



# UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Loma Bonita

LICENCIATURA EN MATEMÁTICAS APLICADAS

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS XYZ DE  
LA LUZ REFLEJADA EN UNA FIBRA ÓPTICA POR  
MEDIO DE ESPECTROMETRÍA PARA LA UBICACIÓN  
EN EL DIAGRAMA CIE.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN MATEMÁTICAS APLICADAS

P R E S E N T A

KAREN HERNANDEZ FENTANEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. HECTOR HUGO SANCHEZ HERNANDEZ

CODIRECTOR DE TESIS

DR. ROBERTO MACHORRO MEJIA

LOMA BONITA, OAXACA, 2020



# UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Loma Bonita

## LICENCIATURA EN MATEMÁTICAS APLICADAS

LA PRESENTE TESIS TITULADA **DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS XYZ DE LA LUZ REFLEJADA EN UNA FIBRA ÓPTICA POR MEDIO DE ESPECTROMETRÍA PARA LA UBICACIÓN EN EL DIAGRAMA CIE** PRESENTADA POR LA SUSTENTANTE DE LA LICENCIATURA **C. KAREN HERNÁNDEZ FENTANEZ** BAJO LA DIRECCIÓN DEL **DR. HÉCTOR HUGO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ** Y EL **DR. ROBERTO MACHORRO MEJÍA**, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL COMITÉ EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN MATEMÁTICAS APLICADAS.

DR. HÉCTOR HUGO SÁNCHEZ  
HERNÁNDEZ  
DIRECTOR

DR. ROBERTO MACHORRO MEJÍA  
CODIRECTOR

DR. FRANCISCO  
GUTIÉRREZ ZAINOS  
PRESIDENTE

DR. AGUSTÍN SANTIAGO  
ALVARADO  
SECRETARIO

DR. JOSÉ LUIS JUÁREZ PÉREZ  
VOCAL



# Universidad del Papaloapan


FECHA:	05 de Diciembre del 2019
ÁREA:	Vice-Rectoría Académica
OFICIO NÚMERO:	UNPA/VRA/267/2019
ASUNTO:	Autorización de Impresión de tesis.

**C. Karen Hernández Fentanez**  
**PRESENTE:**

En base al artículo 120 del reglamento de alumnos, por medio de la presente se aprueba la impresión de la tesis titulada **“Determinación de los parámetros XYZ de la luz reflejada en una fibra óptica por medio de espectrometría para la ubicación en el diagrama CIE”** así como la programación del examen profesional bajo la dirección del Dr. Héctor Hugo Sánchez Hernández.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente.  
terra ubérrima, mens aperta  
Bou Lo-tama, chi jí jú

  
MC. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA  
Vice-Rector Académico.



C.c.p. Dr. Víctor Manuel Méndez Salinas. Jefe de Carrera de la Lic. En Matemáticas Aplicadas  
C.c.p. L.P. Yesenia Barrientos Arenal. Jefa del Departamento de Servicios Escolares  
C.c.p. Dr. Héctor Hugo Sánchez Hernández. Director de Tesis.  
C.c.p. Archivo.



# UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Loma Bonita

**Oficio No. MA086-19**

Loma Bonita Oaxaca a 5 de diciembre del 2019

Asunto: Asignación de sinodales de tesis

**M.E. Yesenia Barrientos Arenal**

**Jefa del departamento de servicios escolares**

**PRESENTE**

Por este medio le informo que la Vicerrectoría Académica, ha designado a los siguientes profesores como sinodales del examen profesional de la alumna **Karen Hernández Fentanez**, quien defenderá su trabajo de tesis titulado *“Determinación de los parámetros XYZ de la luz reflejada en una fibra óptica por medio de espectrometría para la ubicación en el diagrama CIE”*, para obtener el título de Licenciada en Matemáticas Aplicadas.

Titulares:

Presidente: Dr. Francisco Gutiérrez Zainos

Secretario: Dr. Agustín Santiago Alvarado

Vocal: Dr. José Luis Juárez Pérez

Suplentes:

Dr. Héctor Hugo Sánchez Hernández

Dr. Mauro Sánchez Sánchez



JEFATURA DE  
CARRERA  
DE MATEMÁTICAS  
APLICADAS

Sin otro particular me despido quedando a sus ordenes para cualquier aclaración.

ATENTAMENTE

~~Dr. Victor Manuel Méndez Salinas~~

Jefe de carrera de la Lic. en Matemáticas Aplicadas

Universidad del Papaloapan

Vo.Bo.

M.C. Hector López Arjona

Vicerrector Académico

c.c.p. M.C. Héctor López Arjona. Vicerrector académico

c.c.p. M.E. Yesenia Barrientos Arenal. Jefa de servicios escolares

c.c.p. Archivo

*Dedicada a mis Padres  
María Magdalena Fentanez Bautista.  
& Aquileo Hernández Vicente.  
y a mi querido hermano  
Elviz de Jesús Hernández Fentanez.*

*“Lo fundamental es que conozcas bien tu trabajo, seas capaz de hacerlo y seas mejor que nadie al hacerlo.”*

Richard Templar

---

# AGRADECIMIENTOS

---

El presente trabajo se lo agradezco a Dios por la bendición que me ha dado al lograr culminar una meta más en mi vida, por ser mi guía, acompañarme en el transcurso de mi vida brindándome paciencia y sabiduría durante el transcurso de mi carrera y realización de esta tesis.

A mis padres no tengo palabras para decir lo agradecida que estoy con ellos porque estuvieron conmigo desde el inicio de este largo camino, en mi primer día de preescolar hasta este proceso de realización de tesis, unas cuantas líneas no bastaran para expresar mi gratitud hacia ellos, pero por lo menos quiero darles una idea de cuanto valoro su apoyo. Les agradezco porque cada día de sus vidas han luchado por darme lo mejor y la oportunidad de realizarme como profesionista, es una gran bendición para haber contado con su apoyo incondicional. A mi madre quiero decirle que le doy gracias por estar conmigo en cada momento alentándome a seguir adelante y nunca darme por vencida, por la gran cómplice de vida que ha sido y por siempre darme el mejor consejo en esos momentos donde creí no poder lograrlo. A mi padre le doy gracias por darme el mejor ejemplo de superación por enseñarme día a día, que cuando se quiere se puede y que la humildad siempre te abre las puertas, también porque cada día me contagias con tus ganas de ser mejor, es un orgullo para mí decir que has sido mi ejemplo a seguir y mi motivación para luchar por mis metas y sueños.

Al mejor hermano del mundo. Elviz, a ti hermano te doy gracias por formar parte de este proyecto porque siempre me has apoyado e impulsado a dar todo para lograr cada una de las metas que me he propuesto y por alegrarte de mis logros académicos como si fueran tuyos, sin duda alguna puedo decir que sin ti nada de esto sería lo mismo.

A mis asesores de tesis los doctores Héctor Hugo Sánchez Hernández y Roberto Machorro Mejía les agradezco por aceptar dirigir esta tesis, es para mi un honor haber trabajado bajo su dirección y tener la fortuna de aprender lo mejor de ambos, agradezco el tiempo de dedicación y paciencia que tuvieron para orientarme durante este proceso y por darme la oportunidad de conocer a los grandes seres humanos que son. Gracias por siempre tener una palabra de aliento que me motive a seguir esforzándome y por todo el cariño que me dieron desde que los conocí.

A mis compañeros y amigos, en especial a Doña Qatys, Ireri, Aaron y Maya, les doy gracias por su amistad porque sin ustedes estos cinco años en la UNPA no hubieran sido los mismos, pero más aún en especial quiero agradecer a mi cómplice incondicional por siempre estar ahí escucharme y apoyarme cuando más lo necesite, sin duda alguna a pesar de todo lo que pasamos, de nuestros enojos y desacuerdos eres una persona muy querida para mí.

Y por supuesto no podría faltar mi mejor amigo Luis A. Meca, a ti te agradezco por apoyarme a sacar adelante parte de mi trabajo de tesis, porque con tu compañía hiciste más ameno días enteros de trabajo en el laboratorio, pero en especial por estar ahí siempre que me desesperaba o las cosas no salían como esperaba, gracias por la paciencia y el tiempo que dedicabas a escucharme cuando había tenido un día difícil y sobre todo muchas gracias por tu amistad incondicional, por hacerme ver mis aciertos, desacierto y por siempre creer en mí.

Agradezco a mis revisores de tesis, los doctores Francisco, José Luis, Agustín y Mauro por haber dedicado parte de su tiempo en darme sugerencias para mejorar mi trabajo.

A mis profesores: Marcelino, Bety, Erendira, Aura, Víctor, Juan Antonio, Juan Manuel y Nobel por compartir conmigo sus conocimientos y formarme como profesional pero más que nada por siempre alentarme a crecer día a día como profesional sabiendo aprovechar cada una de las oportunidades que se me presentaron durante mi estancia en la Universidad.

Finalmente agradezco de manera muy especial a Manuel, Azucena, Sara, Joel y el resto de mi familia por formar parte de este logro, por motivarme durante mi carrera y el proceso de realización de este trabajo.

*Karen Hernández Fentanes*

---

# RESUMEN

---

El ser humano ha estado interesado en el color por muchos siglos, a lo largo de los años el color como objeto de investigación ha jugado un papel muy importante para grandes investigadores, ya que han dado lugar a grandes avances tanto en la industria como en otras áreas, ejemplo de ello se tiene a la agricultura, industrial textilera, química, entre otras.

En este trabajo de tesis se realizó el estudio de la teoría tricromática de color para comprender el origen de los valores triestímulos que lo caracterizan, el análisis que se realiza respecto a esta teoría es representando a un color como una expresión matemática que se obtiene a partir del análisis de ciertos parámetros ópticos de la luz. Así como también se desarrolló el estudio de la curva espectral de la luz reflejada de 5 muestras de tomate en distintas etapas de madurez obtenidas a partir del prototipo (colorímetro) del arreglo experimental que se propone en esta tesis. Además se muestra la transformación de estas curvas espectrales a coordenadas de color XYZ, RGB y xyz, estas últimas se realizaron con el fin de observar gráficamente en el diagrama de cromaticidad internacional de color donde se encuentran posicionadas las coordenadas equivalentes a los colores que presentan las muestras en determinada etapa de madurez.

**Palabras claves:** Color, Teoría tricromática, Colorímetro, Curva espectral.

---

# ABSTRACT

---

Humans have been interested in color for many centuries, over the years color as an object of research has played a very important role for great researchers, as it has led to great advances both in the industry and in other disciplines, some examples of this are found in agriculture, the textile industry, chemistry, among others.

Thus, in this thesis the study of trichromatic theory of color was carried out to understand the origin of the tri-stimuli values that characterize it, the analysis that was performed with respect to this theory is representing a color as a mathematical expression that is obtained from the analysis of certain optical parameters of light. As well as the study of the spectral curve of reflected light of 5 tomato samples at different stages of maturity obtained from the prototype (colorimeter) of the experimental arrangement proposed in this thesis was developed. In addition, it shows the transformation of these spectral curves to XYZ, RGB and xyz color coordinates, the latter were performed in order to observe graphically in the international color chromaticity diagram where the coordinates are positioned equivalent to the colors presented by the samples at a certain stage of maturity.

**Keywords:** Color, Trichromatic theory, Colorimeter, Spectral curve.

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Dispersión de la luz blanca al pasar por un prisma.	7
2.2. Diagrama del color según Isaac Newton.	8
2.3. Arreglo experimental de Maxwell para demostrar la teoría de Young-Helmholtz.	9
2.4. Experimento de Edwin Land.	9
2.5. Representación gráfica de una onda electromagnética armónica propagándose en el eje z y sus elementos.	11
2.6. Representación gráfica del espectro electromagnético y espectro visible en función de la longitud de onda.	11
2.7. Estructura del ojo.	12
2.8. Similitud del ojo humano y una cámara fotográfica.	14
2.9. Representación del espectro visible.	15
4.1. Espectros de luz blanca LED tricromáticos.	27
4.2. Espectros de luz blanca LED fluorescente.	28
4.3. Índice de refracción y coeficiente de absorción en un vidrio crown violeta que tiene una banda de absorción a 550 nm.	30

4.4. La curva de índice de refracción extendida de un vidrio crown transparente. . . .	30
4.5. Secuencias de color producidas por la dispersión en un vidrio transparente. . . .	31
5.1. Elementos principales para la realización del experimento. . . . .	35
5.2. Fotografías correspondientes a las fibras ópticas plásticas no pulidas observadas a partir de un objetivo óptico. . . . .	35
5.3. Proceso de pulido de las fibras ópticas para el arreglo experimental. . . . .	36
5.4. Acabado final del pulido transversal de las fibras ópticas correspondientes. . . .	36
5.5. Transmisión de la luz en las fibras ópticas pulidas, observadas a partir de un objetivo óptico en distintos ángulos. . . . .	37
5.6. Esquema y principio del funcionamiento del arreglo experimental. . . . .	37
5.7. Funcionamiento del LED con la fuente y la fibra. . . . .	38
5.8. Fibras ópticas aisladas en la caja negra. . . . .	38
5.9. Incidencia de luz sobre la muestra y fibra óptica de $1mm$ recibiendo la luz reflejada por la muestra. . . . .	39
5.10. Método de obtención de la luz reflejada por la muestra. . . . .	39
5.11. Reconocimiento del espectrómetro en la PC. . . . .	40
5.12. Arreglo experimental que se utilizó para realizar las mediciones de las muestras de tomate. . . . .	40
5.13. Muestras de tomates en distintas etapas de madurez utilizadas para la obtención de datos experimentales. . . . .	41
5.14. Luz incidiendo y transmitiendo a través del arreglo de fibras en la muestra . . .	42
5.15. Espectro del blanco de referencia de la hoja de papel utilizada para las mediciones de las muestras. . . . .	42
5.16. Gráfica de los 25 espectros obtenidos a partir de las 5 muestras de tomate. . . .	44
5.17. Cambio en el comportamiento de la curva espectral conforme aumenta la etapa de madurez de los tomates. . . . .	44
5.18. Ubicación de las coordenadas $xy$ en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 1. . .	50
5.19. Ubicación de las coordenadas $xy$ en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 2. . .	52
5.20. Ubicación de las coordenadas $xy$ en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 3. . .	54

---

5.21. Ubicación de las coordenadas $xy$ en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 4.	56
5.22. Ubicación de las coordenadas $xy$ en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 5.	58

---

# ÍNDICE DE TABLAS

---

5.1. Valores de $S(\lambda)$ , $p(\lambda)$ , $\bar{x}(\lambda)$ , $\bar{y}(\lambda)$ , $\bar{z}(\lambda)$ para una parte del rango del espectro visible entre los $400nm$ a los $610nm$ en intervalos de $10nm$ [15]. . . . .	46
5.2. Valores de las coordenadas XYZ, $xyz$ y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 1. . . . .	49
5.3. Valores de las coordenadas XYZ, $xyz$ y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 2. . . . .	51
5.4. Valores de las coordenadas XYZ, $xyz$ y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 3. . . . .	53
5.5. Valores de las coordenadas XYZ, $xyz$ y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 4. . . . .	55
5.6. Valores de las coordenadas XYZ, $xyz$ y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 5. . . . .	57

---

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	II
<b>Resumen</b>	IV
<b>Abstract</b>	V
<b>Índice de Figuras</b>	V
<b>Índice de Tablas</b>	VI
<b>Introducción</b>	1
<b>1. Antecedentes</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Justificación</b> . . . . .	3
<b>1.2. Objetivos</b> . . . . .	4
<b>1.2.1. Objetivo general</b> . . . . .	4
<b>1.2.2. Objetivos específicos</b> . . . . .	4
<b>1.3. Hipótesis</b> . . . . .	5

<b>2. Fundamentos de la teoría del color</b>	<b>6</b>
2.1. El color	6
2.2. Origen del estudio del color	7
2.3. El ojo humano y el espectro electromagnético	9
2.4. La visión y la similitud del ojo humano con una cámara fotográfica	12
2.5. Sensores	15
<b>3. Estudio del espacio CIE y técnicas de medición de color</b>	<b>16</b>
3.1. Interpretación matemática de las leyes de Grassmann	16
3.1.1. Definición de los valores triestímulos por medio de un sistema de mezcla de adición de color	17
3.2. Conversión del sistema XYZ a RGB	20
3.3. Normalización de los valores XYZ	22
3.4. Técnicas de medición y estudio del color	22
3.4.1. Espectroscopía	22
3.4.2. Colorimetría Espectral	23
3.4.3. Espectrofotometría	24
<b>4. Instrumentos y elementos ópticos para la medición de color</b>	<b>25</b>
4.1. Fuentes de Luz	25
4.2. Dispersión del color	29
4.3. Detectores y Espectrómetros	32
4.4. Fibra Óptica	33
<b>5. Diseño experimental y resultados</b>	<b>34</b>
5.1. Diseño experimental	34
5.1.1. Pulido de fibra óptica	35
5.1.2. Funcionamiento del arreglo experimental	37
5.2. Obtención de espectros de tomates en distintas etapas de madurez	41

---

5.3. Conversión del espectro de tomate a coordenadas XYZ para la ubicación en el diagrama de CIE . . . . .	45
5.3.1. Obtención de los parámetros XYZ y la ubicación de $xy$ en el diagrama de CIE para la muestra 1 . . . . .	45
5.3.2. Resultados obtenidos de las muestras 2, 3, 4, 5 y su respectiva ubicación de las coordenadas $xy$ en el diagrama de CIE . . . . .	51
<b>6. Conclusiones</b>	<b>60</b>
<b>A. Algoritmo en MATLAB para el cálculo de coordenadas</b>	<b>62</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>66</b>

---

# INTRODUCCIÓN

---

En esta tesis se describe el análisis de los parámetros XYZ del color obtenidos a partir de un instrumento, que nos permite medir la cuantificación del color reflejado por un objeto. En el capítulo 1 se dará a conocer la necesidad que existe de tener un instrumento de medición de color. En el capítulo 2 haremos una revisión somera de conceptos fundamentales para nuestro propósito. En primer lugar, el funcionamiento del ojo. Enseguida sobre la luz, que es y cómo interactúa con la materia. También se incluye un apartado a la separación de colores, dado que las ondas electromagnéticas que provienen de las fuentes de luz empleadas emiten todos los colores.

Para entender mejor la respuesta en color de los objetos conviene medir uno por uno, en el capítulo 3 se menciona la comisión internacional de colores, también conocida como diagrama CIE, que es muy importante, ya que no es tan sólo que podamos repetir un color, sino que el color que me pidan de algún lugar remoto, pueda ubicarse en una escala común. El estándar de colores empieza al menos de 1931 [32].

Como el colorímetro propuesto hará uso de guías de onda, para llevar la luz de la fuente de iluminación al objeto, coleccionar la luz reflejada y enviarla al sensor, conviene que se estudie el principio del funcionamiento de las fibras ópticas, así como de algunos instrumentos ópticos como se mostrará en el capítulo 4. En el capítulo 5 se describirá el colorímetro óptico, su funcionamiento y el tipo de resultados que proporciona, además se expondrá algunos ejemplos de aplicación, particularmente en el estudio de madurez de algunas frutas y por último en el capítulo 6 se describirán las conclusiones a las que se llegarón a partir de los resultados obtenidos por medio del arreglo experimental que se propone.

