalmente, en un perfil completo a ambos lados del contacto óptico, se evidencia la asimetría del interferograma alrededor del contacto. Al no asociarse los mismos colores, el proceso de cuantización hace que exista más disparidad en el patrón de alturas. Este mismo efecto sucedería si se trazara un perfil diferente al que se

eligió como patrón. Además, debido a que un mismo conjunto de colores aparece antes y después del contacto óptico, no se diferencia lo que está por encima y por debajo del mismo, sin embargo, existe una tendencia promedio en ambos lados. En la figura 25, se puede apreciar en una línea negra continua la tendencia que debería resultar como correcta.

Figura 25 Perfil vertical a ambos lados del contacto óptico.



Fuente. Autor.

Hasta aquí, se han mencionado algunos problemas relevantes al tratar de obtener un perfil de alturas de un interferograma de luz blanca, en el siguiente capítulo se plantearán algunas soluciones que hacen parte ya del buen procesado de la imagen y la elección de un algoritmo adecuado que tenga en cuenta el degeneramiento de los colores.

4 OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE ALTURAS DE LA SUPERFICIE PATRÓN Y UN ESCALÓN

Luego de determinar los principales problemas que se obtienen al tratar de asociar los colores que aparecen en un interferograma de luz blanca con su altura, en este capítulo, se determina una medida de la variación que se comete en una de las coordenadas de color cuando es alterada la intensidad de la fuente de iluminación, también su disminución cuando se trabaja en un espacio de color normalizado. Se muestran los colores que se obtienen con la cámara para diferentes diferencias de camino óptico en una superficie llana y el espacio que estos ocupan en el diagrama de color normalizado de la cámara. Posteriormente, se aprecia el efecto producido por un proceso de filtrado sobre un interferograma que ha sido previamente cuantizado, esto hace que disminuya el efecto de moteado producido por el ruido de cuantización. Luego, se desarrolla un algoritmo básico que asocia los índices de color de las franjas con las alturas que se obtienen a partir de un interferograma monocromático. Este algoritmo, evita mediante decisiones los degeneramientos de color-mismo color pero diferentes alturas-. Finalmente, se realiza un proceso completo donde se obtienen los perfiles de una superficie plana y de un escalón, y se evalúan los resultados.

4.1 EL EFECTO DE LAS VARIACIONES DE LA INTESIDAD DE ILUMINACIÓN

4.1.1 Variaciones en la coordenada R

Un primer experimento efectuado consiste en determinar la variación de la coordenada de color R, propia de la cámara, respecto al cambio en la intensidad de la fuente de iluminación. Para esto, se aplica una iluminación lo más uniformemente posible con lámparas cruzadas a un conjunto de patrones de color rojo, verde y azul. Un perfil del valor de estas coordenadas se muestra en la figura 26. A cada coordenada de color se le asigna un valor de 1 a 256, con es último valor como el de mayor intensidad. En la figura se detecta el cambio sucedido con

dos intensidades de iluminación diferente. Las intensidades se eligen de tal forma que sean “normales”, en el sentido de una cantidad de luz adecuada de trabajo que no llegue a un nivel de saturación -que supere el valor de 256- y que no sea tan baja que impida un trabajo cómodo.

Entre las dos intensidades, se aprecia una variación aproximada de 20 unidades. Si se va asociar un color con altura, las pequeñas variaciones en intensidad que podrían suceder en el experimento harían que se adjudique a una misma altura coordenadas diferentes. También en la figura se aprecian otras pequeñas variaciones debidas a la respuesta no uniforme de los píxeles en el plano imagen o a la no completa uniformidad en el patrón de color utilizado.

4.1.2 Efecto de la normalización de la coordenada R.

Si al variar la intensidad, las coordenadas RGB propias de la cámara variaran en una cantidad igual, Un proceso de normalización haría que estos cambios no se vean en las nuevas coordenadas, esto se puede ver directamente de la definición de la coordenada r:

$$r = \frac{\alpha R + \alpha G + \alpha B}{\alpha R} = \frac{R + G + B}{R} \quad (15)$$

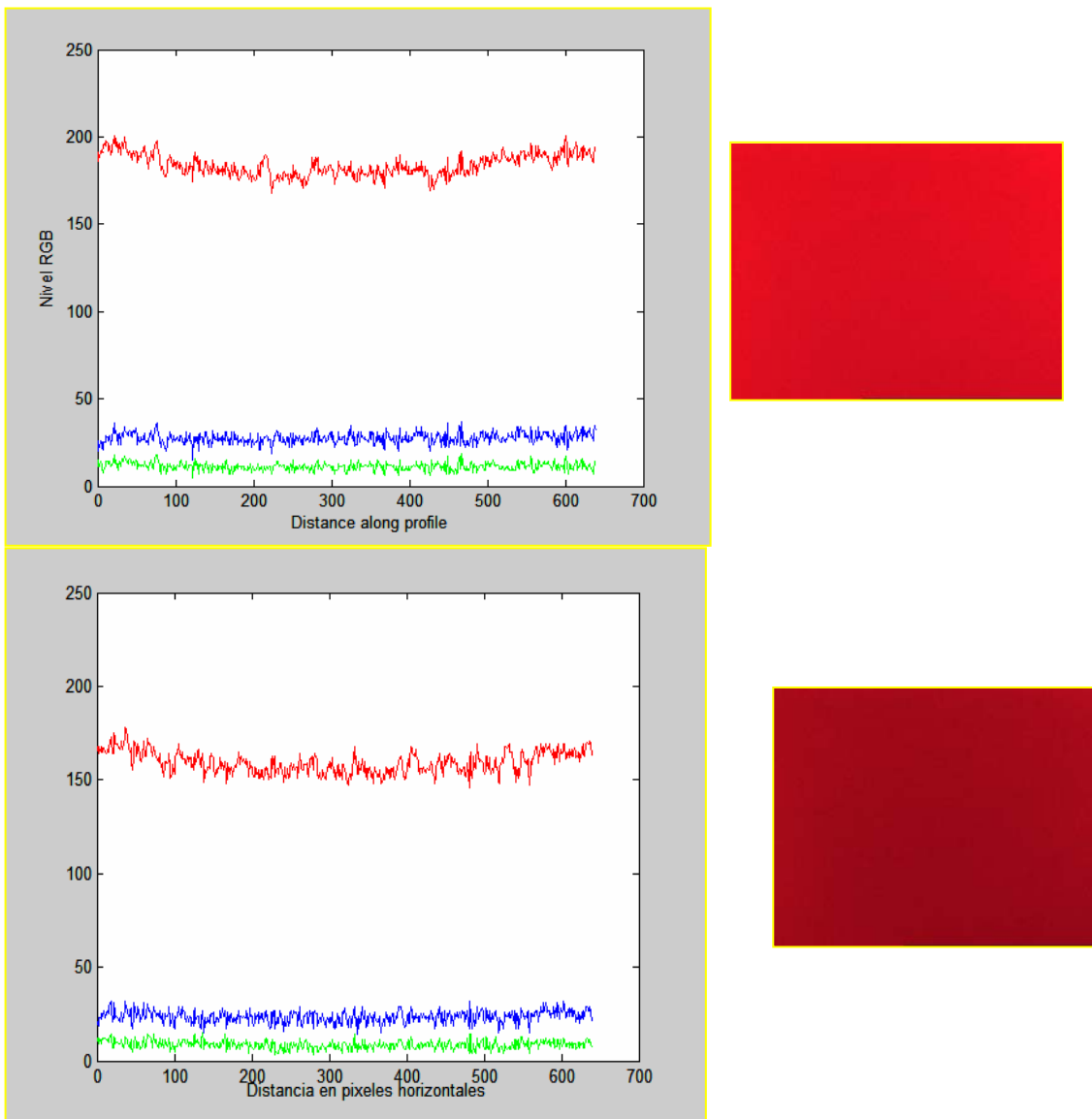
La figura 27 muestra la diferencia del valor de la coordenada r, entre los dos perfiles que anteriormente se obtuvieron sobre un patrón de color rojo variando la intensidad de la fuente, como se aprecia en la figura, en el peor de los casos los problemas debidos al cambio en la iluminación o a una iluminación no uniforme, no supera el 10% del valor de la coordenada, ya que las coordenadas están normalizadas a la unidad. Este porcentaje de error es importante tenerlo en cuenta en el momento que se desee realizar una cuantización de los colores en un diagrama de color bidimensional, como el que aparece en la figura 28.