---

## ANTECEDENTES

---

La vista es uno de los sentidos más destacados [9], nos permite ubicar y reconocer objetos, apreciar tamaños y distancias, percibir peligros y salidas, distinguir colores, en fin, se podría decir que, aunque se sobreviva sin la vista, todo resulta más sencillo con ella. Un aspecto destacado de la vista es que nos permite comparar objetos, en particular sus colores. Pero como todos nuestros sentidos, la vista también tiene sus limitaciones, y sea por si sola o combinada con la interpretación de nuestro cerebro. Esto puede dar lugar a ilusiones ópticas, alucinaciones, malas interpretaciones, etcétera y así nuestro cerebro se ve engañado por las circunstancias. Si se desea obtener resultados repetibles es necesario una referencia confiable, medible y repetible. Hay varios aspectos que influyen en la percepción del color por parte del ojo [9]:

1. El objeto bajo estudio.
2. La forma de iluminarlo, el tipo de fuente, su emisión espectral.
3. El sensor o detector, en nuestro caso es el ojo.

Se debe entender muy bien las dos últimas para poder conocer de manera fiel al objeto bajo estudio. Si la fuente no emite el color verde, o el sensor no es capaz de medirlo, podría parecer que el objeto no refleja el verde, cuando en realidad si lo hace. Por lo tanto, es muy importante conocer nuestra instrumentación. La cuantificación es de gran importancia en muchos ámbitos, la industria del papel requiere que todos sus lotes de cierto tipo de papel sean del mismo color

y puedan ser verificables. Lo mismo en la industria automotriz y muchas otras [17]. El color de una fruta puede ser un indicador de su madurez, tanto para cortarse de la planta como para ingerirse [8]. Los señalamientos de las calles requieren de colores particulares, no una gama de rojos, ni de verdes por ejemplo.

En la actualidad existen medidores comerciales de color y normas para la medida, donde definen la metodología e instrumentación necesaria para aplicarla, por ejemplo, de acuerdo a [18] y [24] hoy en día existen algunos programas gratuitos o con licencia para la medición de color que están disponibles y permiten una calibración del mismo hasta un grado útil para la gestión del flujo de color dentro de un ambiente determinado, utilizando un perfil de color asignable a la muestra, un perfil de color representa un conjunto de datos que caracteriza un color dentro de un espacio. Estas aplicaciones funcionan de acuerdo con las directivas del Consorcio Internacional del Color (CIC). Sin embargo, la calibración que se lleva a cabo a lo largo de estas aplicaciones es casi siempre imprecisa en relación con las necesidades científicas de cuantificación colorimétrica. Por lo tanto, con frecuencia se realiza una calibración colorimétrica combinando diferentes algoritmos polinómicos, estadísticas multivariadas y enfoques de redes neuronales. Todos estos procedimientos pueden disminuir de manera exitosa el ruido externo a diferentes extensiones, tomando en cuenta, que tanto la configuración del equipo como la respuesta del sensor a la luz, juegan un papel crucial para la cuantificación objetiva del color.

## 1.1. Justificación

Tener una fuente de iluminación que sea económica, de alta duración, bajo consumo de energía, compacta, es importante para utilizarse como iluminador de un colorímetro hecho en nuestra universidad. Por lo que, el análisis de color es de suma importancia en muchos ámbitos, en colorimetría se emplean fuentes de iluminación estándares que funcionan igual en cualquier lugar, de manera que un color dado pueda reproducirse o compararse en todos lados dado que la repetitividad de un color es fundamental en esta área. Nuestro interés particular es aplicar colorimetría en el uso diario, ya sea en casa, en el jardín o en la agricultura. Para conocer las diferentes fuentes de iluminación, consultar la referencia [32].

La calibración colorimétrica, antes de la interpretación de foto/imagen, está ganando cada vez más atención en diversas disciplinas, como la biología, ya que el color es tanto una característica fenética de los organismos como una característica del espacio ambiental ocupado por los organismos [5], en la ciencia de los alimentos donde el color es una propiedad fundamental para

evaluar la calidad, la frescura y la conformidad de los productos alimenticios [29] [17]; en la medicina, donde por ejemplo, la medición del color se utiliza como referencia para saber el grado de algunas patologías; Monitoreo ambiental, ya que el Sistema de Información Geográfica y la detección remota usan color, por lo que, requieren su calibración previa para los procedimientos de interpretación de fotos. También en las aplicaciones web, como los catálogos de artículos merceológicos donde se puede usar como una característica eficiente para las comparaciones de productos [24], así resulta crucial la calibración del color. La inspección para el reconocimiento de patrones requiere la recopilación de información precisa del color [5] [17].

De acuerdo a lo anterior en este trabajo de tesis se estudiará los valores triestímulos XYZ del color que se obtienen a partir de un colorímetro construido en el laboratorio de la universidad, con el propósito de reconocer el grado de madurez del fruto analizando el color en distintas muestras de frutos con diferentes etapas de madurez que son cultivados en la universidad, esto con el fin de contribuir en la investigación del campo agrícola.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Obtener de los parámetros XYZ del color, a través de un prototipo de colorímetro óptico alternativo basado en fibra óptica.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Construir un arreglo óptico que nos permita obtener la curva espectral del color de una muestra sólida.
- Obtener los valores triestímulos para trasladarlos a los estándares internacionales de color.
- Aplicar los valores triestímulos XYZ en la determinación de los cambios de color en el proceso de madurez de frutos.
- Crear un algoritmo que nos permita realizar la conversión del espectro obtenido de la muestra a coordenadas CIE.

### 1.3. Hipótesis

A través de la reflexión de luz de una muestra se pueden calcular los valores triestímulos XYZ de color por medio de un espectrómetro basado en fibra óptica [22], [16].

---

# FUNDAMENTOS DE LA TEORÍA DEL COLOR

---

Para cumplir con el objetivo de esta tesis es necesario estudiar y comprender el concepto de color así como también su origen y los fundamentos más relevantes que la sostienen además de otros conceptos que van de la mano con esta teoría y que se irán detallando con forme el desarrollo de este capítulo.

## 2.1. El color

En diferentes ciencias el término color es usado muy comúnmente pero con un enfoque o sentido muy distinto, las principales ciencias que implementan el término “*color*” es la química, física, fisiología y psicología [22] [21].

Un químico lo utiliza como un concepto general para referirse a tintes, pigmentos y materiales que son similares, mientras que un fisiólogo o un psicólogo lo emplean con un sentido muy distinto al anterior, ya que ellos están interesados principalmente en entender el proceso visual como una característica cualitativa, algunas veces el término es utilizado para denotar la sensación en la conciencia de un observador humano [6]. En lo que corresponde a un físico cuando necesita medir el color de una muestra o material, se refiere a medir las propiedades ópticas con mayor relevancia de este [14].

El color es una palabra común y el sentido que cada ciencia o disciplina le da es adecuado, por eso es infructuoso tratar de eliminar alguno de estos significados, puesto que sería difícil llegar a un grado de unanimidad en referencia al significado único que debería adoptarse.

En general, no existe ninguna dificultad para saber cuando se está utilizando la definición química a diferencia de cuando se quiere distinguir entre la definición física objetiva y la definición psicológica subjetiva, esto es algo más complicado dado que no hay una correspondencia uno a uno entre el aspecto objetivo y subjetivo.

## 2.2. Origen del estudio del color

En lo que se refiere al principio científico de estudios del color se le atribuye a Isaac Newton por primera vez en el año de 1671 cuando dio a conocer su experimento clásico con un prisma para demostrar la dispersión del color [25], [16], como se muestra en la figura 2.1.



Figura 2.1: Dispersión de la luz blanca al pasar por un prisma.

Newton concluyó que el espectro de luz estaba formado por siete colores, estos son: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta. Además, diseñó el primer diagrama de colores cuando dibujó un círculo que enumeraba todos los colores del espectro y en el año de 1672, dio a conocer sus investigaciones sobre el color a la Real Sociedad de Londres [19] [16].

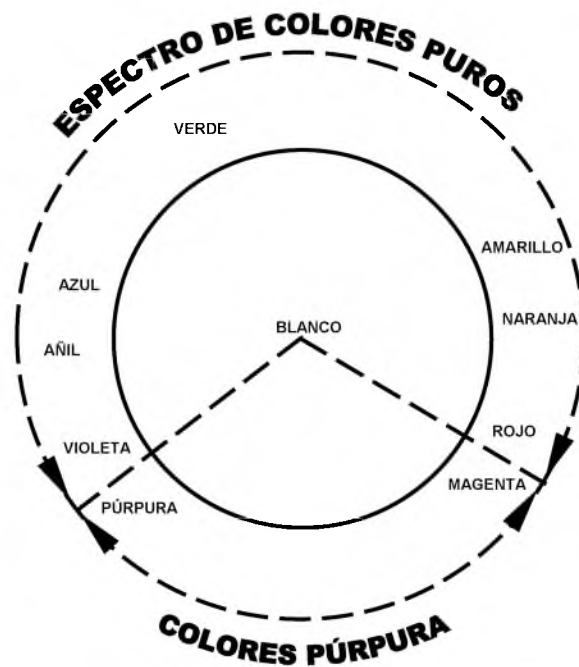


Figura 2.2: Diagrama del color según Isaac Newton.

Después de Newton muchos investigadores más dieron aportaciones importantes para la evolución de la teoría del color [16], entre ellos, podemos destacar a Mariotte que en 1717 dijo que tres colores eran suficientes para obtener cualquier color siempre y cuando se usará la combinación adecuada de ellos, seguido por Palmer en 1777 quien agregando a lo que dijo Mariotte, que el ojo tenía tres receptores de color diferentes en la retina.

En 1801 Young refinó la teoría tricromática del color postulando que todos los colores que existen en la naturaleza podían combinarse con tres colores diferentes, a los cuales nombró colores primarios y que el ojo tiene tres tipos de fotorreceptores, uno para cada uno de estos colores [27] [22]. Cincuenta años más tarde, Von Helmholtz mejoró la teoría de Young dando a esta más detalles que estaban basados en experimentos de la luz. Por lo tanto, la teoría tricromática de la luz en nuestra actualidad se conoce como la teoría de Young-Helmholtz en honor a ellos [16].

Maxwell en los años 1856, 1857, 1860 y 1885 presentó los estudios que hizo sobre la percepción del color y realizó un experimento, como el que se muestra en la figura 2.3, el arreglo que utilizó fue con el propósito de producir una imagen totalmente coloreada, lo que a su vez demostraba la teoría de Young-Helmholtz.

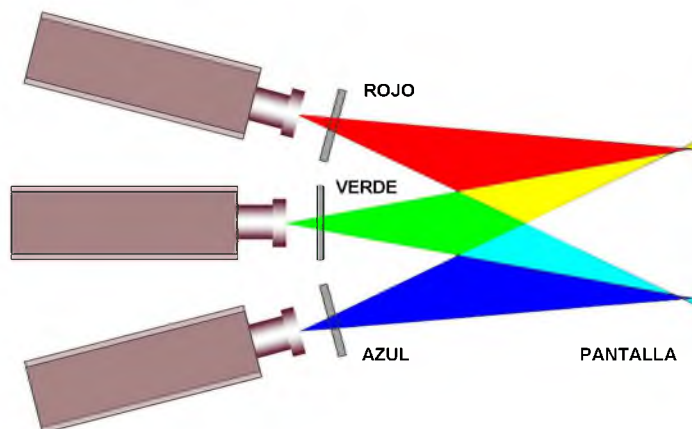


Figura 2.3: Arreglo experimental de Maxwell para demostrar la teoría de Young-Helmholtz.

En la década de 1950, Land hizo un cambio sorprendente en el experimento de tres proyectores de Maxwell, puesto que logró proyectar una escena a todo color con tan solo dos colores, como rojo y verde o rojo y blanco [16] [25], como se muestra en la figura 2.4.

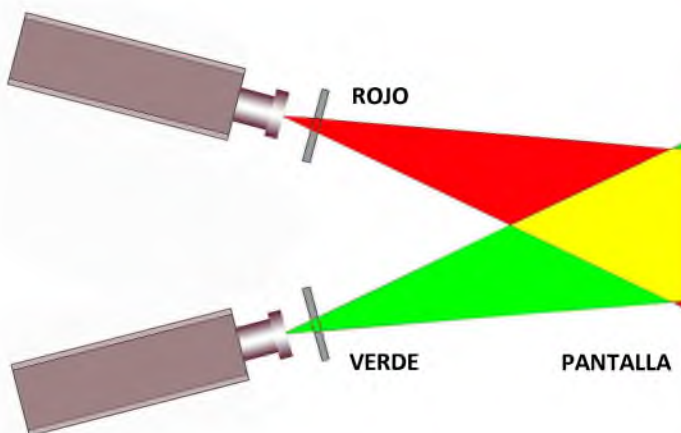


Figura 2.4: Experimento de Edwin Land.

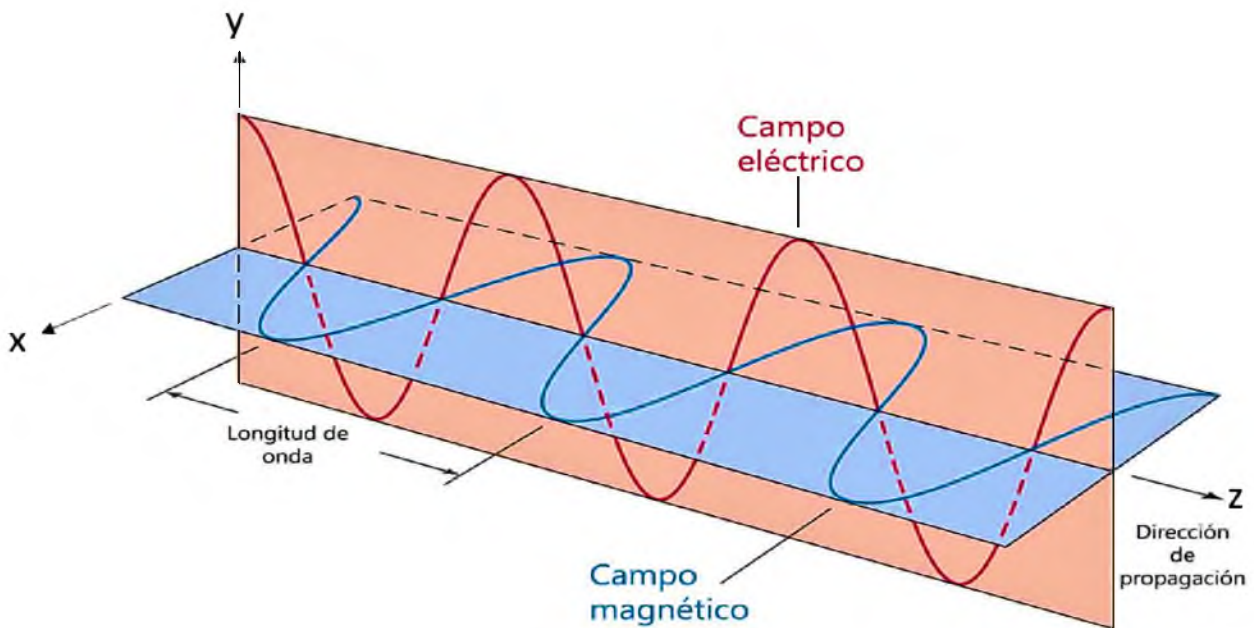
### 2.3. El ojo humano y el espectro electromagnético

El ojo juega un papel muy importante en la percepción del color gracias a como está constituido, de ahí que, por medio de este y de la sensibilidad que posee a los rayos de luz o señales luminosas puede detectar una parte del espectro electromagnético, que se denomina espectro visible [17] [7].

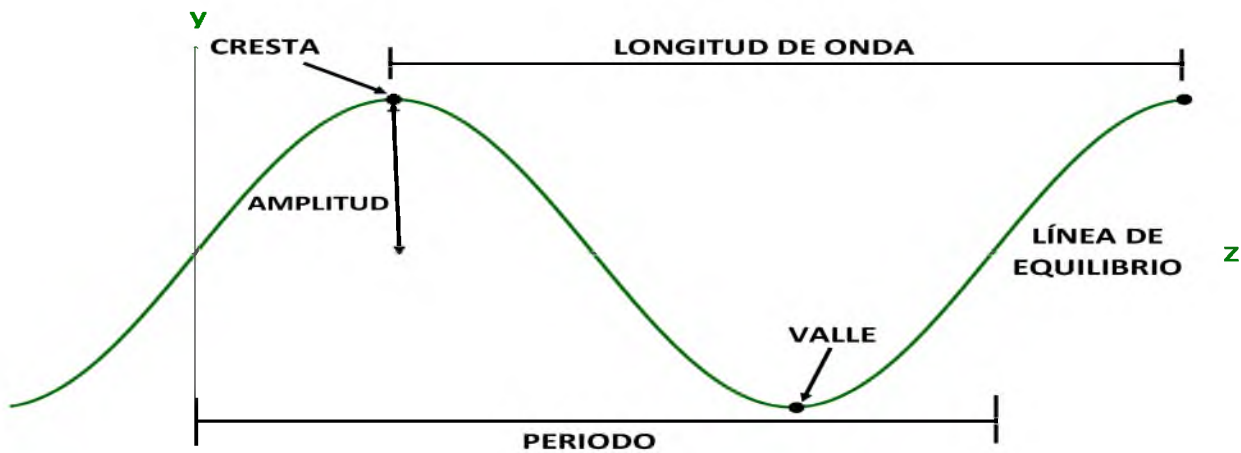
Para entender mejor estos dos últimos conceptos se dice que una onda electromagnética es aquella que no necesita un medio material para poder propagarse, y esta constituida por un campo eléctrico y un campo magnético, los cuales son perpendiculares entre sí y además perpendiculares a la dirección en la cual se propagan [13] [19].

Una onda se compone de los siguientes elementos (ver figura 2.5(a) y 2.5(b)):

- **Cresta:** Corresponde al punto máximo que alcanza la onda.
- **Valle:** Corresponde al punto mínimo que alcanza la onda.
- **Elongación:** Es el desplazamiento entre la posición de equilibrio y la posición en un instante determinado.
- **Amplitud:** Es la distancia que va desde el punto de equilibrio hasta la cresta o el valle.
- **Longitud de onda:** Es la distancia que hay entre dos crestas o valles.
- **Período:** Es el tiempo transcurrido en el que se completa un ciclo.
- **Frecuencia:** Es el número de ondas que se completan en la unidad de tiempo.



(a)



(b)

Figura 2.5: Representación gráfica de una onda electromagnética armónica propagándose en el eje z y sus elementos.

A partir de lo anterior se puede definir el espectro electromagnético como la distribución energética del conjunto de estas ondas, este va desde la radiación de menor longitud de onda, como son: los rayos cósmicos, rayos gamma y los rayos X, seguida de la radiación ultravioleta, la luz visible o el conjunto de varias longitudes de onda detectadas por el ojo humano y la radiación infrarroja, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda los cuales son infrarrojo, microondas y por último las ondas de radio [13], como se muestra en la figura 2.6.

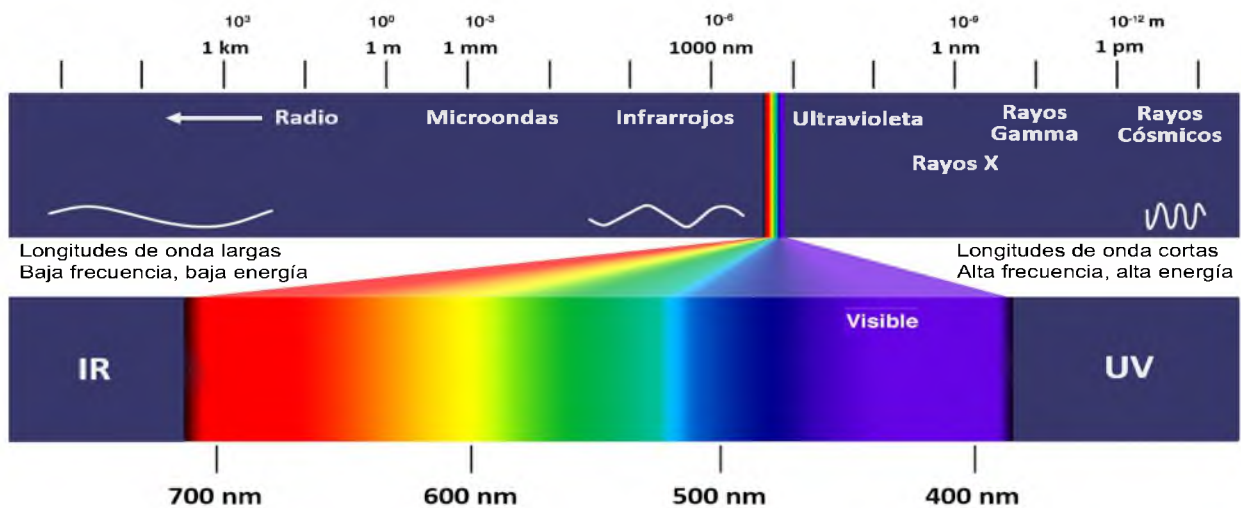


Figura 2.6: Representación gráfica del espectro electromagnético y espectro visible en función de la longitud de onda.

El espectro electromagnético es un rango de ondas electromagnéticas que pueden tener diferentes longitudes de onda o distintas frecuencias [10]. La luz visible por su parte es un rango pequeño de ondas electromagnéticas que el ojo puede percibir, a su vez las diferentes longitudes de onda de la luz generan distintas percepciones de color en el ojo humano. Las longitudes de onda más grandes producen la percepción del rojo y las más cortas producen la percepción del violeta. Por otro lado, cuando se tienen distintos tonos de colores no visibles en el espectro, es porque existe una superposición de ondas electromagnéticas de diferente longitud de onda, dicho en otras palabras, la superposición de estas ondas se puede interpretar como un desfase que se perciben a través de los cambios de tonos de color.

Finalmente se define al espectro visible como la región o rango del espectro electromagnético que el ojo humano tiene la capacidad de percibir [13]. Por otro lado, a la radiación electromagnética en este intervalo de longitudes de onda se le denomina luz visible o luz. Los límites aproximados en los que se encuentra el espectro visible y a los que el ojo humano responde va de los 390 a 750 nanómetros [10]. Baste, como muestra el arcoíris es un ejemplo de refracción del espectro visible.

## 2.4. La visión y la similitud del ojo humano con una cámara fotográfica

Los estudios más recientes respecto al ojo humano, así como sus mecanismos de procesamiento para el color, la fisiología y los componentes anatómicos han sido publicados en diversos trabajos de investigación [16].

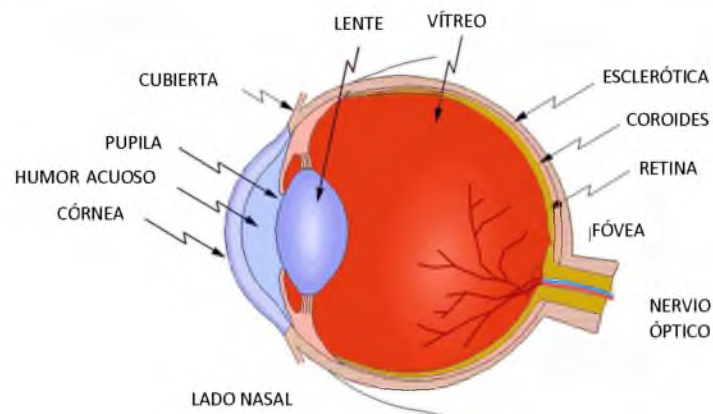


Figura 2.7: Estructura del ojo.

El ojo humano es un órgano que detecta la luz y es la base de la vista [28], sin embargo no se puede utilizar como un detector de luz confiable. Su funcionamiento consiste básicamente en transformar la energía lumínica en señales eléctricas que posteriormente son enviadas al cerebro por medio del nervio óptico, de este modo en base a [3], [7], [16] el ojo esta constituido por:

- **La córnea:** Es la parte frontal transparente del ojo, es aproximadamente esférica con un radio de curvatura de aproximadamente  $8mm$ . Dos terceras partes de la capacidad de refracción del ojo son su responsabilidad. La capacidad de refracción de la córnea es aproximadamente de 43 dioptrías. La córnea es la parte que más contribuye a la capacidad de enfoque del ojo [9].
- **Pupila:** Es el orificio que se encuentra en la parte central del iris por el cual pasa la luz que va al globo ocular. Es de color negro y tiene como función de regular la cantidad de luz que entra en la retina, en la parte posterior del ojo.
- **Humor acuoso:** Es un líquido sin color que nutre y oxigena a la córnea y la lente.
- **La lente:** Es la parte transparente del ojo humano con forma de lente biconvexa que se encuentra detrás de la pupila y el iris. Su función principal es permitir enfocar la imagen en la retina para facilitar la visión nítida.
- **Humor vítreo:** Es una sustancia gelatinosa y transparente, es más denso que el humor acuoso y su función es mantener la forma de globo ocular, en otras palabras, mantiene a la retina estirada contra la coroides dándole una forma uniforme para la recepción de imágenes nítidas.
- **La retina:** Es la tercera capa del globo ocular y cubre aproximadamente las tres cuartas partes posteriores de este, además representa el inicio de la vía óptica. Viendo desde una perspectiva óptica, podemos decir que la retina es la pantalla sobre la cual se forma la imagen y se considera como parte de una superficie esférica que es cóncava con cierto radio de curvatura. Por tanto se puede decir que la retina se comporta como un sensor de luz.
- **La fovea:** Es la parte de la retina donde se dirigen los rayos luminosos y su función principal es para la visión del color.

El sistema ocular es muy complejo y tiene la capacidad de procesar gran cantidad de información de manera muy rápida. De la manera en que se lleva a cabo este proceso no se entiende completamente puesto que se carece de conocimiento de cómo los componentes neuronales de la visión (retina, corteza visual y otros centros cerebrales) procesan la imagen retiniana.

Todos los ojos, de cualquier tipo ya sean animales o humanos involucra una relación entre la necesidad de sensibilidad a niveles de luz bajos, y la capacidad de resolución dimensional en términos de las variables como son la dirección o forma de un objeto [3].

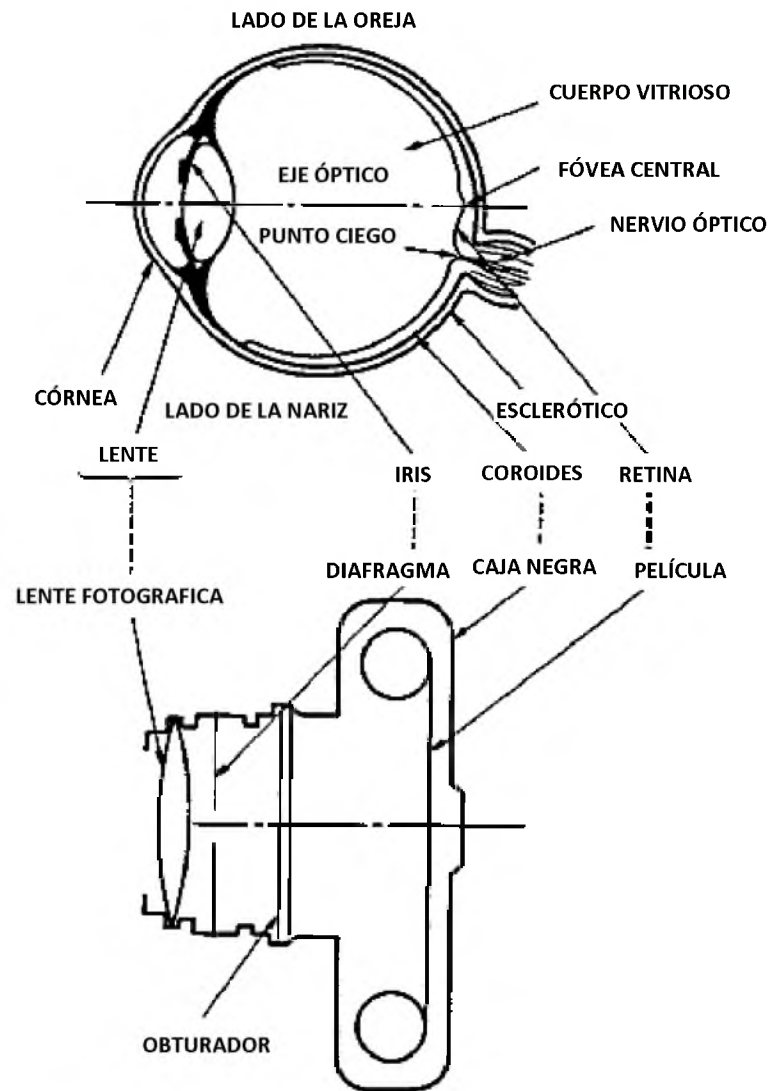


Figura 2.8: Similitud del ojo humano y una cámara fotográfica.

El sistema visual del ojo es en parte muy similar a un sistema fotográfico, puesto que ambos responden a la luz y, de manera particular, a las imágenes. El globo ocular humano es una esfera que mide 24 mm de diámetro aproximadamente. La figura 2.8 muestra esquemáticamente la equivalencia entre las componentes del ojo y una cámara [22].

## 2.5. Sensores

La percepción del color del ser humano se produce por la estimulación física de los detectores de luz conocidos como conos en la retina humana. El ojo puede distinguir aproximadamente 200 diferentes niveles de gris, sin embargo, el número de posibles combinaciones diferentes que el ojo puede ignorar en gran medida aumenta con la visión de los colores, ampliando así la cantidad de información que se puede extraer de una escena [16].

Una de las limitaciones que tiene el ojo es que de todo el espectro electromagnético solo puede percibir una parte que va de los 390 a 750 nanómetros, el cual es conocido como espectro visible y que se muestra en la figura 2.9.

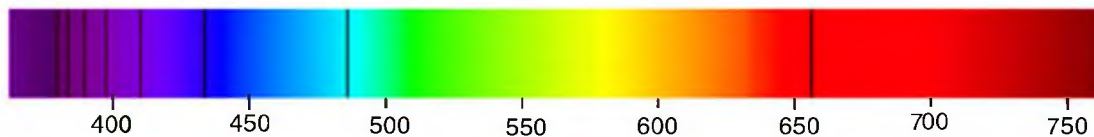


Figura 2.9: Representación del espectro visible.

Como el ojo humano no puede ofrecer en un análisis de color resultados confiables y repetibles es necesario el uso de sensores que funcionen como detectores de color.

---

## ESTUDIO DEL ESPACIO CIE Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE COLOR

---

### 3.1. Interpretación matemática de las leyes de Grassmann

A lo largo de la historia y los experimentos realizados por los pioneros de la colorimetría se ha podido mostrar que, dentro de ciertos límites, cualquier color que se desee se puede sintetizar mediante la mezcla de las luces roja  $[R]$ , verde  $[G]$  y azul  $[B]$  en la proporción correcta [23]. A partir de este momento el símbolo  $[ ]$  se utiliza para denotar un estímulo de color. La coincidencia de colores se define como el proceso de mezclar los estímulos  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$  y controlar sus respectivas intensidades de tal forma que la luz mezclada coincida con una luz de prueba [14].

De [30], [23] y [22] se dice que si el estímulo  $[F_1]$  coincide con el estímulo  $[F_2]$ , y  $[F_3]$  coincide con  $[F_4]$ , en consecuencia se puede escribir lo siguiente:

$$[F_1] = [F_2] \quad y \quad [F_3] = [F_4] \quad (3.1)$$

donde el signo = significa que el estímulo que esta del lado izquierdo coincide con el estímulo del lado derecho. Estas ecuaciones son conocidas en la literatura como “*ecuaciones de color*” [15], [22]. Grassmann logró resumir importantes resultados obtenidos en numerosos experimentos de combinación de colores en leyes simples que se encuentran resumidas en las siguientes líneas.

1. **Proporcionalidad:** La coincidencia de colores se mantiene cuando las intensidades de todos los componentes se multiplican por una constante. Dicho de otra manera, si se cumple la ecuación 3.1, también se cumplen las siguientes ecuaciones

$$\alpha [F_1] = \alpha [F_2] \quad y \quad \alpha [F_3] = \alpha [F_4] \quad (3.2)$$

2. **Aditividad:** El color se mantiene para los estímulos obtenidos mediante la adición de estímulos de colores combinados. Es decir, las siguientes ecuaciones sostienen

$$[F_1] + [F_3] = [F_2] + [F_4] \quad y \quad [F_1] + [F_4] = [F_2] + [F_3] \quad (3.3)$$

Las leyes de Grassmann son sencillas de comprender, ya que permiten que las ecuaciones matemáticas utilizadas sean interpretadas de manera equivalente como el resultado obtenido a partir de aumentar, disminuir o agregar un estímulo de color en una mezcla.

### 3.1.1. Definición de los valores triestímulos por medio de un sistema de mezcla de adición de color

Cuando un estímulo de prueba  $[F]$  es comparado con las cantidades  $R$ ,  $G$  y  $B$  de los estímulos  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$ , la ecuación de coincidencia de color se escribe como [23]:

$$[F] = R [R] + G [G] + B [B] \quad (3.4)$$

Los valores de  $R$ ,  $G$  y  $B$  están en función de qué tipo de estímulo  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$  se utiliza. Por lo tanto, para poder comparar los resultados de los experimentos de mezcla de colores se requiere que las características de  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$  se fijen con anterioridad. Así lo primero que se debe tomar en cuenta es que los valores colorimétricos de  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$  deben ser fijos, y los valores relativos de sus luminancias deben ser definidos [15].

En general, la relación mutua de  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$  se define al normalizar sus luminancias  $L_R$ ,  $L_G$  y  $L_B$  para que sean iguales para una coincidencia de un estímulo estándar específico.

En la teoría de color existen distintos tipos de estímulo como lo es el estímulo básico que funciona como el estándar y que por lo general se elige el blanco, mientras que los estímulos primarios son los estímulos  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$  también conocidos como estímulos de color de referencia y a sus cantidades unitarias, expresadas en cantidades fotométricas  $L_R$ ,  $L_G$  y  $L_B$ , se conocen como unidades luminosas. Como consecuencia de lo anterior, si un estímulo  $[F]$  coincide con las luminancias  $P_R$ ,  $P_G$  y  $P_B$ , de  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$  respectivamente, los valores normalizados,  $R = P_R/L_R$ ,  $G = P_G/L_G$  y  $B = P_B/L_B$ , produce los valores  $R$ ,  $G$  y  $B$  de la ecuación 3.4. A estos valores en la literatura se le denominan valores triestímulos [16]. Por tanto de manera intuitiva, se deduce que  $R = G = B = 1$  en el caso del estímulo básico.

En base a lo dicho anteriormente si se considera como prueba un estímulo  $[F_\lambda]$  que solo conste de una longitud de onda con una potencia radiante ya determinada, a este estímulo se le denomina estímulo monocromático o estímulo espectral. Sin embargo, no podría existir un estímulo monocromático en el sentido estricto puesto que en lo que corresponde a lo experimental o práctica, se debe tener un rango finito de longitudes de onda con un ancho limitado de  $1nm$ . Cuando se combinan mediante la mezcla el estímulo de color  $[F_\lambda]$  y los estímulos de color de referencia  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$ , la ecuación de color es reescrita como [22]:

$$[F_\lambda] = \bar{r}_\lambda [R] + \bar{g}_\lambda [G] + \bar{b}_\lambda [B] \quad (3.5)$$

donde  $\bar{r}_\lambda$ ,  $\bar{g}_\lambda$  y  $\bar{b}_\lambda$  se definen como coeficientes de coincidencia de color, estos son: los valores triestímulos del estímulo espectral o también conocidos como valores triestímulos espectrales [32], [16]. Los coeficientes de coincidencia de color  $\bar{r}_\lambda(\lambda)$ ,  $\bar{g}_\lambda(\lambda)$  y  $\bar{b}_\lambda(\lambda)$ , obtenidos en función de la longitud de onda, son llamados funciones de coincidencia de color y por conveniencia de notación, el subíndice generalmente es omitido y los símbolos se convierten en  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  y  $\bar{b}(\lambda)$ , respectivamente.

Si se hacen coincidir dos luces monocromáticas  $[F_{\lambda_1}]$  y  $[F_{\lambda_2}]$  con longitud de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , así como también una potencia radiante  $f_1$  y  $f_2$ , respectivamente, se pueden obtener las siguientes ecuaciones de color.

$$f_1 [F_{\lambda_1}] = f_1(\bar{r}_{\lambda_1} [R] + \bar{g}_{\lambda_1} [G] + \bar{b}_{\lambda_1} [B]) \quad (3.6)$$

$$f_2 [F_{\lambda_2}] = f_2(\bar{r}_{\lambda_2} [R] + \bar{g}_{\lambda_2} [G] + \bar{b}_{\lambda_2} [B]) \quad (3.7)$$

Por lo anterior, el color  $[F]$  que se obtiene de la mezcla de las luces monocromáticas [3.6](#) y [3.7](#) se puede expresar de acuerdo con las leyes de Grassmann agregando cada uno de los valores del lado izquierdo y derecho para obtener:

$$\begin{aligned} [F] &= f_1 [F_{\lambda_1}] + f_2 [F_{\lambda_2}] \\ &= f_1(\bar{r}_{\lambda_1} [R] + \bar{g}_{\lambda_1} [G] + \bar{b}_{\lambda_1} [B]) + f_2(\bar{r}_{\lambda_2} [R] + \bar{g}_{\lambda_2} [G] + \bar{b}_{\lambda_2} [B]) \\ &= (f_1\bar{r}_{\lambda_1} + f_2\bar{r}_{\lambda_2}) [R] + (f_1\bar{g}_{\lambda_1} + f_2\bar{g}_{\lambda_2}) [G] + (f_1\bar{b}_{\lambda_1} + f_2\bar{b}_{\lambda_2}) [B] \end{aligned} \quad (3.8)$$

En cambio, se puede observar que los valores triestímulos de  $[F]$  son  $(f_1\bar{r}_{\lambda_1} + f_2\bar{r}_{\lambda_2})$ ,  $(f_1\bar{g}_{\lambda_1} + f_2\bar{g}_{\lambda_2})$  y  $(f_1\bar{b}_{\lambda_1} + f_2\bar{b}_{\lambda_2})$ . De este modo el resultado anterior, se puede decir que un color  $[F]$  obtenido a partir de la mezcla de  $n$  luces monocromáticas  $[F_{\lambda_1}], [F_{\lambda_2}], \dots, [F_{\lambda_n}]$ , con potencias radiantes  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , respectivamente, puede estar representado por una ecuación de color dada, de la forma:

$$\begin{aligned} [F] &= (f_1\bar{r}_{\lambda_1} + f_2\bar{r}_{\lambda_2} + \dots + f_n\bar{r}_{\lambda_n}) [R] \\ &\quad + (f_1\bar{g}_{\lambda_1} + f_2\bar{g}_{\lambda_2} + \dots + f_n\bar{g}_{\lambda_n}) [G] \\ &\quad + (f_1\bar{b}_{\lambda_1} + f_2\bar{b}_{\lambda_2} + \dots + f_n\bar{b}_{\lambda_n}) [B] \\ &= \sum_{i=1}^n f_i \dots \bar{r}_{\lambda_i} + \sum_{i=1}^n f_i \dots \bar{g}_{\lambda_i} + \sum_{i=1}^n f_i \dots \bar{b}_{\lambda_i} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Así, los valores triestímulos  $R$ ,  $G$  y  $B$  del color  $[F]$  pueden ser obtenidos mediante las siguientes ecuaciones [16](#), [21](#).

$$R = \sum_{i=1}^n f_i \bar{r}_{\lambda_i} \quad (3.10)$$

$$G = \sum_{i=1}^n f_i \bar{g}_{\lambda_i} \quad (3.11)$$

$$B = \sum_{i=1}^n f_i \bar{b}_{\lambda_i} \quad (3.12)$$

Por otro lado, una luz que tiene una distribución espectral denotada como  $P(\lambda)$  puede ser considerada como un grupo de luces, y a su vez cada una de estas tiene un ancho de banda estrecho de longitudes de onda  $\Delta(\lambda)$ . Además, una luz que tiene una potencia de  $P(\lambda) W/nm$  en una banda de longitud de onda estrecha  $\Delta(\lambda)$  tiene una potencia total de  $P(\lambda)\Delta(\lambda)$  en esa banda de longitud de onda. Por consiguiente, los valores triestímulos  $R$ ,  $G$  y  $B$  se pueden obtener de otra manera, sustituyendo  $P(\lambda)\Delta(\lambda)$  por  $f_i$  en la ecuaciones [3.10](#), [3.11](#) y [3.12](#) quedando reinscritas las ecuaciones ya mencionadas como [22](#):

$$R = \sum_{i=1}^n P(\lambda) \bar{r}_{\lambda i} \Delta \lambda \quad (3.13)$$

$$G = \sum_{i=1}^n P(\lambda) \bar{g}_{\lambda i} \Delta \lambda \quad (3.14)$$

$$B = \sum_{i=1}^n P(\lambda) \bar{b}_{\lambda i} \Delta \lambda \quad (3.15)$$

Así, cuando  $n \rightarrow \infty$ , las ecuaciones (3.13), (3.14) y (3.15) se convierten en integrales tales que:

$$R = \int_{vis} P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d(\lambda) \quad (3.16)$$

$$G = \int_{vis} P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d(\lambda) \quad (3.17)$$

$$B = \int_{vis} P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d(\lambda) \quad (3.18)$$

donde la integral se define sobre toda la región de longitud de onda visible o espectro visible donde los valores triestímulos R, G y B obtenidos mediante las ecuaciones anteriores nos dan una manera única para determinar el color de un estímulo de cualquier distribución espectral arbitraria [22], [15], [16]. Finalmente, para un color de objeto, la función de estímulo se encuentra definida por la multiplicación de la distribución espectral de la luz iluminada y la reflectancia espectral (transmitancia) del objeto y así la misma derivación se mantiene para la distribución espectral resultante.