4.1.3 Colores de una superficie llana en el espacio 2-D de la cámara

Si se desea cuantizar los colores del interferograma de una superficie llana de acuerdo a las alturas en un espacio dos dimensional, lo primero que se debe

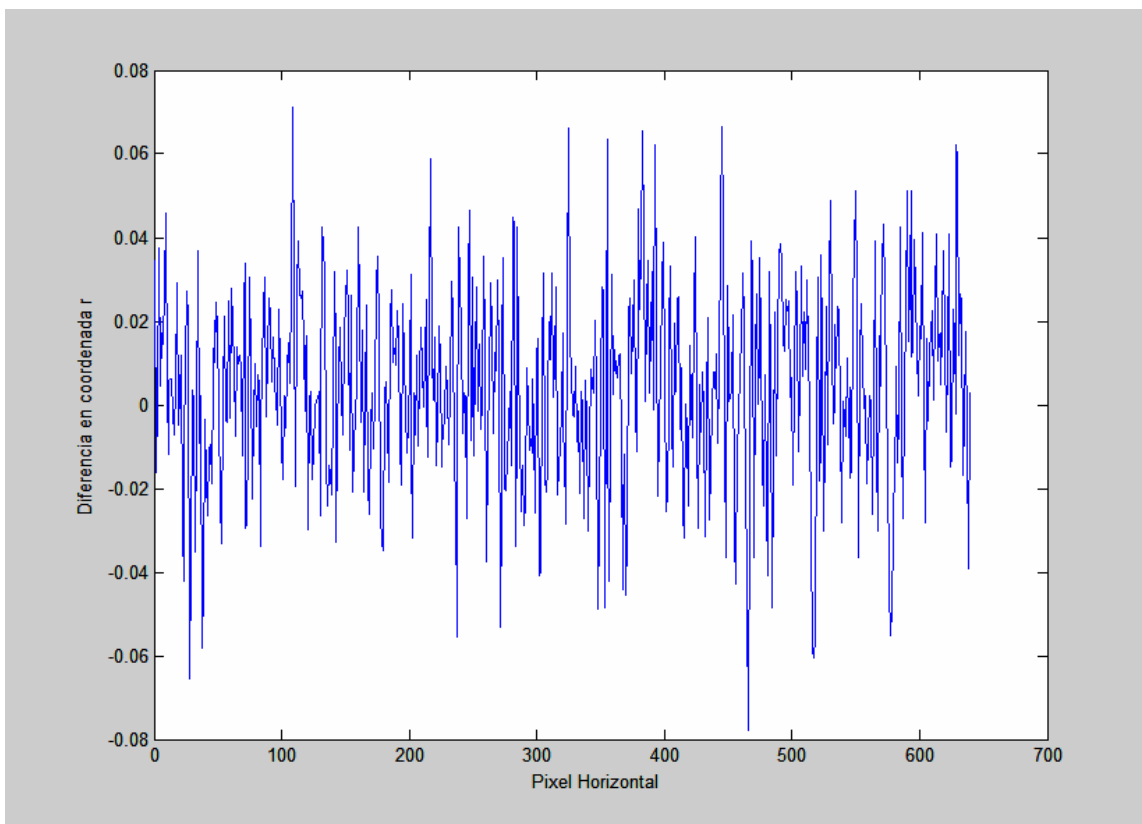
obtener es el lugar geométrico que ellos ocupan dentro de su espacio cromático. La figura 28 muestra este lugar, y en el anexo D aparecen los colores observados durante el experimento. Es interesante notar que las características primordiales de la trayectoria que siguen los colores desde el contacto óptico se conserva de acuerdo a los análisis realizados al final del capítulo 2 para colores estandarizados, esto no es raro, ya que la mayoría de las cámaras tienen respuestas espectrales que tratan de asemejar la del ojo humano.

Figura 26 Variación en la coordenada R de la cámara con el cambio en la intensidad de la fuente de iluminación.



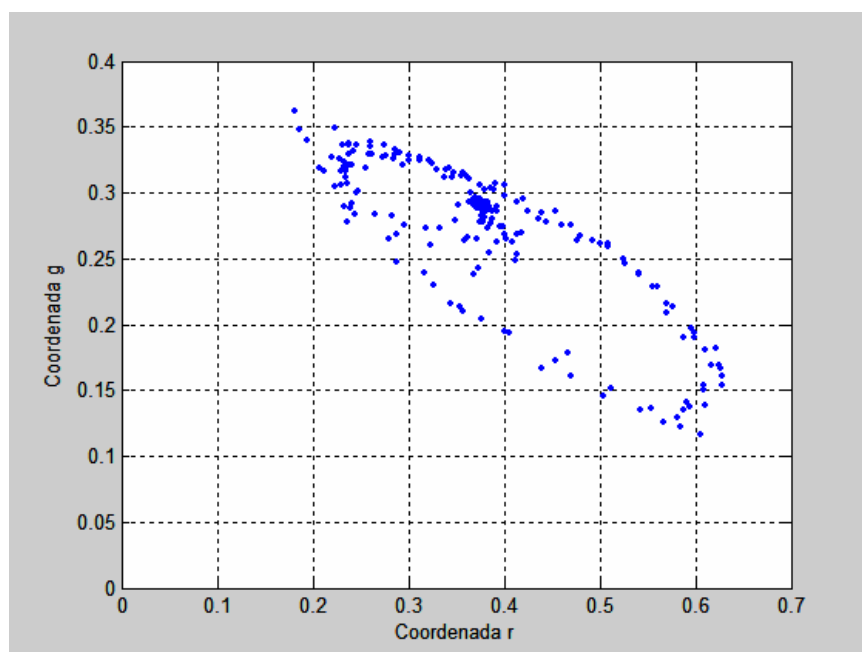
Fuente: Autor.

Figura 27 Diferencia en el valor de la coordenada normalizada r .



Fuente: Autor.

Figura 28 Lugar geométrico de los colores de un perfil del interferograma en una superficie llana en el espacio cromático propio de la cámara.



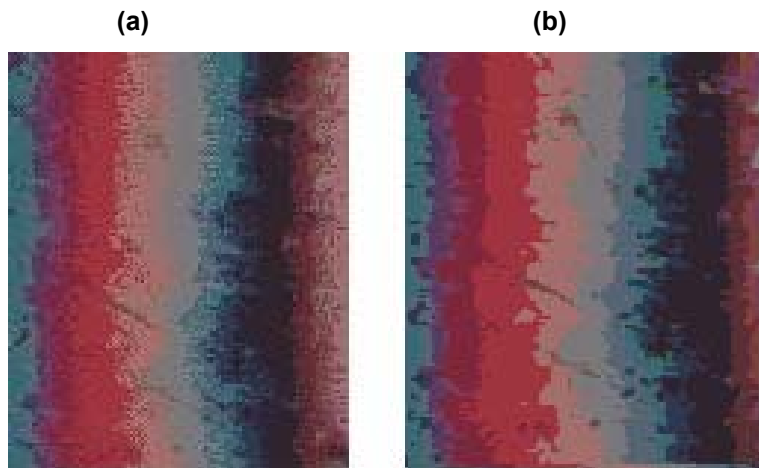
Fuente: Autor.

4.1.4 El efecto de la cuantización del color

Como ya se mencionó anteriormente, durante el proceso de adquisición de la imagen y la etapa de cuantización del color se introduce ruido de cuantización. Al crear una imagen con un número de colores menor que la original y no tratar de perder su apariencia, se simulan algunos colores de la imagen verdadera produciendo variaciones en la resolución espacial con los colores escogidos, haciendo que con un promedio se simule mejor el color verdadero. Esto hace que aparezca una especie de moteado -ruido de alta frecuencia- como se aprecia en la figura 29(a). Este proceso daña el perfil de alturas.

Para mejorar la asociación color-altura por este defecto, se realiza una etapa de filtrado ya sea de dilatación o erosión con los colores preponderantes en una región determinada del interferograma que sea de interés, esto mejora el moteado aunque daña la apariencia de la imagen, figura 29(b). Este proceso se realizó mediante la utilización de la opción “*dither*” que trae la función *imapprox* de Matlab®.

Figura 29 Ejemplo de un interferograma con ruido de cuantización(a) y efecto del filtrado(b)

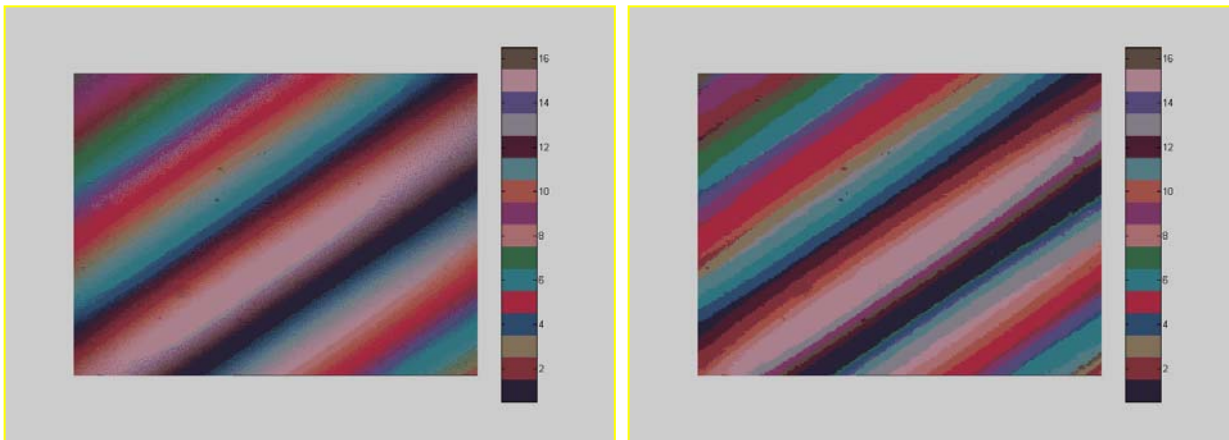


Fuente: Autor.

4.2 OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE ALTURAS

El proceso básico de cuantización de los colores de un interferograma se hace mediante la utilización de las funciones *cmunique* e *imapprox* de Matlab®. La función *cmunique*, obtiene una tabla de colores de una imagen RGB sin índices de color repetido. La función *imapprox* lleva la tabla de color de la imagen a otra, esta otra tabla de colores debe ser determinada por el propósito que se requiera. También se debe escoger el número de colores deseado. En la figura 30 se cuantiza la rampa patrón a 16 colores, se muestra a la izquierda la imagen con la opción “dither” activa, la figura de la derecha corresponde a la misma imagen con la opción “nodither”. Luego de indexar los colores, se les asocia una altura de acuerdo a la calibración hecha sobre un interferograma tomado sobre la misma imagen con un filtro verde de 520nm, como se muestra en la figura 31. Finalmente, mediante estamentos de decisión en el programa de asignación se evitan los degeneramientos de color.