### 3.2. Conversión del sistema XYZ a RGB

Para lograr una medición universal y para compararla con imágenes capturadas, se requiere una transformación de los valores triestímulos XYZ al espacio de color RGB. La conversión correspondiente esta dada de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [ M ]^{-1} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Donde:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Así,  $M$  es la matriz de referencia de un blanco en particular y el vector  $XYZ$  contiene a los valores triestímulos  $XYZ$  [1]. Pero si se tiene  $RGB$ ,  $XYZ$  se puede obtener a partir de:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = [ M ] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Esto se deduce de la ecuación 3.19. Aunque para obtener un sistema colorimétrico, se tienen que definir los valores de triestímulo  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  de un estímulo de color, estos valores se pueden calcular a partir de obtener los valores triestímulos  $R$ ,  $G$  y  $B$  como se mostró anteriormente, sin embargo es posible obtener  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  directamente a partir de las funciones de coincidencia de color  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$ . A través de este procedimiento, se puede describir una coincidencia de color de la siguiente forma [16]:

$$X = k \int_{vis} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda) \quad (3.22)$$

$$Y = k \int_{vis} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda) \quad (3.23)$$

$$Z = k \int_{vis} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda) \quad (3.24)$$

donde  $k$  es una constante que se selecciona de modo que el valor triestímulo  $Y$  produzca un valor de 100 para un objeto reflectante perfecto, se elige  $Y$  ya que es el valor triestímulo que representa la reflectancia luminosa o transmitancia de un objeto reflectante [22]. Por otro lado, la integral esta definida en el espectro visible y  $\phi(\lambda) = S(\lambda)p(\lambda)$ , tomando que  $S(\lambda)$  es el espectro de distribución de la luz de iluminación y  $p(\lambda)$  la reflectancia espectral del objeto reflectante, así a partir de lo anterior podemos reescribir las ecuaciones 3.22, 3.23 y 3.24 como:

$$X = k \int_{vis} S(\lambda)p(\lambda)\bar{x}(\lambda)d(\lambda) \quad (3.25)$$

$$Y = k \int_{vis} S(\lambda)p(\lambda)\bar{y}(\lambda)d(\lambda) \quad (3.26)$$

$$Z = k \int_{vis} S(\lambda)p(\lambda)\bar{z}(\lambda)d(\lambda) \quad (3.27)$$

Donde:

$$k = \frac{100}{\int_{vis} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d(\lambda)}$$

[14], [21].

### 3.3. Normalización de los valores XYZ

Como se quiere estudiar la cromaticidad de un color medido, se puede pasar por alto el valor de brillo, teniendo en cuenta que no se encuentra muy relacionada con la intensidad de la luz percibida a través de la normalización de los valores RGB. Los espectros se suelen expresar de forma normalizada, usando las coordenadas de valores reales  $(x, y, z)$  definida de la siguiente manera [14]:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3.28)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3.29)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (3.30)$$

- Las ecuaciones (3.28), (3.29) y (3.30) son la proyección del punto  $(X, Y, Z)$  en el plano  $x + y + z = 1$ .
- La coordenada  $(x, y)$  especifica un tono de color, así como también se le denomina coordenadas CIE.
- La entrada en  $z$  depende de  $x$  e  $y$ , dado que  $z = 1 - x - y$ .

## 3.4. Técnicas de medición y estudio del color

### 3.4.1. Espectroscopía

La espectroscopía es el estudio de la materia usando radiación electromagnética. Si bien esta definición es nominalmente correcta, es bastante simple [4]. Sobre esta base, se podría argumentar que todo lo que sabe sobre el universo proviene de la espectroscopía, ya que gran parte de lo que se aprende proviene de lo que se puede ver en el mundo que nos rodea [27]. Pero el simple hecho de mirar una imagen o pintura generalmente no se considera espectroscopía, aunque la acción podría implicar el estudio de una materia a plena luz del día.

Las propiedades de las ondas de luz como lo son: frecuencia, longitud de onda, fase, amplitud, intensidad, energía y polarización son de interés para la espectroscopía [13], [18]. Cuando la luz interactúa con la materia, cambia una o más de estas propiedades de la onda de luz. Si ninguna de ellas cambiara, entonces la espectroscopía no sería posible.

Típicamente, la espectroscopía de absorción y emisión depende de la capacidad de medir la intensidad de las ondas de luz, porque para las ondas de luz, la intensidad esta relacionada con la amplitud y con la longitud de onda [12].

### 3.4.2. Colorimetría Espectral

La colorimetría espectral es un método mediante el cual los valores colorimétricos se obtienen mediante el cálculo de la distribución espectral medida de una fuente o la reflectancia espectral medida (o transmitancia) de un objeto [22]. Las mediciones se realizan mediante un espectrómetro. Un espectrómetro utiliza un monocromador para dispersar la luz emitida por una fuente en componentes monocromáticos y un fotorreceptor para medir la cantidad de radiación en cada longitud de onda. La radiación incidente pasa a través de una rendija de entrada y se convierte en un haz paralelo. Luego, un prisma dispersa el haz para producir un espectro de radiación de diferentes longitudes de onda. Así una lente enfoca la radiación dispersada en una rendija de salida. Por lo tanto, la radiación monocromática de cualquier longitud de onda deseada se puede extraer cambiando la posición de la ranura de salida. Este tipo de monocromador se denomina monocromador único porque utiliza un solo sistema de dispersión [15], [16].

Por otro lado, una rejilla de difracción se usa frecuentemente como elemento de dispersión en lugar de un prisma [31], [12]. Una rejilla de difracción comprende numerosas líneas paralelas equidistantes trazadas en una superficie plana donde se produce un espectro por interferencia entre los haces de radiación transmitidos por las numerosas rendijas así formadas. La radiación emitida desde la fuente pasa a través de un sistema óptico que comprende una rendija, una lente de colimación y una rejilla de difracción. Luego pasa a través de un segundo sistema similar y es dirigido alternativamente por una lente de sector giratorio sobre un objeto de referencia y el objeto de prueba, que se colocan sobre aberturas en una esfera integradora, esta esfera cuya superficie interior está recubierta con una pintura blanca reflectante difusa que tiene poca o ninguna selectividad de longitud de onda. En la esfera se proporcionan al menos dos ventanas, conocidas como puertos. La luz entra por un puerto (el puerto de entrada), se difunde y refleja repetidamente dentro de la esfera, y se emite desde la esfera a través del puerto de salida. La radiación reflejada se mide con un fotorreceptor que se dirige a una parte de la pared de la esfera integradora. Un espectrofotómetro como este, con dos elementos dispersos, se llama un espectrofotómetro monocromador doble. El uso de un monocromador doble reduce la radiación de longitudes de onda no deseadas [10], [12].

### 3.4.3. Espectrofotometría

La espectrofotometría es un método que se utiliza si una coincidencia debe ser válida bajo todos los tipos de iluminación, por lo cual el único procedimiento infalible es examinar la coincidencia sucesivamente con luz de espectro de todas las longitudes de onda [31].

Antes del desarrollo de la espectrofotometría, no había una base única sobre la cual construir un lenguaje universal de color. La espectrofotometría depende solo de las mediciones de la longitud de onda de la luz y de las mediciones de reflectancia o transmitancia, que pueden determinarse con precisión [22].

---

## INSTRUMENTOS Y ELEMENTOS ÓPTICOS PARA LA MEDICIÓN DE COLOR

---

### 4.1. Fuentes de Luz

El color percibido de un objeto iluminado no solo depende de su color intrínseco o reflectivo espectral, sino también del espectro de potencia de la fuente de luz. Una fuente de luz esta definida simplemente como un grupo de átomos radiantes. Sin luz es muy poco probable que haya color. Por tanto, las fuentes de luz juegan un papel muy importante en la colorimetría. Si el color es auto-luminoso, como por ejemplo los fuegos artificiales, entonces la fuente de luz es el color [14].

Por lo regular, los colores son asociados con objetos que, en lugar de ser auto-emisores, reflejan o transmiten la luz que es emitida por algunas fuentes de luz. La naturaleza de las fuentes de luz puede tener un efecto muy significativo en la apariencia de los objetos de color. Un ejemplo de ello son los objetos de color rojo que se vuelven de color marrón oscuro o negro cuando son observados bajo lámparas de sodio amarillas que se usan comúnmente para la iluminación de las calles [14]. También se sabe que en comparación con su apariencia en la luz del día, los objetos rojos y amarillos vistos bajo la luz de filamento de tungsteno, o la luz emitida por las

velas, estos colores se perciben más claros y coloridos, mientras que los objetos azules se ven más oscuros y menos coloridos. Si el sistema visual no pudiera adaptarse al nivel y al color de la iluminación predominante, los cambios de color que se observarían serían mayores.

Para reflejar y transmitir los colores de los objetos, los valores triestímulos de R, G y B, y cualquier medida colorimétrica derivada de ellos, carecen de significado, a menos que también se especifique la fuente de luz utilizada. Es así que, esta claro que la especificación adecuada de las fuentes de luz es una parte esencial de la colorimetría.

Existen diferentes tipos de fuentes de luz, los cuales se encuentran clasificados por [14] como se muestra a continuación:

- Emisión de un gas:
  - Lámparas de sodio.
  - Lámparas de mercurio.
  - Lámparas fluorescentes.
  - Lámparas de xenón.
- Emisión térmica:
  - Fuentes de luz incandescente.
  - Lámparas de tungsteno.
  - Luz natural, entre otras.
- Emisión por aceleración de carga eléctrica:
  - Efecto cherenkov
  - Aceleradores de partículas
  - Algunas estrellas
- Emisión por amplificación
  - Láseres semiconductores
  - Láseres de gas
  - Láseres de estado sólido

Para esta tesis se va describir que es un diodo emisor de luz de acuerdo a [26]:

- **Diodos emisores de luz:** Un diodo emisor de luz (LED) es una fuente de luz de diodo semiconductor, tradicionalmente utilizada como indicador en muchos dispositivos electrónicos. El color de la radiación emitida es una función de la composición del material semiconductor utilizado y puede estar en la región infrarroja, visible o casi ultravioleta del espectro.

La mayoría de los LED emiten luz de una banda estrecha de longitudes de onda, típicamente de aproximadamente 40 nm de ancho; y algunas fuentes están disponibles con más de un LED. De tal manera que, un LED que emita una luz blanca se producen mediante dos métodos diferentes, el primero y más común es por medio de la combinación de un LED rojo, otro verde y un azul. Con esta combinación, se puede ajustar el color resultante.

La figura 4.1 muestra el espectro de luz emitido por este tipo de LED. Si bien esta luz aparecerá blanca para el ojo.

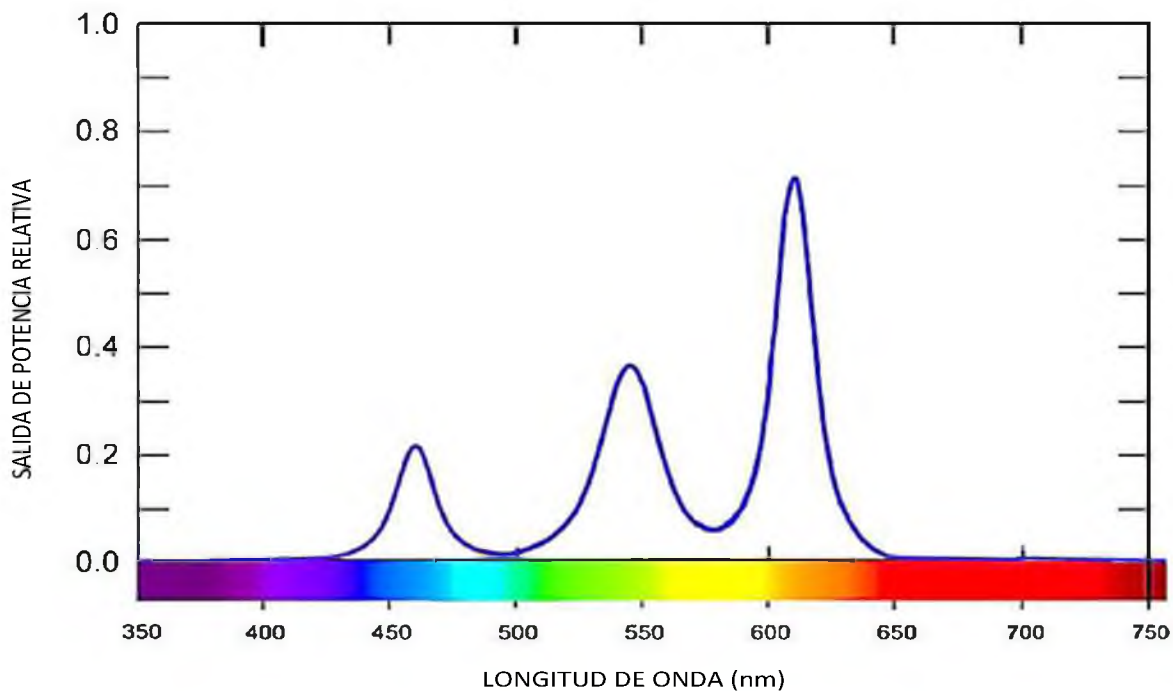


Figura 4.1: Espectros de luz blanca LED tricromáticos.

El segundo método para producir un LED de luz blanca es utilizar un material de fósforo para convertir la luz azul en una luz blanca de amplio espectro de la misma manera que una lámpara fluorescente convierte la luz. La figura 4.2 muestra el espectro de un LED de luz blanca fluorescente.

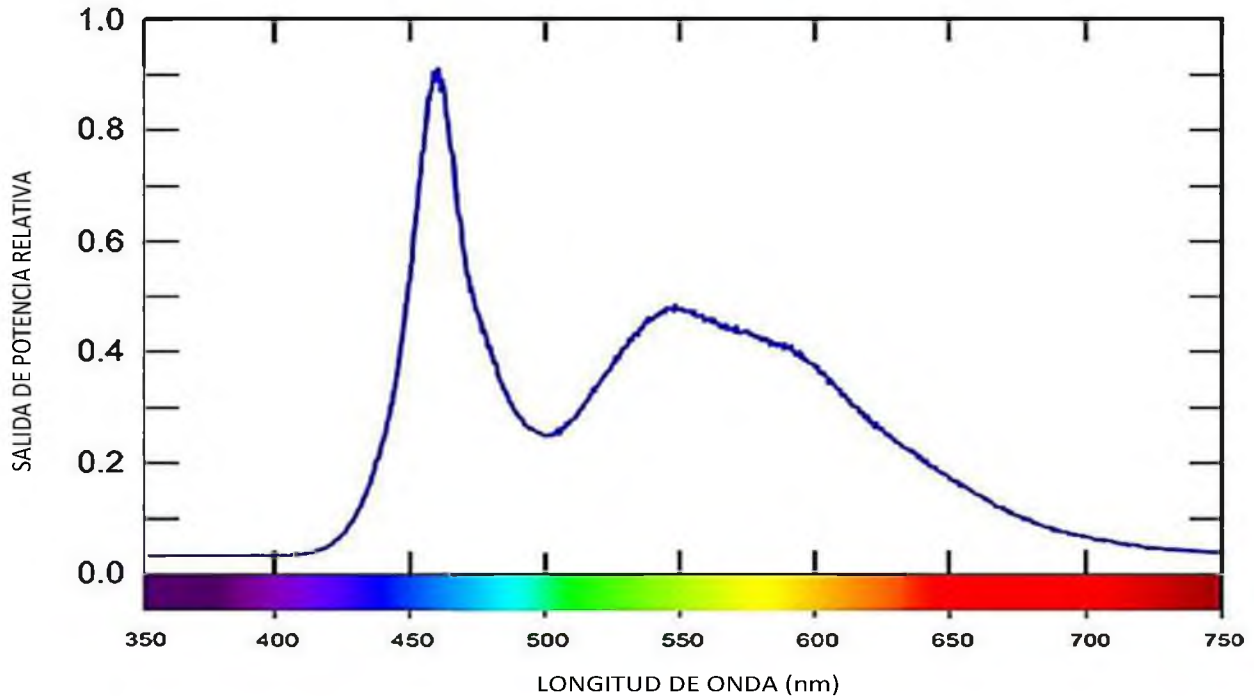


Figura 4.2: Espectros de luz blanca LED fluorescente.

Las principales características de los LED que los diferencian de las fuentes de luz más comunes son las siguientes por [14]:

- **Ventajas**

- *Eficacia luminosa*: Los LED producen más luz por volts que las fuentes de luz incandescente o, a veces, incluso fluorescentes. La eficacia de los LED puede ser superior a 100 lúmenes por volts, mientras que las lámparas halógenas de tungsteno proporcionan aproximadamente 20 lúmenes por volts, y las lámparas fluorescentes entre 60 y 100 lúmenes por volts.
- *Color*: Los LED pueden fabricarse para emitir casi cualquier color deseado con un espectro relativamente estrecho, dentro del espectro visible.