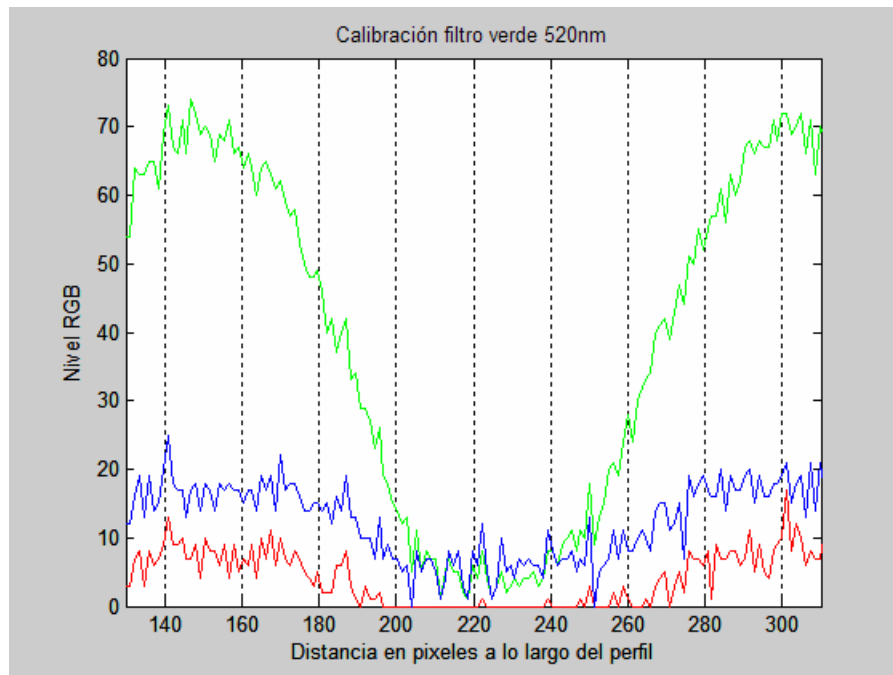
Figura 30 Rampa de calibración cuantizada a 16 colores.



Fuente: Autor

De acuerdo a la curva de calibración hay aproximadamente 150 píxeles entre dos máximos de nivel de la coordenada G, con lo cual hay 260nm por cada 150 píxeles recorridos a lo largo del perfil. Cada paso del perfil de alturas corresponderá a $26/15$ de nm en este ejemplo.

Figura 31 Curva para el proceso de calibración

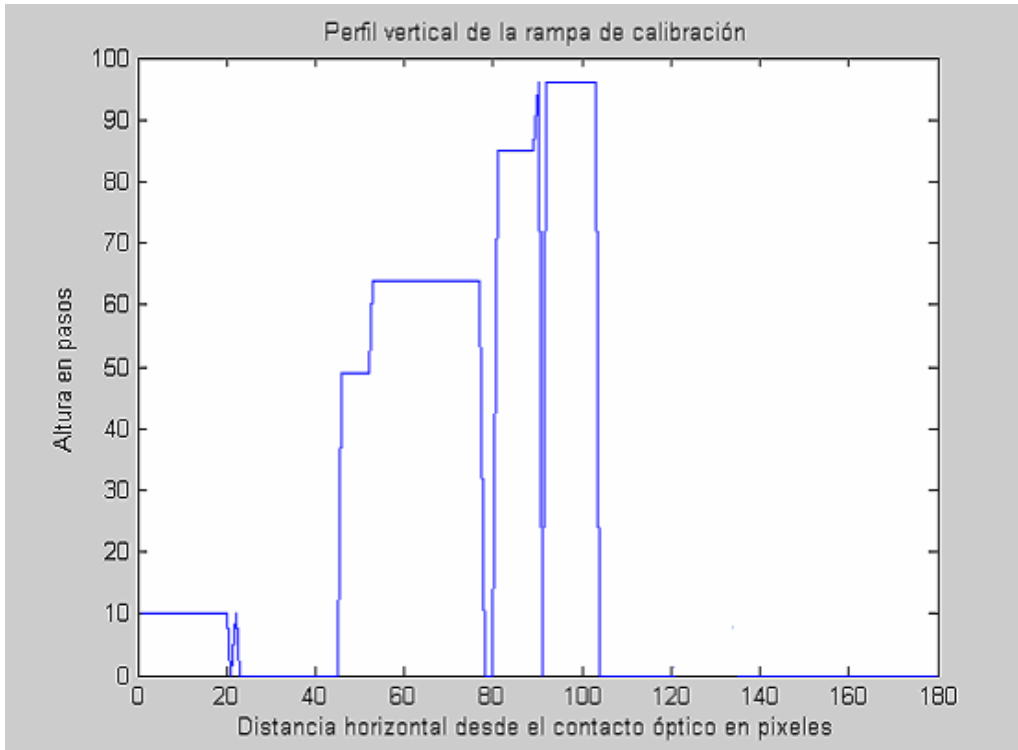


Fuente: Autor

La figura 32 muestra un perfil de la rampa con sólo cinco niveles que pueden ser interpolados y la figura 33 con 10 niveles. El número de niveles depende del número de colores escogidos para la calibración. La mayoría de degeneramientos de color se han levantado en ambas figuras con decisiones que tienen en cuenta el orden de los índices. Los valores nulos corresponden a colores no adjudicados. En el anexo E aparecen los programas de asignación de alturas, como se puede ver allí son básicamente sentencias IF-ELSE.

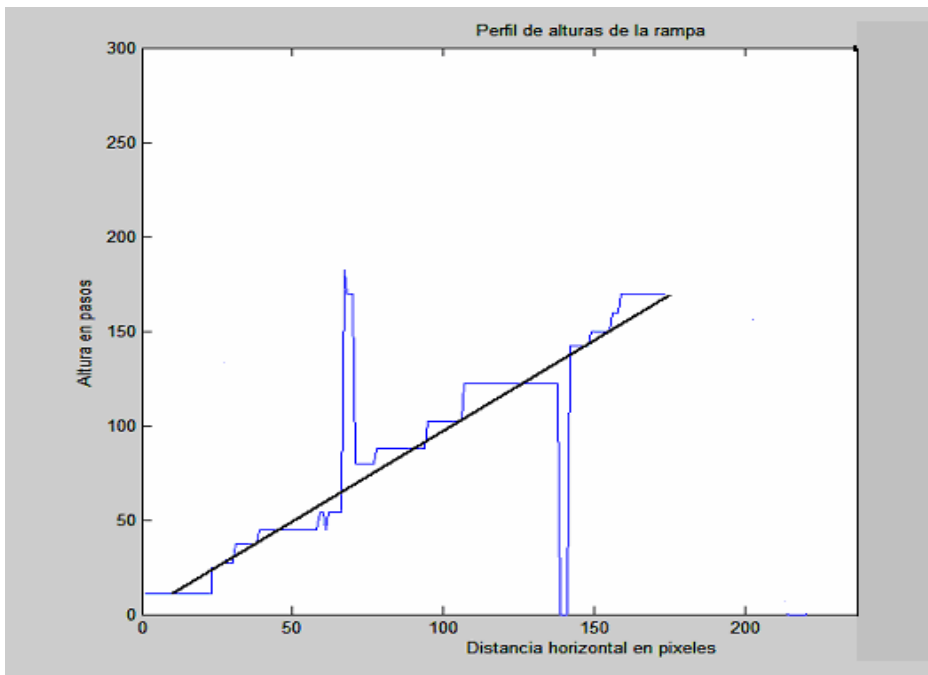
Para un perfil doble-a ambos lados del contacto óptico- se utilizan los colores comunes debido a la asimetría en el interferograma. En la figura 34 se aprecia este ejemplo con cinco niveles de altura. En esta misma figura si se asigna una dirección en el perfil, por ejemplo de izquierda a derecha, en la primera mitad de la figura los índices tendrán un ordenamiento diferente a los de la otra mitad, este hecho ayuda a identificar lo que en este ejemplo debe estar “por encima” y “por debajo” del contacto óptico, ya que con los colores no es posible diferenciarlo, esto es válido únicamente para franjas que no se cierran en sí mismas, es decir, no es válido para contornos.

. **Figura 32** Perfil de alturas de la rampa con cinco niveles, cada paso vertical corresponde a 26/15 de nm aproximadamente.



Fuente: Autor

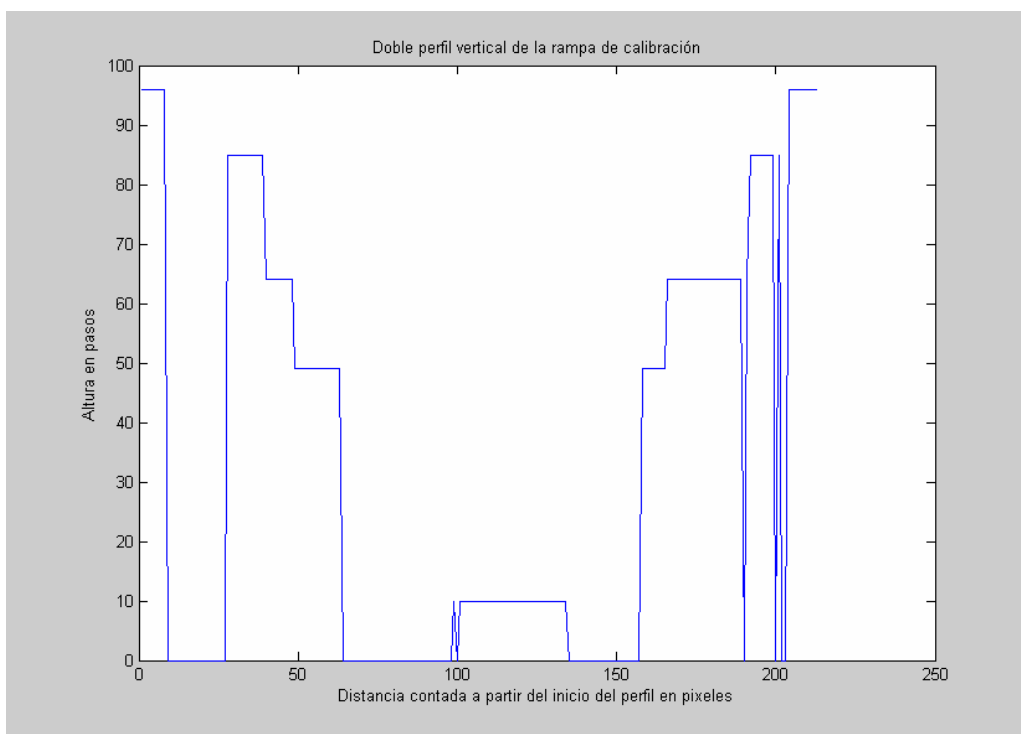
Figura 33 Perfil de alturas de la rampa con diez niveles, cada paso vertical corresponde a 26/15 de nm aproximadamente.



Fuente. Autor

La resolución alcanzada por este método depende de la resolución obtenida del interferograma monocromático de calibración y por el número de colores elegidos en el interferograma de color cuantizado. La resolución puede variar ya que no siempre se eligen el mismo número de colores ni los mismos colores, los cuales no guardan siempre la misma diferencia en altura. Por ejemplo en la figura 32 la resolución varía entre 17nm y 69nm aproximadamente mientras que en la figura 33 la resolución no supera los 34 nm.

Figura 34 Perfil de alturas a ambos lados del contacto óptico con cinco niveles, cada paso vertical corresponde a 26/15 de nm aproximadamente.



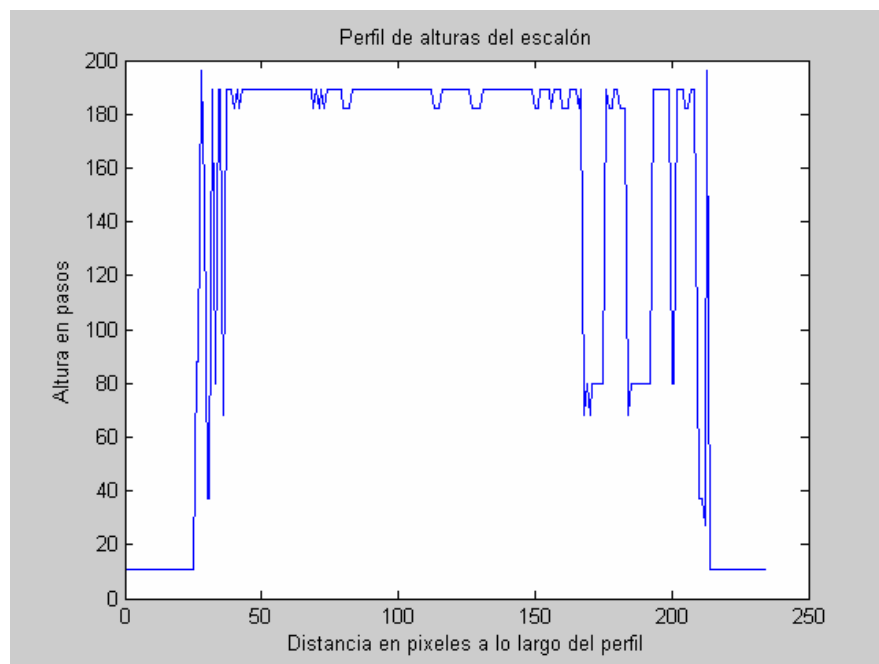
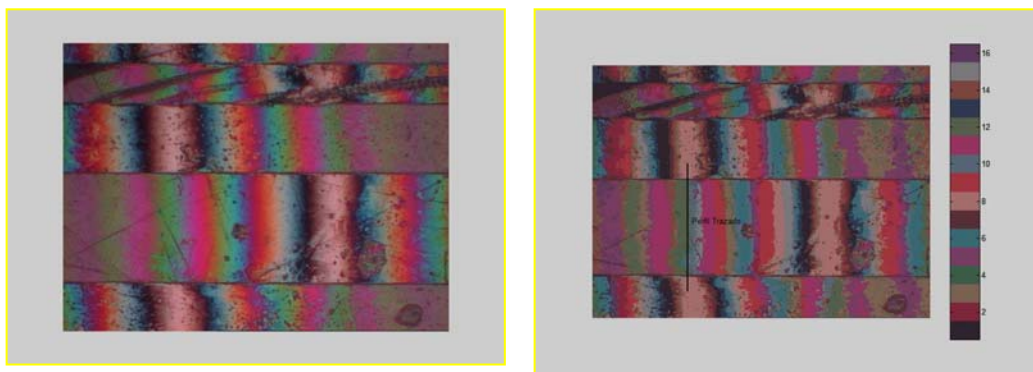
Fuente. Autor

Por último, en la figura 35 se muestra el proceso para la obtención del perfil de alturas para el escalón presentado en la introducción de este texto, el cual presenta una altura aproximada de 750 nm. En la imagen cuantizada a 16 colores se puede apreciar el perfil trazado. Las irregularidades presentes en el perfil no corresponden a errores en el algoritmo, son anomalías presentes en la superficie.