- *Tamaño:* Los LED se pueden fabricar en pequeñas dimensiones (mm), y ahora hay disponibles muchos tamaños y formas diferentes.
- *Ciclo:* Los LED pueden encenderse y apagarse o pulsarse muy rápidamente o con una frecuencia alta. Esta característica es especialmente útil para la transmisión de información en un haz de luz codificado por impulsos. Otra aplicación común que se beneficia de esta característica es la visualización de imágenes.
- *Vida útil:* Los LED tienen una vida útil larga, hasta 50,000 horas.
- **Desventajas**
  - *Sensibilidad de voltaje:* Los LED deben tener una fuente de alimentación con una tolerancia menor en voltaje y corriente que otras fuentes de luz dependiendo de las características de este.
  - *Color de la luz:* Los espectros de los LED son generalmente más monocromáticos que otras fuentes de luz, pero su blancura está lejos de la de las lámparas incandescentes.

## 4.2. Dispersión del color

La dispersión también es conocida como refracción dispersiva. Lo mencionado a continuación es en base a [27]. En la región visible de una sustancia transparente, el índice de refracción  $n$  en la longitud de onda  $k$  está dado a partir de la fórmula de dispersión de Sellmeier:

$$n^2 - 1 = a\lambda^2(\lambda^2 - A^2)^{-1} + b\lambda^2(\lambda^2 - B^2)^{-1} \quad (4.1)$$

donde  $A, B, \dots$  son las longitudes de onda de las absorciones infrarrojas y ultravioletas individuales,  $a, b, \dots$  son constantes que representan las resistencias de estas absorciones. Es importante mencionar que para alcanzar un ajuste excelente en la región es suficiente dos o tres términos, que correspondan a las absorciones más próximas a la región visible [22]. Ahora, cuando existe una absorción de luz en la región visible, pero en un material semitransparente, se produce una dispersión igual a la del caso anterior pero ahora es necesario usar en la fórmula de Sellmeier el índice de refracción complejo, es decir que en lugar de  $n$  como un solo término se use  $n = N + ik$ , donde  $i$  es el imaginario  $\sqrt{-1}$  y  $k$  es el coeficiente de absorción. Por lo que la variación de  $n$  y  $k$  en un vidrio que tiene un color violeta presenta una absorción a una longitud de onda de  $550nm$  en la parte central del espectro visible como se muestra en la figura 4.3.

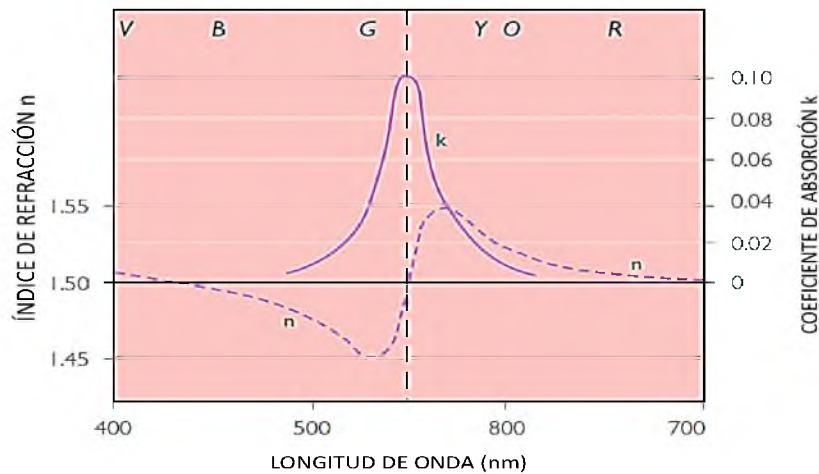


Figura 4.3: Índice de refracción y coeficiente de absorción en un vidrio crown violeta que tiene una banda de absorción a 550 nm.

En la región de absorción, la frecuencia de resonancia natural interactúa con la vibración de la luz donde se involucra la velocidad de fase y el ángulo de fase, dando como resultado un aumento de la luz, y así un índice de refracción  $n$  menor, en el lado de longitud de onda corta de la absorción, y una disminución, con un índice de refracción  $n$  más alto, en el otro lado. En la región central de la absorción, el índice de refracción aumenta con la longitud de onda, en lugar de disminuir como de costumbre. Esta región es difícil de observar, ya que ocurre exactamente donde la luz se absorbe más fuertemente. Si un haz de luz pasa a través de un prisma que separa los colores como se muestra en la figura 4.4, entonces la secuencia de colores que se ve es la secuencia espectral normal que se muestra en la parte superior de la figura 4.5.

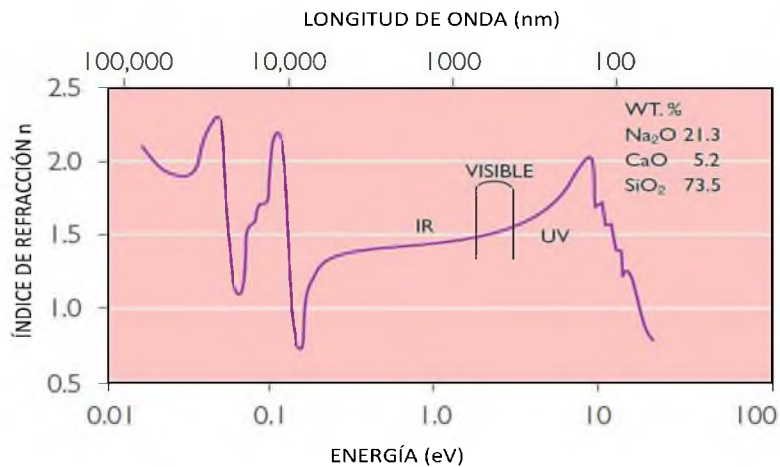


Figura 4.4: La curva de índice de refracción extendida de un vidrio crown transparente.

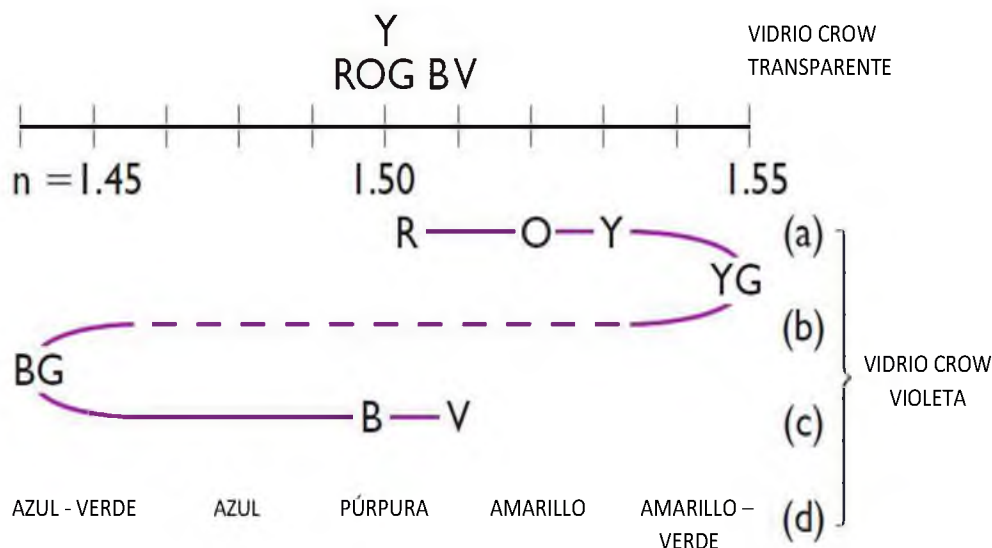


Figura 4.5: Secuencias de color producidas por la dispersión en un vidrio transparente.

El vidrio de la figura 4.3, que absorbe a 550 nm en la parte verde del espectro, tiene, por lo tanto, el color violeta complementario; aquí se aplica la secuencia en la mitad inferior de la figura 4.5. La secuencia de rojo a amarillo-verde en (a) sigue el comportamiento normal como se muestra arriba en la figura 4.5 y a la derecha en la figura 4.3, al igual que la secuencia de azul-verde a violeta en (c), nuevamente correspondiente a la secuencia de colores arriba en la figura 4.3 y a la izquierda en la figura 4.5. La secuencia amarilla-verde a azul-verde en (b) en la figura 4.5 se invierte. El “verde” de 550 nm en sí mismo con un índice de refracción  $n = 1.50$  no aparece aquí, ya que está totalmente absorbido. La secuencia general de colores que se observa desde este prisma se muestra en (d) en la figura 4.5. En comparación con el espectro normal, esto es igual, tanto en la secuencia de colores como en el ancho del espectro. Si se conoce la variación del índice de refracción o la variación del coeficiente de absorción para todas las longitudes de onda de una sustancia, entonces la otra puede calcularse mediante el uso de las relaciones de dispersión de Kramers-Krönig. Por lo general, se piensa que la absorción es la causa y la dispersión el efecto, pero los dos son confusamente interdependientes, es decir, uno no puede existir sin el otro. Además del espectro producido por un prisma, hay una variedad de fenómenos de color producidos por dispersión [25].

### 4.3. Detectores y Espectrómetros

Un detector podría ser cualquier dispositivo de medición de corriente, termómetro, medidor de potencia óptica, fluorómetro, dispositivo de medición de presión, cámara, espectrómetro, magnetómetro, etc. En principio, un detector siempre mide la señal de salida del transductor [12]. Todos los tipos de detectores están bien documentados en la literatura general e industrial, así como en las especificaciones [18]. Por esto, no es necesario comenzar desde cero, para esta tesis es importante conocer el funcionamiento de un espectrómetro que se describe con más detalle a continuación.

Un espectrómetro es un dispositivo que mide la intensidad de la luz para un intervalo de longitudes de onda en un rango espectral determinado [31]. Un instrumento espectroscópico generalmente consiste en una hendidura de entrada, un colimador, un elemento dispersivo, como una rejilla o un prisma, un enfoque óptico y un detector o conjunto de detectores. El detector incorporado en el espectrómetro es generalmente una matriz lineal CCD de miles de píxeles, lo que lleva a un procesamiento rápido de los datos espectroscópicos.

Las mediciones espectroscópicas se utilizan en muchas aplicaciones diferentes, como las mediciones de color, la determinación de la concentración de componentes químicos o el análisis de radiación electromagnética. El espectrómetro tiene un conector de entrada de fibra óptica, lentes de enfocamiento y colimación, y una rejilla de difracción de la luz que pasa a través de la fibra óptica y entra en el espectrómetro. La rejilla tiene pocos cientos de líneas/mm y un ángulo de radiancia que permite aplicaciones en el rango de longitud de onda deseado. En el banco óptico, la luz entra a través de un conector de fibra estándar y es colimada por una lente esférico. Una vez difractada la luz colimada es enfocada mediante una segunda lente esférico en la matriz de detección lineal unidimensional. La elección de estos componentes, como la rejilla de difracción, la ranura de entrada, el filtro de ordenación y el revestimiento del detector, tiene una gran influencia en las especificaciones del sistema, como sensibilidad, resolución, ancho de banda y luz parásita [12]. Como el proceso de captura de datos es inherentemente muy rápido, la velocidad de medición permite el análisis en línea. Actualmente los espectrómetros se interconectan con una computadora y es de donde se pueden exportar los datos de salida.

## 4.4. Fibra Óptica

La fibra óptica es un filamento de material dieléctrico, como el vidrio o plásticos de alta calidad, esta compuesta de pequeñas fibras capaces de conducir y transmitir luz o impulsos luminosos en variadas frecuencias de uno a otro de sus extremos, esta es una guía de ondas que opera a frecuencias ópticas [2].

Cada filamento esta constituido de un núcleo central de plástico o cristal (óxido de silicio y germanio) con un índice de refracción alto y esta rodeado de una capa de un material similar con un índice de refracción ligeramente menor (plástico) [11].

Los principios básicos de su funcionamiento se justifican aplicando las leyes de la óptica geométrica, la ley de la refracción (principio de reflexión interna total) y la ley de Snell [12]. Su utilización está basada en transmitir por el núcleo de la fibra un haz de luz, tal que este no atraviese el recubrimiento, sino que se refleje y se siga propagando. Esto se consigue cuando el índice de refracción del núcleo es mayor al índice de refracción del revestimiento, y si el ángulo de incidencia es superior al ángulo límite [11].

Existen dos tipos de fibra óptica las cuales se clasifican de la siguiente manera [2] y [11]:

- **Fibra monomodo:** Es una fibra óptica en la que la luz se propaga en un modo. Se logra disminuyendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño que sólo permite un modo de propagación. Su transmisión es de forma paralela al eje de la fibra y a diferencia de las fibras multimodo éstas permiten alcanzar grandes distancias y transmitir altas cantidades de información.
- **Fibra multimodo:** Es la fibra óptica en la que los haces de luz pueden circular por más de un modo o camino por lo que se supone que no llegan todos a la vez. Una fibra multimodo puede llegar a tener más de mil modos de propagación de luz. Estas fibras se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 2 km.

---

## DISEÑO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

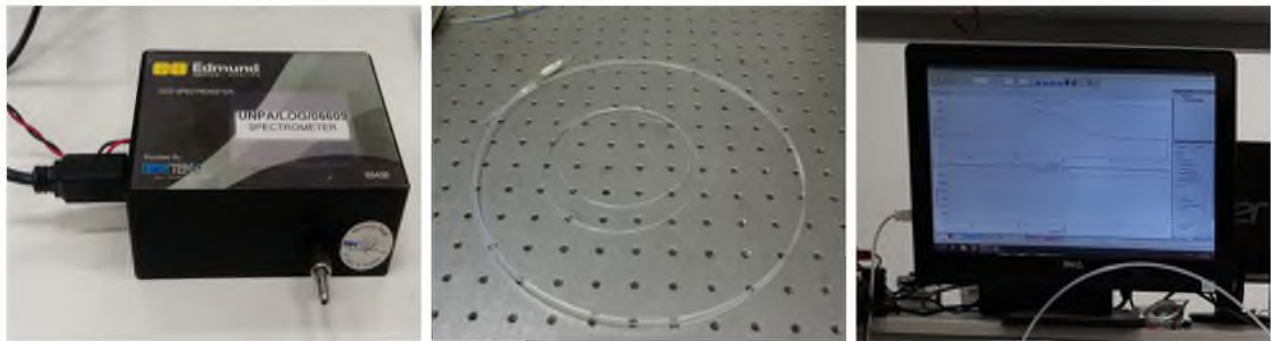
---

### 5.1. Diseño experimental

Una vez que se llevó a cabo el estudio y análisis de la teoría que se requiere para cumplir con el objetivo deseado en esta tesis, el siguiente paso a seguir es plantear el arreglo experimental que se utilizó. Para ello los instrumentos que se requirieron son: Caja negra para el sistema de medición, un LED, una fuente de voltaje directa, un espectrómetro, fibras ópticas multimodo de acrílico y una computadora de escritorio. Las características específicas de cada uno de los elementos antes mencionados se muestran en las siguientes imágenes.



(a) Caja negra de dimensión  $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$  para el sistema de medición.  
(b) LED de color blanco OPTEK TECHNOLOGY modelo 3003LK-3 .  
(c) Fuente de voltaje directa Matrix OVSPW1BCR4 de  $1\text{Watt}$  de potencia,  $350\text{mA}$ ,  $3.5\text{V}$ .



(d) Espectrómetro de laboratorio (e) Fibras ópticas de Acrílico (f) Computadora de escritorio, SO BRC1K Edmund Optics con rango (plástico) con diámetro de  $3mm$  y Windows 8 single lenguaje, índice de longitud de onda de  $380nm - 1mm$  y un índice de refracción del núcleo de 1.49 y 1.492 respectivamente, además de una tolerancia de cesador  $x64$ .  
 750nm y resolución espectral de núcleo de  $\pm 0.03$  e índice de refracción del revestimiento de 1.402.

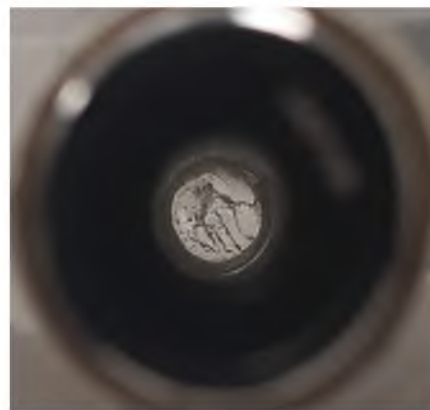
Figura 5.1: Elementos principales para la realización del experimento.

### 5.1.1. Pulido de fibra óptica

Se realizó el pulido de las fibras ópticas mencionadas anteriormente. En la figura 5.2 se puede observar con detalle las rupturas que presentan estas fibras originalmente después de un corte transversal, más adelante se planteará el motivo por el cual se requiere que la fibra sea pulida transversalmente.



(a) Fibra de  $1mm$  de diametro.



(b) Fibra de  $3mm$  de diametro.

Figura 5.2: Fotografías correspondientes a las fibras ópticas plásticas no pulidas observadas a partir de un objetivo óptico.

En la figura 5.2 se utilizó un objetivo óptico con el propósito de poder visualizar con más detalle la apariencia original de una fibra después de llevar a cabo un corte en uno de sus extremos. La necesidad de tener fibras ópticas pulidas transversalmente es de gran importancia ya que ayuda a reducir las pérdidas de transmisión e intensidades de la luz en las fibras.

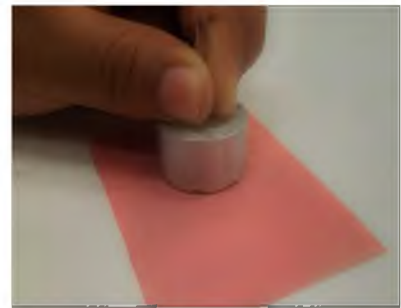
De acuerdo a lo mencionado anteriormente para pulir las fibras se utilizó primero una lija con tamaño de grano 500 posteriormente una más fina de grano 600 y finalmente una especial para pulido de fibra de grano 1000. El movimiento realizado para el pulido de las fibras de acuerdo con las lijas ya antes mencionadas se da en forma de un 8 para dar un pulido uniforme. El método de pulido se ilustra en las siguientes imágenes.



(a) Pulido de fibra con lija de grano 500



(b) Pulido de fibra con lija de grano 600



(c) Pulido con lija especial para fibra óptica de grano 1000

Figura 5.3: Proceso de pulido de las fibras ópticas para el arreglo experimental.

Como resultado final del procedimiento de pulido se logró eliminar las rupturas ocasionadas por el corte transversal, puesto que los extremos de cada fibra deben presentar una apariencia lisa y uniforme como se puede observar en la figura 5.4.



(a) Fibra pulida de 1mm.



(b) Fibra pulida de 3mm.

Figura 5.4: Acabado final del pulido transversal de las fibras ópticas correspondientes.

Después de llevar a cabo el pulido correspondiente para ambas fibras se verificó la transmisión de la luz en ellas como se muestra en la siguiente figura.

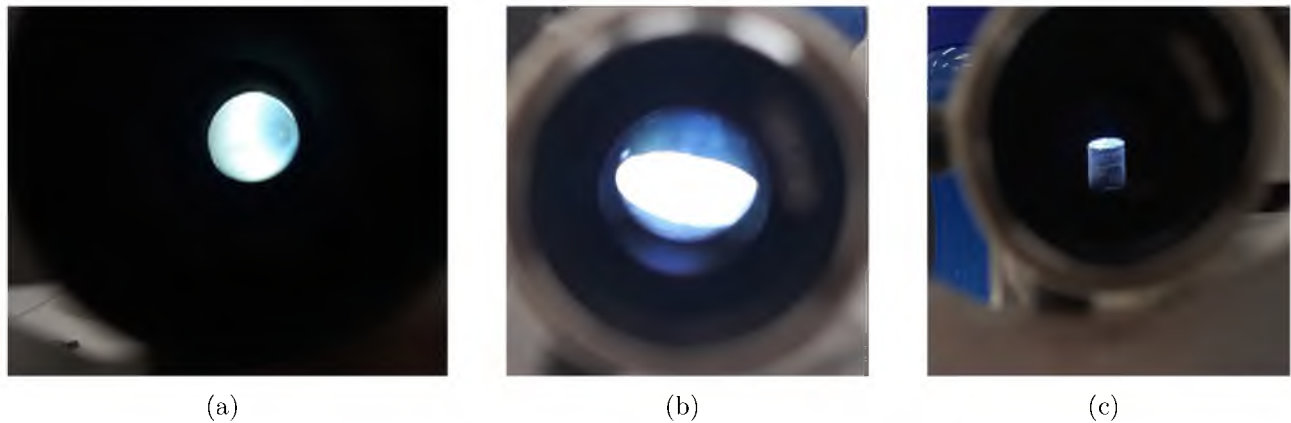


Figura 5.5: Transmisión de la luz en las fibras ópticas pulidas, observadas a partir de un objetivo óptico en distintos ángulos.