4.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

Además de las conclusiones parciales extractadas al final de cada uno de los capítulos que componen este texto, cabe mencionar unas recomendaciones y conclusiones finales. En este trabajo se retoma la perspectiva de utilización de los modelos de color de la CIE-no de la utilización de los espacios de color- como se sugiere directamente en el libro de Pluta o de Wright para la determinación de espesores en películas delgadas.

Figura 35 Proceso de obtención del perfil de alturas de una superficie tipo escalón.



Fuente. Autor

La idea principal nace de la implementación sencilla de un algoritmo que explote el discernimiento de color que presenta el ojo humano o los dispositivos de captación de imágenes en color para la extracción de información de topografía de una superficie.

La resolución alcanzada por este método depende de la resolución obtenida del interferograma monocromático de calibración y por el número de colores elegidos en el interferograma de color cuantizado. Un buen algoritmo de asociación color-altura aumentará la resolución del método. Es sugerible un algoritmo inteligente o entrenado que explote toda la información que se gana con la indexación de los colores del interferograma de luz blanca de la superficie, esto no es posible con interferogramas de luz monocromática a menos que se conozca la posición del contacto óptico dentro de la imagen o se tome más de un interferograma.

Con este trabajo quedan las bases para hacer directamente una calibración en alturas a partir de la cuantización del color en un espacio 2-D propio del dispositivo de color como el que aparece en la figura 28 de este texto, teniendo en cuenta que el error encontrado por las variaciones de intensidad no superan el 10% del valor de la coordenada. Esto es muy importante ya que en este espacio colores que estén cerca en distancia Euclídea, verdaderamente pertenecen a alturas próximas, al menos en un ciclo de revolución antes de alcanzar colores metaméricos.

Se propone también trabajar en un espacio de color estandarizado, con lo que se debe determinar la respuesta espectral de la fuente de iluminación del microscopio. Así, cualquier dispositivo de color calibrado de acuerdo a la respuesta espectral del ojo humano sería un medidor de altura, además, se estaría trabajando con un formato de color estándar. Aquí además se ía posible validar experimentalmente los resultados de la simulación o simulaciones realizadas en el capítulo dos.

Con este trabajo queda la teoría básica para trabajar con modelos de superficies e iluminación más complicados, ya sea en simulaciones o corroboraciones experimentales de los modelos escogidos, por ejemplo: se puede tomar un número mayor de frentes de luz interferentes o tener en cuenta modelos de fluorescencia en los materiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Robinson G., Perry D., Interferometría óptica de superficies, Revista Investigación y Ciencia, julio 1991.
- [2] Chen, F., Gordon M., Overview of three-dimensional shape measurements using optical methods, Opt. Eng. 39(1) 10-22, enero 2000.
- [3] Freichald, K., Koliopoulos L., Fourier description of digital phase-measuring interferometry, J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 7, No 4/April 1990.
- [4] Creath, K., Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry, Applied optics, Vol. 26, No 14, julio 1987.
- [5] Wright, W. D., The measurement of colour, 3ed., D. Van Nostrand Company, 1964.
- [6] <http://www.eeel.nist.gov/DMATS/>, Boynton, P., Interference-Filter Characterization of Spectroradiometers and colorimeters.
- [7] SiliconGraphics, Guía de usuario Silicon Graphics Colorlock, 1999.
- [8] Sharma, G., Digital Color Imaging Handbook, 2003.
- [9] Pluta, M., Advanced light microscopy principles and basic properties, Vol. I, ed. PWN, 1988.
- [10] Russ, John D., The image processing handbook, 4 ed., CRC press, 2002.
- [11] The Mathworks, Image Processing toolbox for use whit Matlab®, Version 3.

ANEXO A

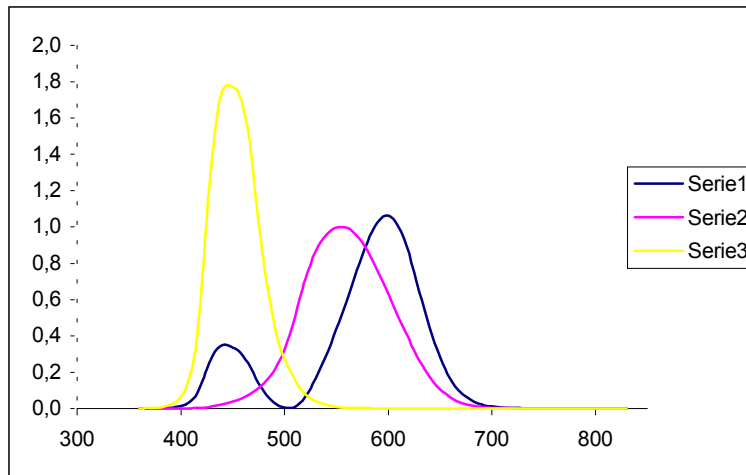
Conjunto de valores triestímulo definidos por la C.I.E. en 1931 para el ajuste de los colores espectrales con las luces X,Y,Z.

$\lambda(\text{nm})$	x	y	z
360	0,000129900000	0,000003917000	0,000606100000
365	0,000232100000	0,000006965000	0,001086000000
370	0,000414900000	0,000012390000	0,001946000000
375	0,000741600000	0,000022020000	0,003486000000
380	0,001368000000	0,000039000000	0,006450001000
385	0,002236000000	0,000064000000	0,010549990000
390	0,004243000000	0,000120000000	0,020050010000
395	0,007650000000	0,000217000000	0,036210000000
400	0,014310000000	0,000396000000	0,067850010000
405	0,023190000000	0,000640000000	0,110200000000
410	0,043510000000	0,001210000000	0,207400000000
415	0,077630000000	0,002180000000	0,371300000000
420	0,134380000000	0,004000000000	0,645600000000
425	0,214770000000	0,007300000000	1,039050100000
430	0,283900000000	0,011600000000	1,385600000000
435	0,328500000000	0,016840000000	1,622960000000
440	0,348280000000	0,023000000000	1,747060000000
445	0,348060000000	0,029800000000	1,782600000000
450	0,336200000000	0,038000000000	1,772110000000
455	0,318700000000	0,048000000000	1,744100000000
460	0,290800000000	0,060000000000	1,669200000000
465	0,251100000000	0,073900000000	1,528100000000
470	0,195360000000	0,090980000000	1,287640000000
475	0,142100000000	0,112600000000	1,041900000000
480	0,095640000000	0,139020000000	0,812950100000
485	0,057950010000	0,169300000000	0,616200000000
490	0,032010000000	0,208020000000	0,465180000000
495	0,014700000000	0,258600000000	0,353300000000
500	0,004900000000	0,323000000000	0,272000000000
505	0,002400000000	0,407300000000	0,212300000000
510	0,009300000000	0,503000000000	0,158200000000
515	0,029100000000	0,608200000000	0,111700000000
520	0,063270000000	0,710000000000	0,078249990000

525	0,109600000000	0,793200000000	0,057250010000
530	0,165500000000	0,862000000000	0,042160000000
535	0,225749900000	0,914850100000	0,029840000000
540	0,290400000000	0,954000000000	0,020300000000
545	0,359700000000	0,980300000000	0,013400000000
550	0,433449900000	0,994950100000	0,008749999000
555	0,512050100000	1,000000000000	0,005749999000
560	0,594500000000	0,995000000000	0,003900000000
565	0,678400000000	0,978600000000	0,002749999000
570	0,762100000000	0,952000000000	0,002100000000
575	0,842500000000	0,915400000000	0,001800000000
580	0,916300000000	0,870000000000	0,001650001000
585	0,978600000000	0,816300000000	0,001400000000
590	1,026300000000	0,757000000000	0,001100000000
595	1,056700000000	0,694900000000	0,001000000000
600	1,062200000000	0,631000000000	0,000800000000
605	1,045600000000	0,566800000000	0,000600000000
610	1,002600000000	0,503000000000	0,000340000000
615	0,938400000000	0,441200000000	0,000240000000
620	0,854449900000	0,381000000000	0,000190000000
625	0,751400000000	0,321000000000	0,000100000000
630	0,642400000000	0,265000000000	0,000049999990
635	0,541900000000	0,217000000000	0,000030000000
640	0,447900000000	0,175000000000	0,000020000000
645	0,360800000000	0,138200000000	0,000010000000
650	0,283500000000	0,107000000000	0,000000000000
655	0,218700000000	0,081600000000	0,000000000000
660	0,164900000000	0,061000000000	0,000000000000
665	0,121200000000	0,044580000000	0,000000000000
670	0,087400000000	0,032000000000	0,000000000000
675	0,063600000000	0,023200000000	0,000000000000
680	0,046770000000	0,017000000000	0,000000000000
685	0,032900000000	0,011920000000	0,000000000000
690	0,022700000000	0,008210000000	0,000000000000
695	0,015840000000	0,005723000000	0,000000000000
700	0,011359160000	0,004102000000	0,000000000000
705	0,008110916000	0,002929000000	0,000000000000
710	0,005790346000	0,002091000000	0,000000000000
715	0,004106457000	0,001484000000	0,000000000000
720	0,002899327000	0,001047000000	0,000000000000
725	0,002049190000	0,000740000000	0,000000000000

730	0,001439971000	0,000520000000	0,000000000000
735	0,000999949300	0,000361100000	0,000000000000
740	0,000690078600	0,000249200000	0,000000000000
745	0,000476021300	0,000171900000	0,000000000000
750	0,000332301100	0,000120000000	0,000000000000
755	0,000234826100	0,000084800000	0,000000000000
760	0,000166150500	0,000060000000	0,000000000000
765	0,000117413000	0,000042400000	0,000000000000
770	0,000083075270	0,000030000000	0,000000000000
775	0,000058706520	0,000021200000	0,000000000000
780	0,000041509940	0,000014990000	0,000000000000
785	0,000029353260	0,000010600000	0,000000000000
790	0,000020673830	0,000007465700	0,000000000000
795	0,000014559770	0,000005257800	0,000000000000
800	0,000010253980	0,000003702900	0,000000000000
805	0,000007221456	0,000002607800	0,000000000000
810	0,000005085868	0,000001836600	0,000000000000
815	0,000003581652	0,000001293400	0,000000000000
820	0,000002522525	0,000000910930	0,000000000000
825	0,000001776509	0,000000641530	0,000000000000
830	0,000001251141	0,000000451810	0,000000000000

Figura 36 Curvas de ajuste de colores espectrales con las luces X, Y y Z.



Fuente: autor

ANEXO B

Programa en Matlab®, que determina la posición de los colores espectrales en el diagrama de cromaticidad.

%Programa que crea el lugar geométrico de los colores espectrales que conforman la frontera del diagrama de cromaticidad, los valores de las curvas de ajuste de color son asignados: x_{bar} , y_{bay} y z_{bar} desde una hoja de excel.

```
clear all
close all
x_bar=xlsread('Tabla_CIE','Hoja2')
y_bar=xlsread('Tabla_CIE','Hoja3');
z_bar=xlsread('Tabla_CIE','Hoja4');
for i=1:95
    suma=x_bar(i)+y_bar(i)+z_bar(i);
    x=x_bar(i)/suma;
    y=y_bar(i)/suma;
    plot(x,y,'.')
    hold on
end
grid on
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Lugar geometrico de los colores espectrales')
```