### 5.1.2. Funcionamiento del arreglo experimental

Una vez teniendo los instrumentos ópticos como electrónicos se construyó el prototipo del colorímetro para la obtención de mediciones de las muestras. El arreglo experimental propuesto para esta tesis esta sistematizado de la siguiente manera.

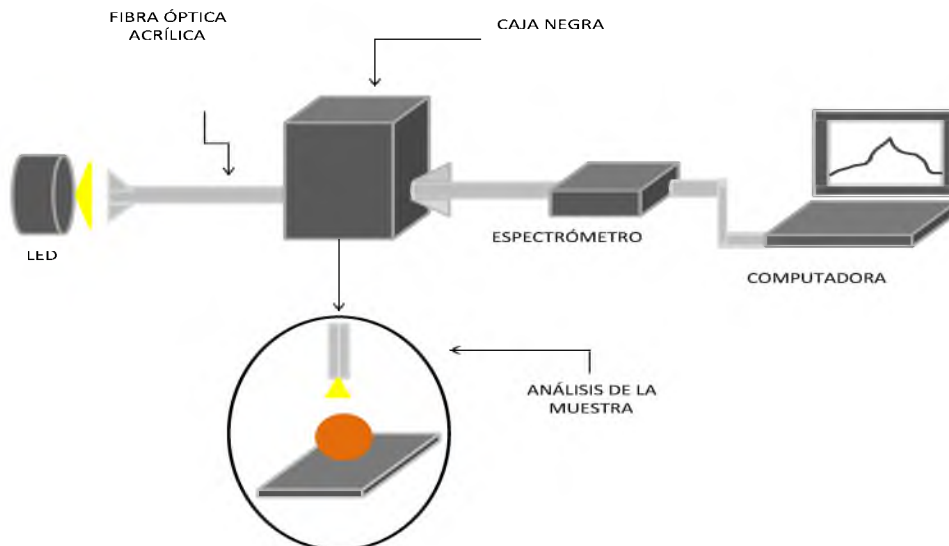
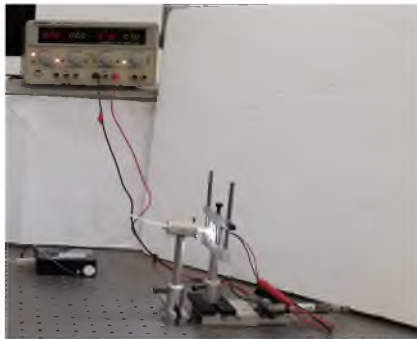
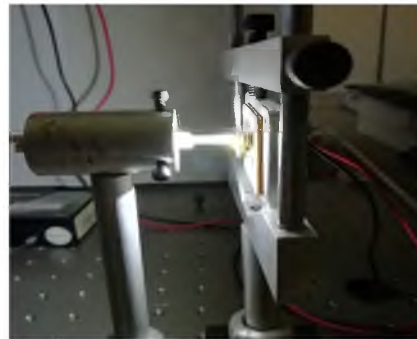


Figura 5.6: Esquema y principio del funcionamiento del arreglo experimental.

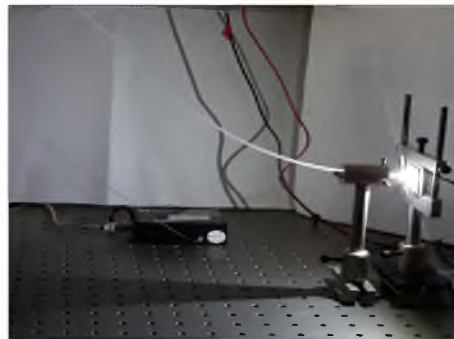
A continuación se describirá a detalle el funcionamiento del arreglo experimental. En primer lugar el LED debe estar alimentado por la fuente de voltaje directa (figura 5.7(a)) y mediante la fibra óptica de 3mm se transmite la luz emitida por el LED (figura 5.7(b) y 5.7(c)).



(a) LED alimentado por la fuente de voltaje directa.



(b) Haz de luz emitiendo en la fibra óptica de 3mm.



(c) Transmisión de la luz por medio de la fibra de 3mm.

Figura 5.7: Funcionamiento del LED con la fuente y la fibra.

Posteriormente esta fibra es introducida en la caja negra (figura 5.8(a) y 5.8(b)),



(a) Fibras por fuera de la caja negra.



(b) Fibra por dentro de la caja negra.

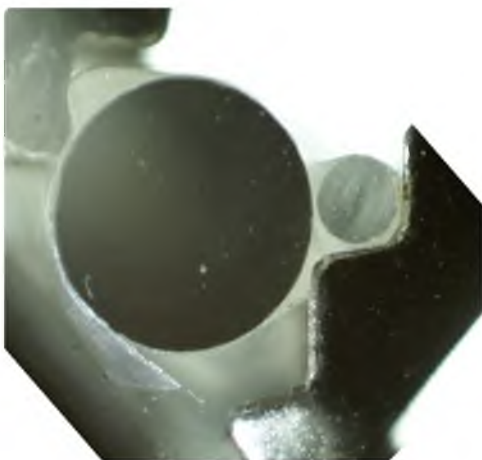
Figura 5.8: Fibras ópticas aisladas en la caja negra.

luego, la luz que sale de la fibra incide sobre la muestra (figura 5.9),

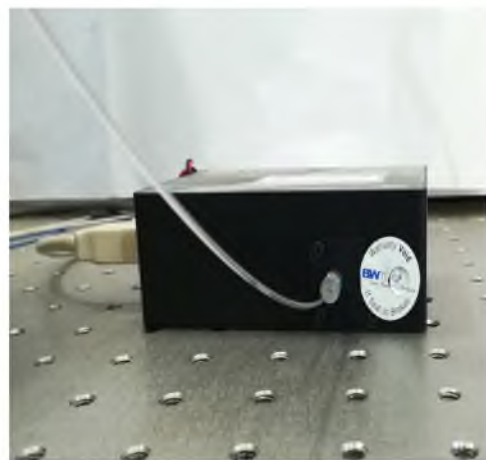


Figura 5.9: Incidencia de luz sobre la muestra y fibra óptica de  $1\text{mm}$  recibiendo la luz reflejada por la muestra.

después la fibra de  $1\text{mm}$  se coloca paralela a la otra fibra haciendo que las puntas queden alineadas (figura 5.10(a)) para que la luz que se refleja de la muestra incida en ella y sea conducida al espectrómetro que está conectado en el otro extremo de la fibra (figura 5.10(b)).



(a) Alineación paralela de las fibras ópticas



(b) Fibra de  $1\text{mm}$  conduciendo la luz reflejada de la muestra al espectrómetro.

Figura 5.10: Método de obtención de la luz reflejada por la muestra.

Por último el espectrómetro se encuentra conectado a la computadora mediante un cable USB 2.0 para la obtención del espectro (figura 5.11).



Figura 5.11: Reconocimiento del espectrómetro en la PC.

El arreglo experimental propuesto en general queda de la siguiente manera:

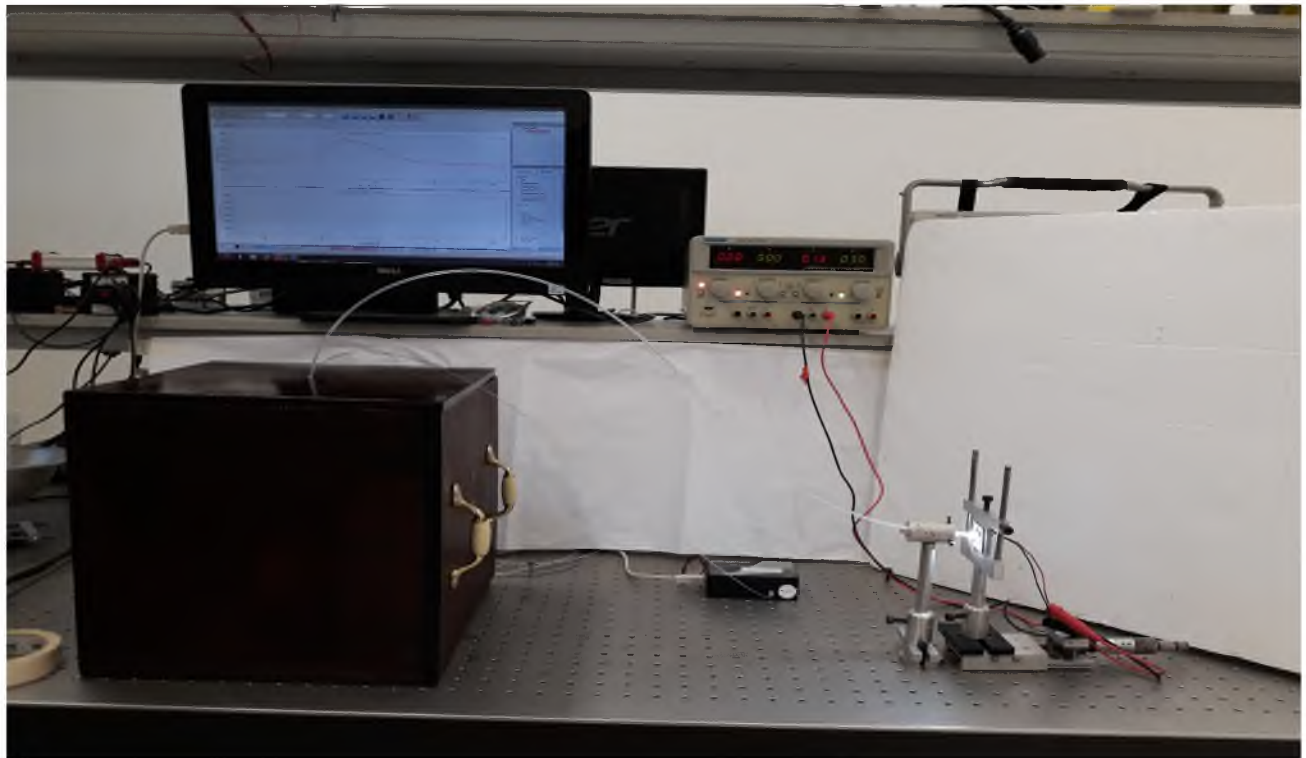


Figura 5.12: Arreglo experimental que se utilizó para realizar las mediciones de las muestras de tomate.

## 5.2. Obtención de espectros de tomates en distintas etapas de madurez

Después de montar el arreglo experimental se hicieron las primeras pruebas para verificar la eficiencia del sistema y posteriormente llevar a cabo la obtención de datos del espectro de las muestras donde estas se obtuvieron a partir del software BWSpec del espectrómetro. Las mediciones realizadas fueron para 5 tomates de la variedad *solanum lycopersicum* (*saladette*) en distintas etapas de madurez. De modo que, cada tomate presenta una coloración distinta entre ellos como se observa en la figura [5.13](#).



Figura 5.13: Muestras de tomates en distintas etapas de madurez utilizadas para la obtención de datos experimentales.

Las mediciones de las 5 muestras fueron realizadas en el orden que se presenta en la imagen anterior, tomando de izquierda a derecha en el respectivo orden, en cada muestra se tomaron 5 mediciones para el análisis de sus respectivos espectros.

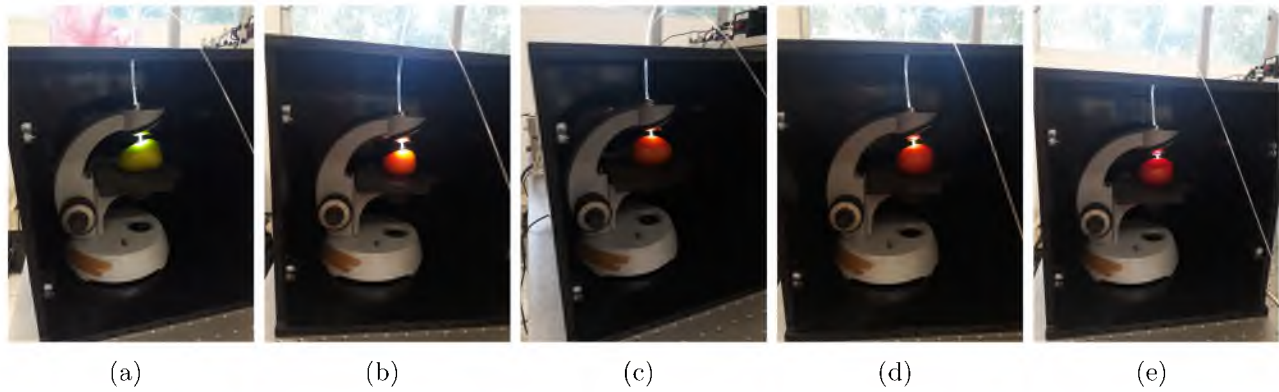


Figura 5.14: Luz incidiendo y transmitiendo a través del arreglo de fibras en la muestra

Ahora bien, como se ha venido describiendo se realizaron las mediciones de los espectros de las distintas muestras ya mencionadas.

Es importante resaltar que en cualquier medición de color es necesario elegir un blanco de referencia y en este caso se utilizó una hoja de papel de color blanco con un espectro igual al que se muestra en la figura [5.15](#)

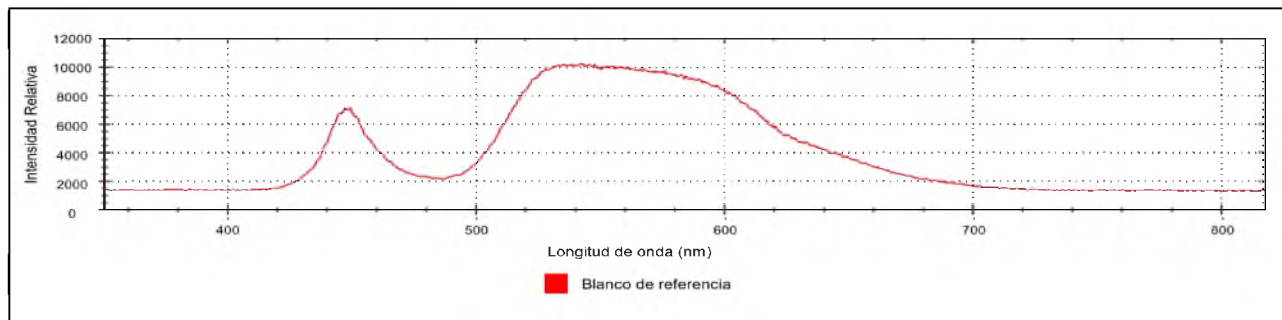
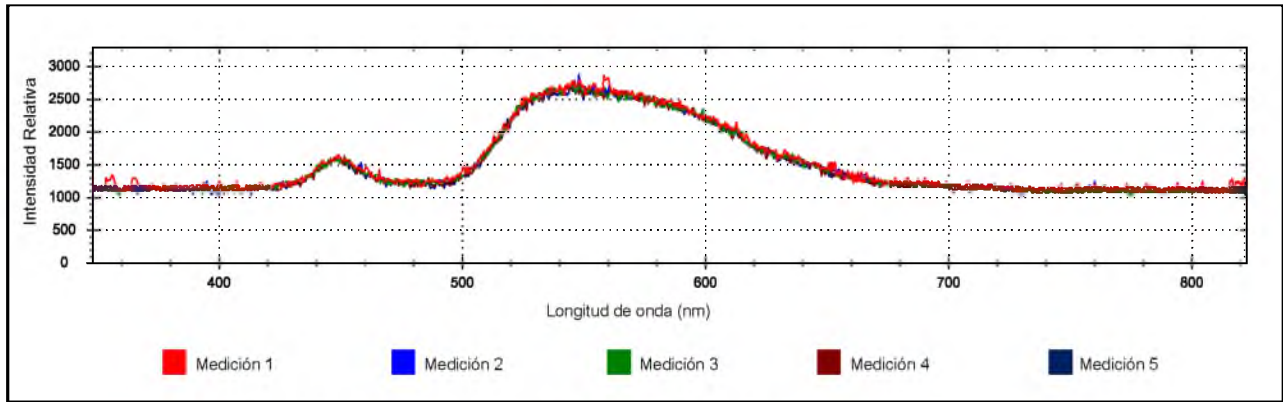


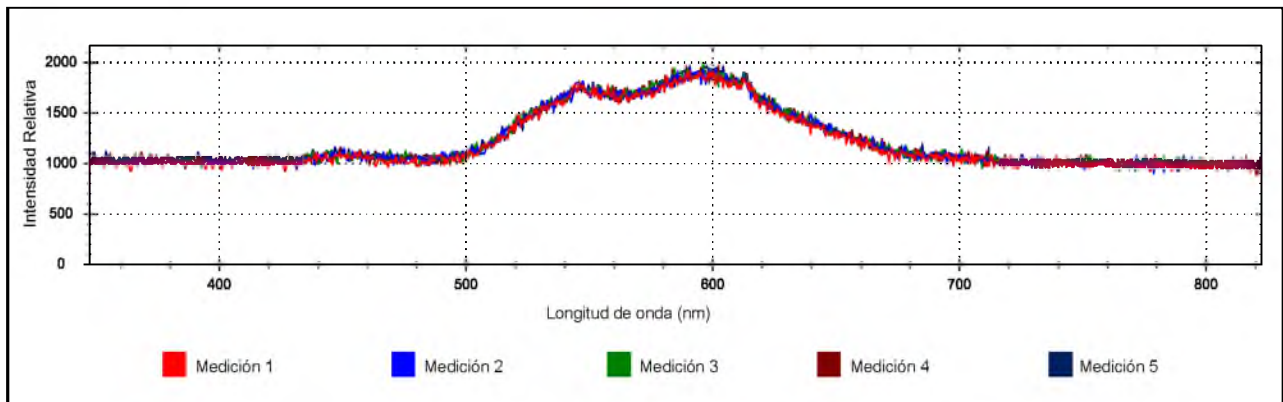
Figura 5.15: Espectro del blanco de referencia de la hoja de papel utilizada para las mediciones de las muestras.

Definido ya el blanco de referencia, se obtuvieron los espectros correspondientes a las 5 muestras de tomates como ya se dijo anteriormente, se tomaron 5 mediciones por cada muestra.

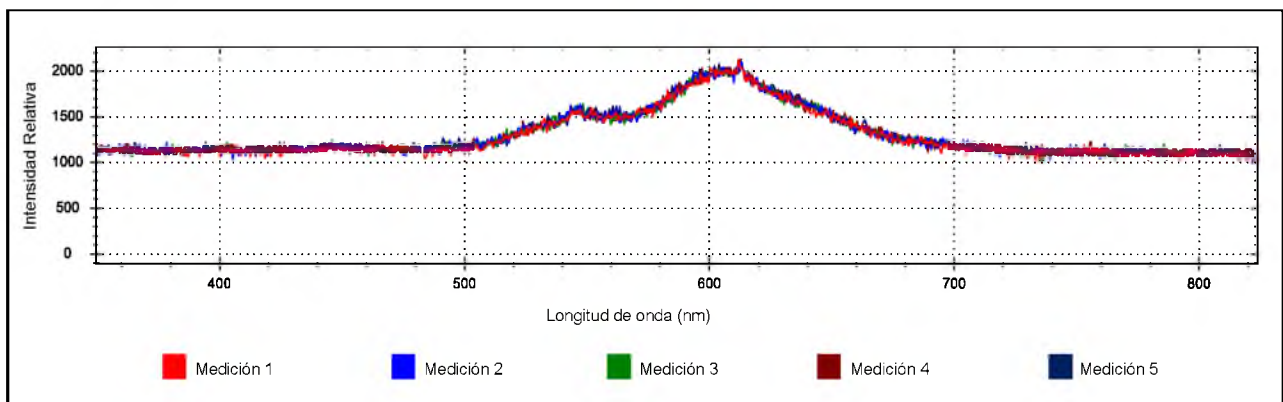
Lo que se obtuvo a partir del arreglo experimental fueron los 5 espectros de cada muestra, así como también los valores de cada punto en el espectro. Las gráficas que se muestran a continuación son una para cada muestra y cada gráfica contiene las 5 mediciones del espectro de cada tomate.



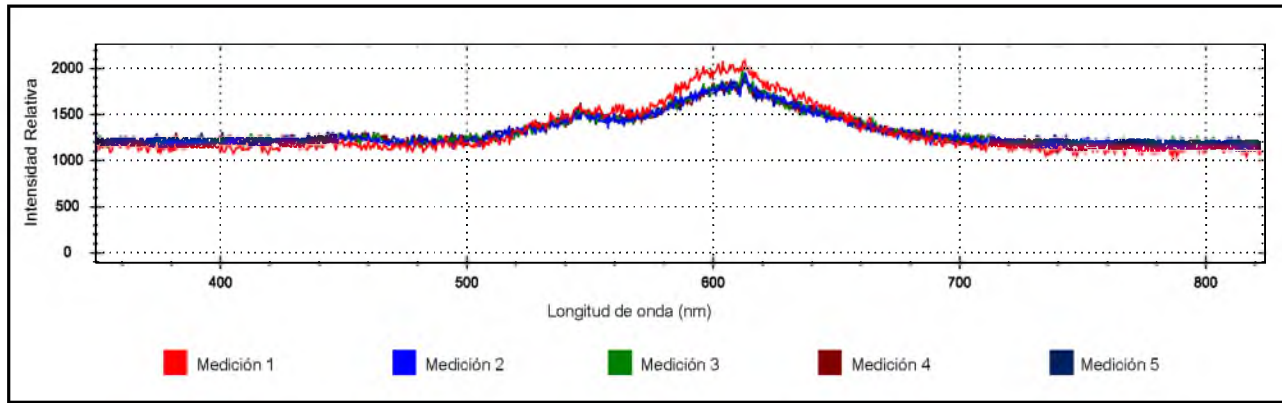
(a) Grafica de los 5 espectros obtenidos a partir de las 5 mediciones realizadas al tomate 1



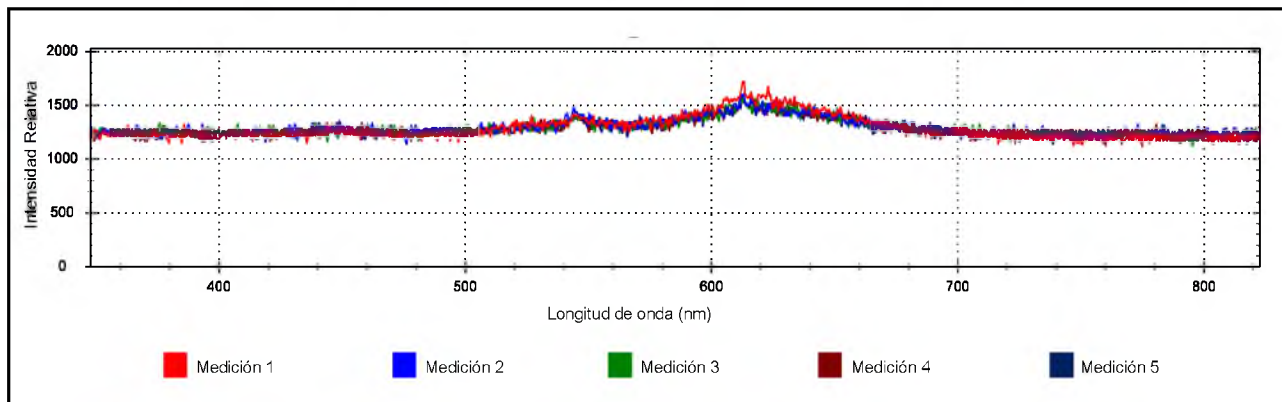
(b) Grafica de los 5 espectros obtenidos a partir de las 5 mediciones realizadas al tomate 2



(c) Grafica de los 5 espectros obtenidos a partir de las 5 mediciones realizadas al tomate 3



(d) Gráfica de los 5 espectros obtenidos a partir de las 5 mediciones realizadas al tomate 4



(e) Gráfica de los 5 espectros obtenidos a partir de las 5 mediciones realizadas al tomate 5

Figura 5.16: Gráfica de los 25 espectros obtenidos a partir de las 5 muestras de tomate.

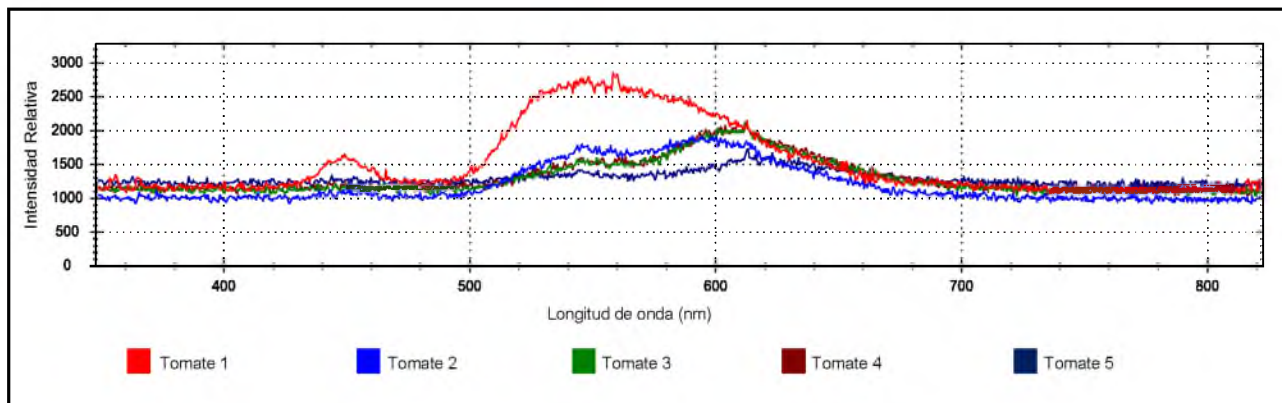


Figura 5.17: Cambio en el comportamiento de la curva espectral conforme aumenta la etapa de madurez de los tomates.

En la figura 5.17 se eligió la primera medición de cada muestra para observar cómo va cambiando el comportamiento de la curva espectral conforme el tomate tiende a madurarse. Solo se tomó una curva espectral de cada muestra, ya que como se puede observar en las gráficas 5.16(a), 5.16(b), 5.16(c), 5.16(d) y 5.16(e) hay pequeñas variaciones respecto a los espectros que pertenecen a la misma muestra. En cada muestra el tiempo de respuesta es el mismo y tanto la fibra como la posición del tomate para todas las muestras se mantienen fijas. Así mismo en la figura 5.17 se observa que cuando la muestra aun no presenta colores rojos tan intensos se obtiene mayor intensidad en la respuesta espectral por parte de ella, esto es, de acuerdo al espectro de emisión del LED (ver figura 5.15).

Es importante mencionar que el cambio en el comportamiento de la curva espectral de las muestras se produce debido al cambio de color en el fruto. La pérdida de color verde es debida a la desaparición de la clorofila que va asociada a la síntesis de compuestos carotenoides. Por otro lado, se tiene que el nivel de concentración de licopeno (*sustancia química que existe en forma natural y que es la responsable del color rojo de las frutas y verduras*) va aumentando conforme el fruto tiende a madurarse y en la mayoría de los casos alcanza valores del 90 % de los pigmentos totales [29], en base a lo anterior se puede decir que existe una diferencia en el contenido de licopeno según el estado de madurez del fruto.

### 5.3. Conversión del espectro de tomate a coordenadas XYZ para la ubicación en el diagrama de CIE

Una vez obtenidos los datos de cada uno de los puntos correspondientes a la curva espectral de cada medición la transformación de estos datos se llevó a cabo mediante el software MATLAB, sin embargo, para ilustrar el procedimiento se incluyen paso a paso el cálculo de los valores triestímulos XYZ, así como también las coordenadas xyz y RGB de la primera medición de la muestra 1.

#### 5.3.1. Obtención de los parámetros XYZ y la ubicación de $xy$ en el diagrama de CIE para la muestra 1

En la tabla 5.1 se muestran los valores de las funciones de coincidencia de color  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$  para un observador CIE 1931(2 grados), además de los datos de  $S(\lambda)$  para el iluminante  $D_{65}$ , así como también los valores correspondientes de  $p(\lambda) = \%T/R$  de la medición 1 obtenidos

por medio del software Bwspec para el tomate 1. Los valores están dados en intervalos de  $10nm$  para una parte del rango del espectro visible entre los  $400nm$  a los  $610nm$ . Cabe mencionar que los datos que se muestran en la siguiente tabla ya están determinado en la literatura y se muestran en cualquier libro de colorimetría.

$\lambda$	$S(\lambda) = D_{65}$	$p(\lambda) = \%T/R$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
400	82.7549	0	0.01431	0.000396	0.06785
410	91.486	0	0.04351	0.00121	0.2074
420	93.4318	0	0.13438	0.004	0.6456
430	86.6823	0	0.2839	0.0116	1.3856
440	104.865	3.3432	0.34828	0.023	1.74706
450	117.008	5.0133	0.3362	0.038	1.77211
460	117.812	3.0303	0.2908	0.06	1.6692
470	114.861	0	0.19536	0.09098	1.28764
480	115.923	0	0.09564	0.13902	0.81295
490	108.811	0	0.03201	0.20802	0.46518
500	109.354	4.1234	0.0049	0.323	0.272
510	107.802	8.9991	0.0093	0.503	0.1582
520	104.79	12.055	0.06327	0.71	0.07825
530	107.689	13.8682	0.1655	0.862	0.04216
540	104.405	14.368	0.2904	0.954	0.0203
550	104.046	15.4255	0.43345	0.99495	0.00875
560	100	15.0209	0.5945	0.995	0.0039
570	96.3342	14.9803	0.7621	0.952	0.0021
580	95.788	14.109	0.9163	0.87	0.00165
590	88.6856	13.1001	1.0263	0.757	0.0011
600	90.0062	13.0092	1.0622	0.631	0.0008
610	89.5991	11.3355	1.0026	0.503	0.00034

Tabla 5.1: Valores de  $S(\lambda)$ ,  $p(\lambda)$ ,  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  para una parte del rango del espectro visible entre los  $400nm$  a los  $610nm$  en intervalos de  $10nm$  [15].

Del capítulo 3 se puede decir que:

$$X = k \int_{vis} S(\lambda)p(\lambda)\bar{x}(\lambda)d(\lambda) = k \sum_{i=1}^n S(\lambda)p(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda \quad (5.1)$$

$$Y = k \int_{vis} S(\lambda)p(\lambda)\bar{y}(\lambda)d(\lambda) = k \sum_{i=1}^n S(\lambda)p(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda \quad (5.2)$$

$$Z = k \int_{vis} S(\lambda)p(\lambda)\bar{z}(\lambda)d(\lambda) = k \sum_{i=1}^n S(\lambda)p(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda \quad (5.3)$$

con:

$$k = \frac{1}{\int_{vis} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda}$$

puesto que  $p(\lambda)$  esta expresado en porcentaje (%).

Así en base a los datos de la tabla 5.1 y las expresiones de la segunda igualdad de las ecuaciones anteriores se tiene:

$$\sum_{i=1}^n S(\lambda) p(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta \lambda = 8578.273964 \quad \sum_{i=1}^n S(\lambda) p(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda = 12070.98914$$

$$\sum_{i=1}^n S(\lambda) p(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta \lambda = 2744.026773$$

y

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda} = 968.0906441$$

De ahí resulta que

$$k \sum_{i=1}^n S(\lambda) p(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta \lambda = 8.861023517 \quad k \sum_{i=1}^n S(\lambda) p(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda = 12.46886251$$

$$k \sum_{i=1}^n S(\lambda) p(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta \lambda = 2.83447298$$

Finalmente, se tiene

$$\mathbf{X} = 8.861023517 \quad \mathbf{Y} = 12.46886251 \quad \mathbf{Z} = 2.83447298 \quad (5.4)$$

Ahora bien, dadas las ecuaciones 3.28, 3.29 y 3.30 la normalización de las coordenadas XYZ es:

$$x = \frac{8.861023517}{8.861023517 + 12.46886251 + 2.83447298}$$

$$y = \frac{12.46886251}{8.861023517 + 12.46886251 + 2.83447298}$$

$$z = \frac{2.83447298}{8.861023517 + 12.46886251 + 2.83447298}$$

así

$$x = 0.366698058 \quad y = 0.516002204 \quad z = 0.117299738 \quad (5.5)$$

Donde  $xyz$  son los valores necesarios para la ubicación del color en el diagrama de CIE.

Ahora, como se mencionó en el capítulo 3 sección 3.2 la conversión de XYZ a RGB se da por:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Donde:

$$M = \begin{bmatrix} 0.4185 & -0.1587 & -0.0828 \\ -0.0912 & 0.2524 & 0.0157 \\ 0.0009 & 0.0025 & 0.1786 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Los valores de la matriz  $M$  se dan en [22]. Y siguiendo con el procedimiento para la conversión de los valores triestímulos  $X = 8.861$ ,  $Y = 12.468$  y  $Z = 2.834$ , calculados anteriormente, se llega a:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4185 & -0.1587 & -0.0828 \\ -0.0912 & 0.2524 & 0.0157 \\ 0.0009 & 0.0025 & 0.1786 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 8.861 \\ 12.468 \\ 2.834 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4948 \\ 2.3835 \\ 0.5454 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Como resultado se tiene que:

$$R = 1.4948 \quad G = 2.3835 \quad B = 0.5454 \quad (5.8)$$

A continuación en la tabla 5.2 se dan los resultados explícitos de llevar a cabo el procedimiento anterior para las 5 mediciones de la primer muestra.

LED	Tomate 1								
	X	Y	Z	x	y	z	R	G	B
Medición 1	8.861	12.468	2.834	0.3667	0.516	0.1173	1.4948	2.3835	0.5454
Medición 2	8.498	12.295	2.766	0.3607	0.5219	0.1174	1.3762	2.3717	0.5324
Medición 3	8.219	11.949	2.333	0.3653	0.5311	0.1037	1.3502	2.3030	0.45339
Medición 4	8.179	11.799	2.078	0.3708	0.535	0.0942	1.3784	2.2648	0.4080
Medición 5	8.072	11.664	2.065	0.3703	0.535	0.0947	1.3561	2.2402	0.4052

Tabla 5.2: Valores de las coordenadas XYZ,  $xyz$  y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 1.

Partiendo de los resultados mostrados en la tabla anterior se calculó la coordenada  $xyz$  promedio (P) de las 5 mediciones de la muestra 1 obteniendo como resultado:

$$\bar{x} = 0.3668 \quad \bar{y} = 0.5278 \quad \bar{z} = 0.1055 \quad (5.9)$$

Se calculó el promedio de estas coordenadas con el objetivo de poder observar en el diagrama CIE como se encuentran distribuidas cada coordenada correspondiente a cada medición respecto a la coordenada promedio de estas (ver figura 5.18).

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 5.2 se calculó la desviación estándar ( $\sigma$ ) de  $x$ ,  $y$  y  $z$  de las mediciones con el fin de conocer el margen de error que existe entre cada toma sobre la misma muestra, de esto se obtuvo los siguientes valores:

$$\sigma(x) = 0.004114365 \quad \sigma(y) = 0.00849441 \quad \sigma(z) = 0.011493607 \quad (5.10)$$

Por último, se realizó la ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE mediante el software MATLAB teniendo como resultado lo siguiente:

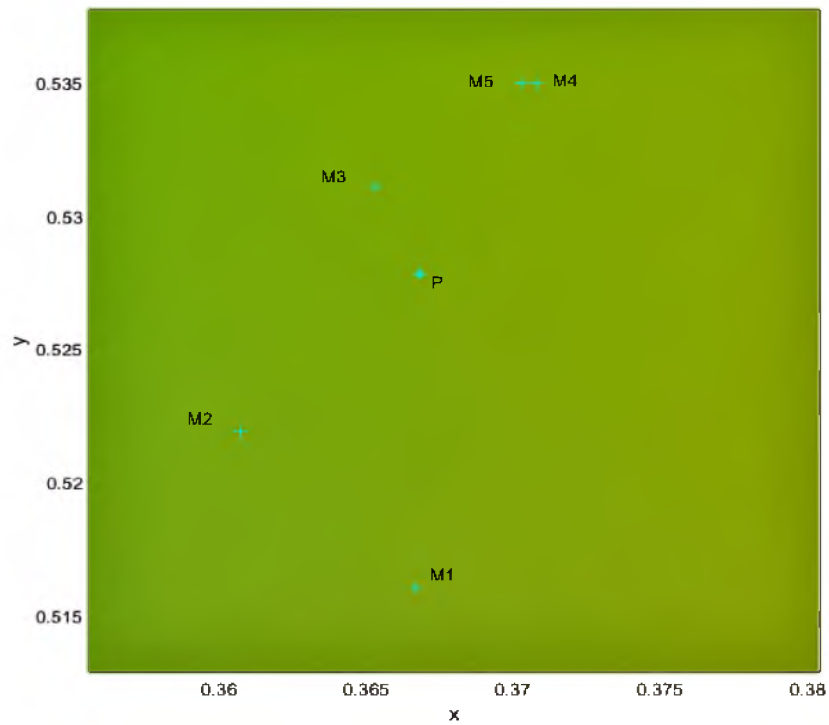
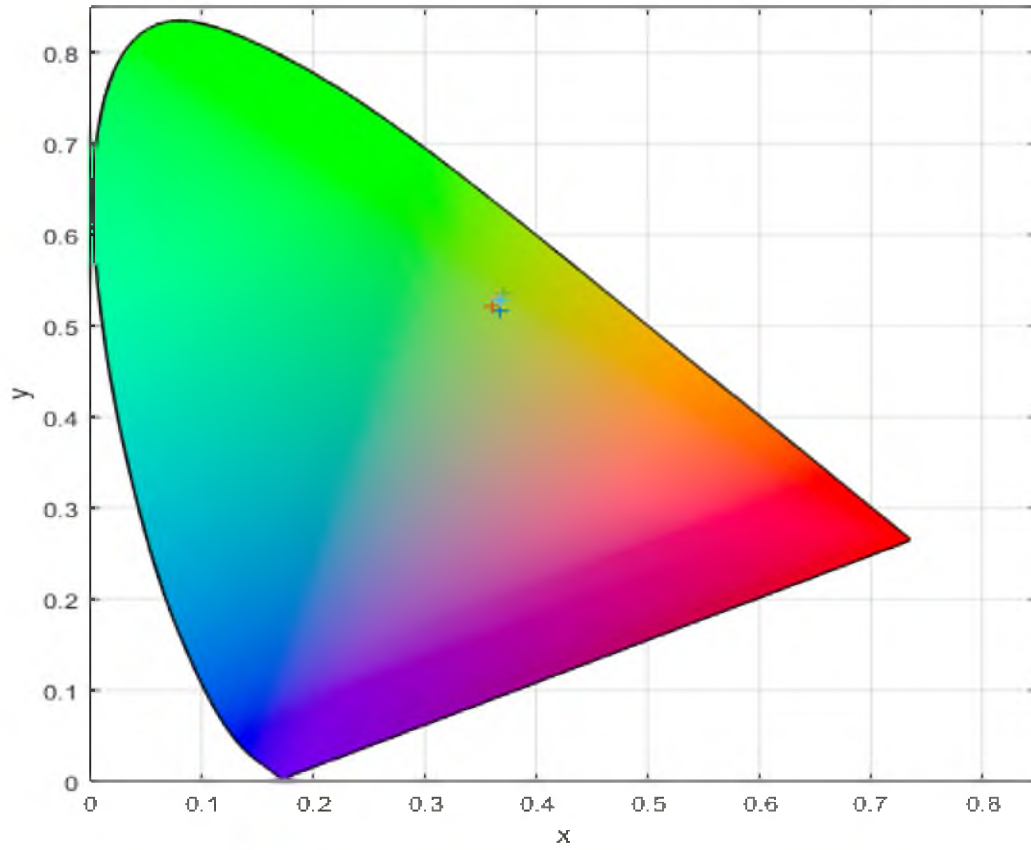


Figura 5.18: Ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 1.