ANEXO C

```
%programa del proceso de interferencia a dos
%ondas:Simulacion_Interferencia.m
clear all, close all
%dibujar el locus de los colores espectrales
x_bar=xlsread('Tabla_CIE','Hoja2');
y_bar=xlsread('Tabla_CIE','Hoja3');
z_bar=xlsread('Tabla_CIE','Hoja4');
subplot(1,2,1)
for i=1:95
    suma=x_bar(i)+y_bar(i)+z_bar(i);
    x=x_bar(i)/suma;
    y=y_bar(i)/suma;
    plot(x,y, '.')
    hold on
end
grid on
xlabel('x')
ylabel('y')
hold on
%definicion de los pesos a partir del proceso de interferencia a dos ondas
%se definen cinco distribuciones espectrales:luz blanca, luz dia, verde de
%546nm, rojo de 640 nm, rojo y verde.
n=input('introduzca 1,2,3 o 4 para: luz blanca, verde(546nm), rojo(640nm),verde y
rojo respectivamente: ');
switch n
    case 1
        lamda=[360:5:830];
    case 2
```

```

lamda=546;
x_bar=0.3597;
y_bar=0.9803;
z_bar=0.0134;
case 3
lamda=640;
x_bar=0.4479;
y_bar=0.175;
z_bar=0.00002;
case 4
lamda=[546 640];
x_bar=[0.3597;0.4479];
y_bar=[0.9803;0.175];
z_bar=[0.0134;0.00002];
end

%Luz_Blanca=ones(95,1);
%1660 son dos longitudes de onda maxima. 64 ,para producir la tabla de colores.
%startcol es una funcion que determina las características de la proyeccion
%de colores de la pantalla, es una funcion que pertenece a la libreria
%colorlab, determina las variables Yw,tm,a,g.
startcol
for i=1:64
    Delta_z=(3320/63)*(i-1)-1660;
    Dif_Fase=(2*pi./lamda)*Delta_z;
    P_Lamda=1+cos(Dif_Fase);%espero 64 vectores cada uno con 95 longitudes
de onda
    X=sum(P_Lamda'.*x_bar);
    Y=sum(P_Lamda'.*y_bar);
    Z=sum(P_Lamda'.*z_bar);
    %calculo de los pesos r,g,b mediante la funcion tri2val

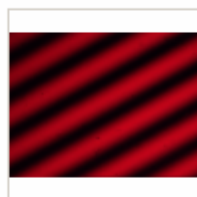
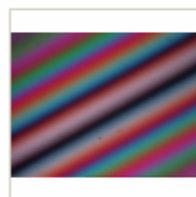
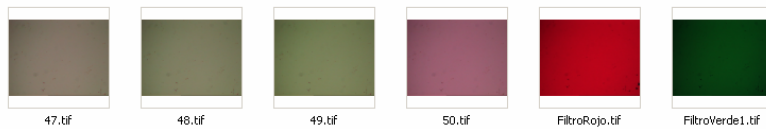
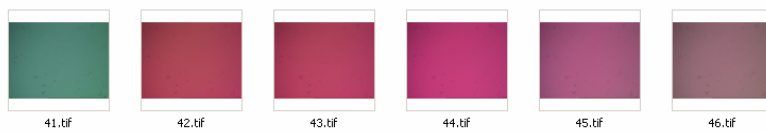
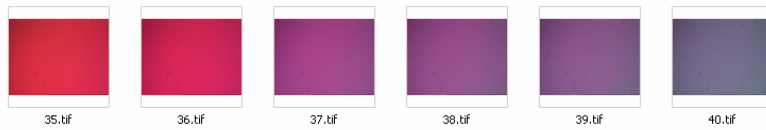
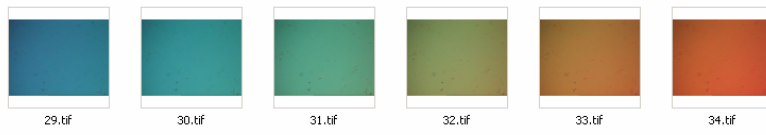
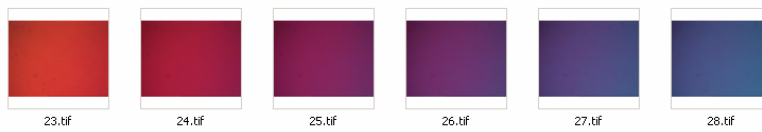
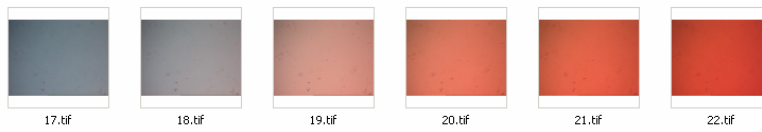
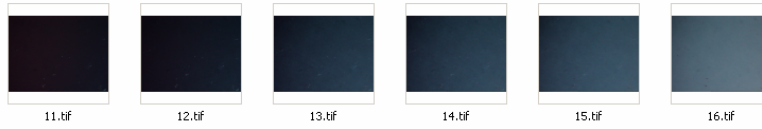
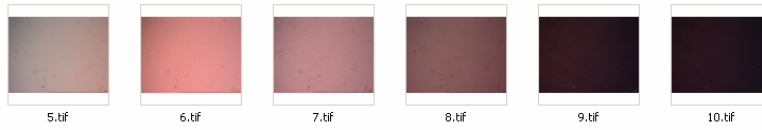
```

```

    RGB=tri2val([X Y Z],Yw,tm,a,g,8,0);%8 es resolucion de la targeta
vga,RGB(1)=R;RGB(2)=G;RGB(3)=G;
    % 0 para que no muestre ventana de calculo
    R(i)=RGB(1);
    G(i)=RGB(2);
    B(i)=RGB(3);
    c_x(i)=X/(X+Y+Z);
    c_y(i)=Y/(X+Y+Z);
    plot(c_x(i),c_y(i),'k.')
    hold on
    pause(.1)
end
%mapa de colores del proceso de interferencia
Mapa_Color=[R' G' B'];
colormap(Mapa_Color);hold on
    for i=1:64;
        for j=1:2
            x(i,j)=(i-1)/63;
            y(i,j)=j-1;
            z(i,j)=i;%pondera la funcion de acuerdo al valor del indice del mapa de
colores
            if i==1 z(i,j)=z(i,j)+.0001;end
            if i==64 z(i,j)=z(i,j)-0001;end
        end
    end
    subplot(1,2,2)
    surface(x,y,z,z)
    %stem(lamda,Luz_Blanca)
Fin del programa.

```

ANEXO D



ANEXO E

%este programa se encarga de adjudicar alturas a cada uno de los índices de

%un perfil

function Y=alturas(X)

n=length(X);

for i=1:n

if X(i)==7 %tratamiento de numero repetido

if X(26)| X(27)| X(28)==13

X(i)=11;

else X(i)=102;

end

elseif X(i)==13

X(i)=27;

elseif X(i)==6

X(i)=37;

elseif X(i)==0

X(i)=45;

elseif X(i)==12

X(i)=54;

elseif X(i)==5 %tratamiento de indice repetido

if X(79)| X(80)| X(81)==9

X(i)=68;

else X(i)=170;

end

elseif X(i)==9 %tratamiento de indice repetido tres veces en el perfil

if X(87)| X(88)| X(89)==14

X(i)=80;

elseif X(169)| X(170)| X(171)==5

X(i)=160;

else X(i)=259

end

elseif X(i)==14

X(i)=88;

elseif X(i)==8 %tratamiento de indice repetido

if X(141)| X(142) | X(143)==4

```

X(i)=122;
else X(i)=215;
end

elseif X(i)==4 %tratamiento de indice repetido
if X(149)| X(150) | X(151)==15
X(i)=142;
else X(i)=244;
end

elseif X(i)==15
X(i)=150;
elseif X(i)==3
X(i)=182;
elseif X(i)==11 %tratamiento de indice repetido
if X(195)| X(196) | X(197)==2
X(i)=189;
else X(i)=283;
end

elseif X(i)==2
X(i)=196;
elseif X(i)==10
X(i)=227;

else X(i)=0;

end
end
Y=X

```