### 5.3.2. Resultados obtenidos de las muestras 2, 3, 4, 5 y su respectiva ubicación de las coordenadas $xy$ en el diagrama de CIE

En la sección 5.3.1 se mostró el procedimiento para obtener las coordenadas XYZ, xyz y RGB, así este procedimiento se realizó de manera análoga para las muestras 2, 3, 4 y 5. Los resultados se muestran a continuación

► **Muestra 2:**

▷ Coordenadas de color:

LED	Tomate 2								
	X	Y	Z	x	y	z	R	G	B
Medición 1	3.135	3.114	0.022	0.4999	0.4965	0.0036	0.8160	0.5004	0.0145
Medición 2	3.149	3.341	0.027	0.4832	0.5126	0.0042	0.7854	0.5565	0.0160
Medición 3	3.266	3.473	0.029	0.4826	0.5131	0.0043	0.8133	0.5792	0.0168
Medición 4	3.216	3.403	0.029	0.4837	0.5119	0.0044	0.8034	0.5661	0.0166
Medición 5	3.266	3.475	0.03	0.4823	0.5133	0.0045	0.8129	0.5797	0.0170

Tabla 5.3: Valores de las coordenadas XYZ, xyz y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 2.

▷ Coordenada xyz promedio (P):

$$x = 0.4863 \qquad y = 0.5095 \qquad z = 0.0042 \qquad (5.11)$$

▷ Desviación estándar ( $\sigma$ ):

$$\sigma(x) = 0.007599539 \qquad \sigma(y) = 0.007276125 \qquad \sigma(z) = 0.000353553 \qquad (5.12)$$

▷ Ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE:

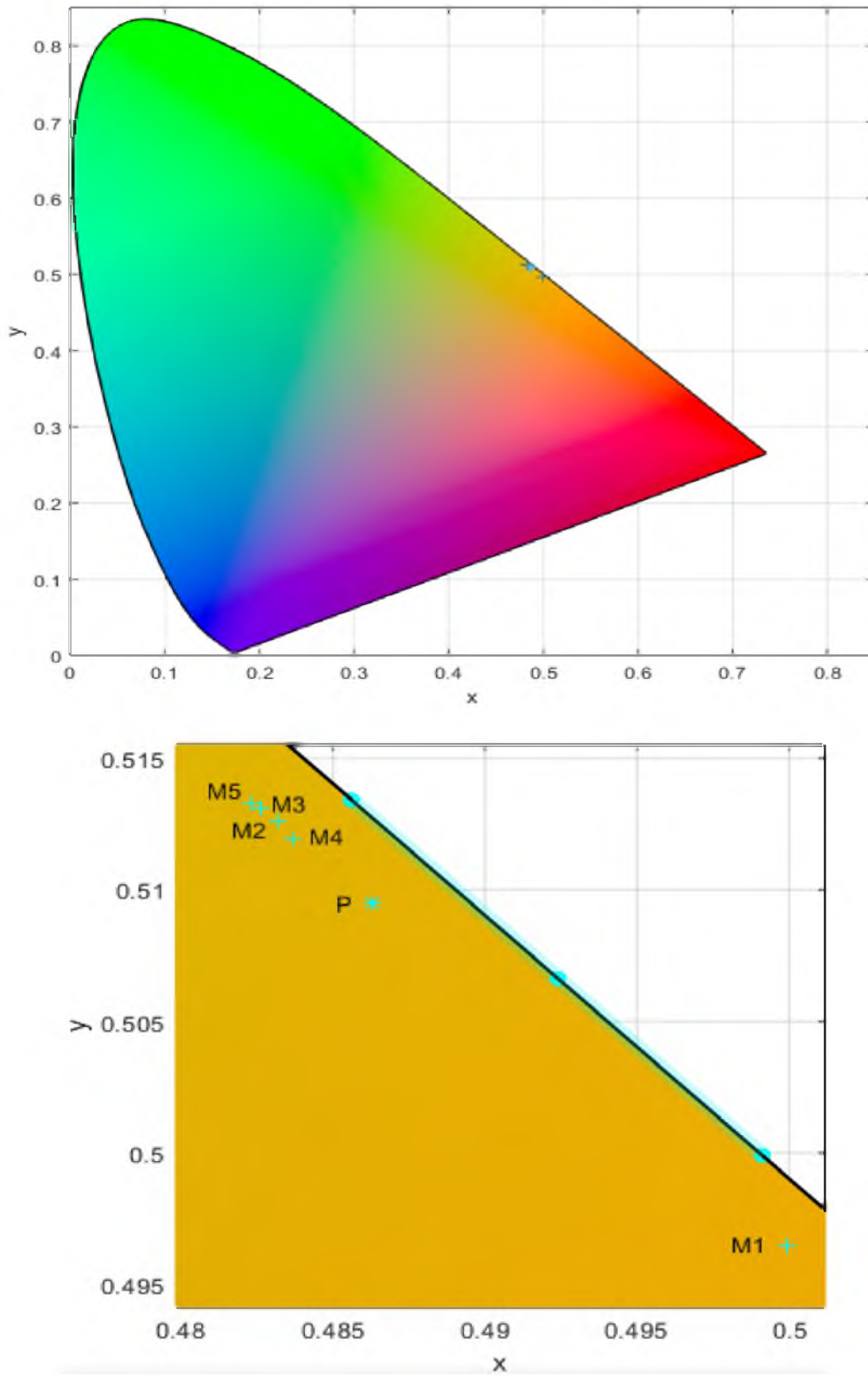


Figura 5.19: Ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 2.

► Muestra 3:

▷ Coordenadas de color:

LED	Tomate 3								
	X	Y	Z	x	y	z	R	G	B
Medición 1	2.849	2.223	0.007	0.5609	0.43767	0.0014	0.8390	0.3014	0.0094
Medición 2	2.714	2.268	0.01	0.5437	0.4544	0.0019	0.7750	0.3251	0.0099
Medición 3	2.7	2.226	0.009	0.5471	0.451	0.0018	0.7759	0.3157	0.0096
Medición 4	2.705	2.21	0.009	0.5494	0.4488	0.0018	0.7806	0.3112	0.0096
Medición 5	2.785	2.321	0.01	0.5443	0.4537	0.002	0.7964	0.3320	0.0101

Tabla 5.4: Valores de las coordenadas XYZ,  $xyz$  y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 3.

▷ Coordenada  $xyz$  promedio (P):

$$x = 0.5491 \quad y = 0.4491 \quad z = 0.0018 \quad (5.13)$$

▷ Desviación estándar ( $\sigma$ ):

$$\sigma(x) = 0.006991566 \quad \sigma(y) = 0.006774842 \quad \sigma(z) = 0.000228035 \quad (5.14)$$

▷ Ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE:

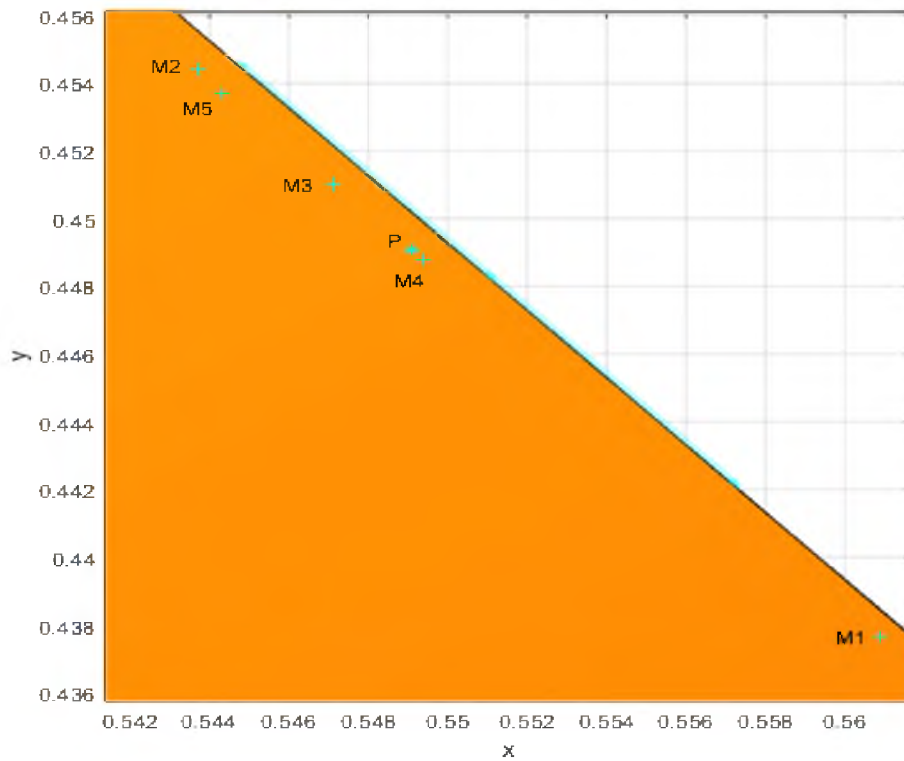
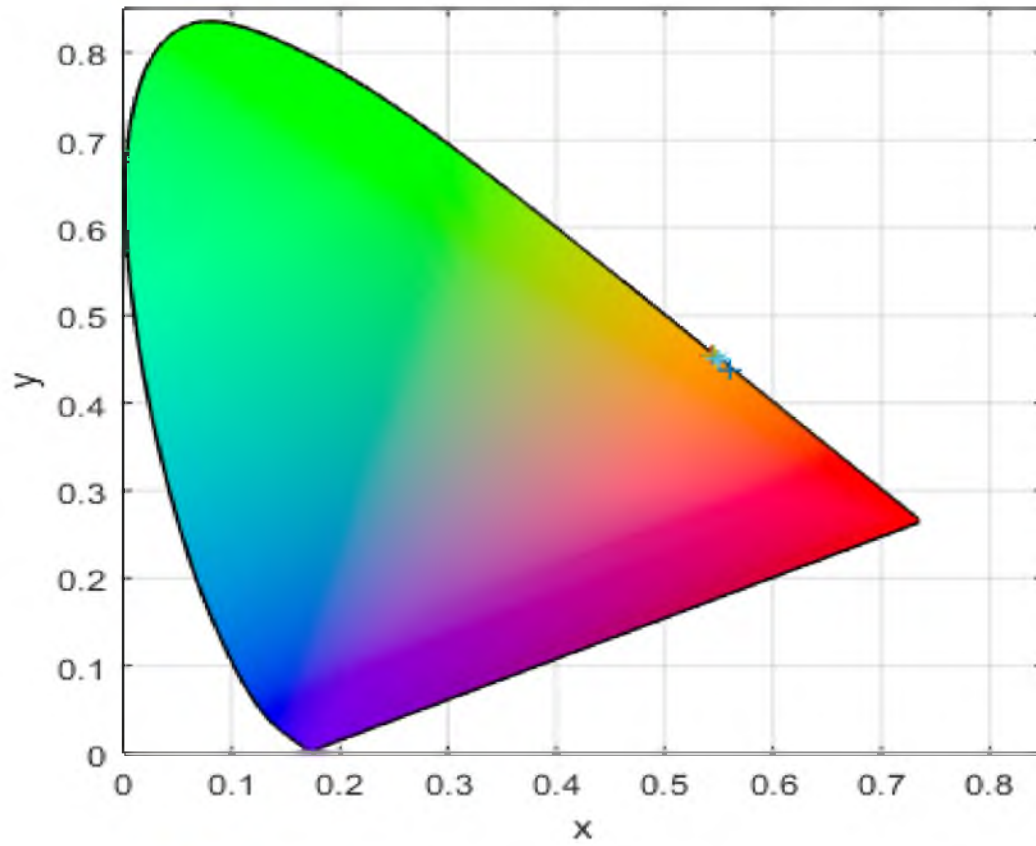


Figura 5.20: Ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 3.

► Muestra 4:

▷ Coordenadas de color:

LED	Tomate 4								
	X	Y	Z	x	y	z	R	G	B
Medición 1	2.901	2.263	0.007	0.5609	0.4377	0.0014	0.8543	0.3069	0.0096
Medición 2	1.864	1.523	0.006	0.5493	0.4489	0.0018	0.5379	0.2145	0.0066
Medición 3	1.853	1.488	0.006	0.5537	0.4446	0.0017	0.5388	0.2067	0.0065
Medición 4	1.835	1.515	0.015	0.5455	0.4502	0.0043	0.5263	0.2153	0.0081
Medición 5	1.849	1.526	0.012	0.546	0.4506	0.0034	0.5306	0.2167	0.0076

Tabla 5.5: Valores de las coordenadas XYZ,  $xyz$  y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 4.

▷ Coordenada xyz promedio (P):

$$x = 0.5511 \quad y = 0.4464 \quad z = 0.0025 \quad (5.15)$$

▷ Desviación estándar ( $\sigma$ ):

$$\sigma(x) = 0.006391557 \quad \sigma(y) = 0.005414333 \quad \sigma(z) = 0.001263725 \quad (5.16)$$

▷ Ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE:

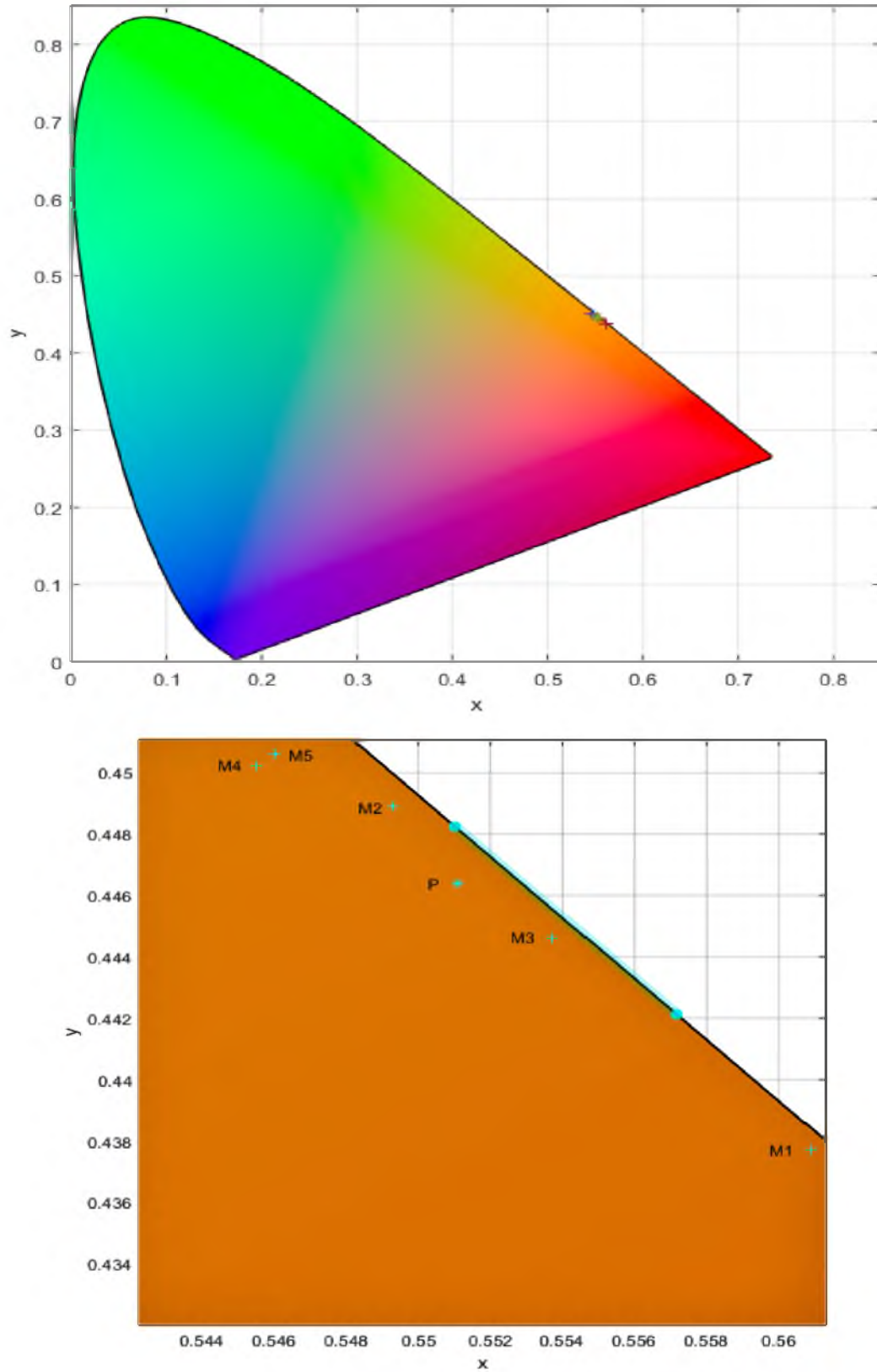


Figura 5.21: Ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 4.

► Muestra 5:

▷ Coordenadas de color:

LED	Tomate 5								
	X	Y	Z	x	y	z	R	G	B
Medición 1	0.487	0.287	0.0003	0.6289	0.3706	0.0004	0.1583	0.0280	0.0012
Medición 2	0.287	0.191	0.077	0.5169	0.3446	0.1385	0.0834	0.0232	0.0145
Medición 3	0.247	0.153	0.068	0.5278	0.327	0.1452	0.0735	0.0172	0.0127
Medición 4	0.198	0.111	0.059	0.5381	0.302	0.1599	0.0604	0.0109	0.0110
Medición 5	0.181	0.112	0.06	0.5132	0.318	0.1688	0.0530	0.0127	0.0112

Tabla 5.6: Valores de las coordenadas XYZ,  $xyz$  y RGB obtenidas a partir de las mediciones del espectro de la muestra 5.

▷ Coordenada  $xyz$  promedio (P):

$$x = 0.5450 \qquad y = 0.3324 \qquad z = 0.1226 \qquad (5.17)$$

▷ Desviación estándar ( $\sigma$ ):

$$\sigma(x) = 0.047915311 \qquad \sigma(y) = 0.026309466 \qquad \sigma(z) = 0.069321952 \qquad (5.18)$$

▷ Ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE:

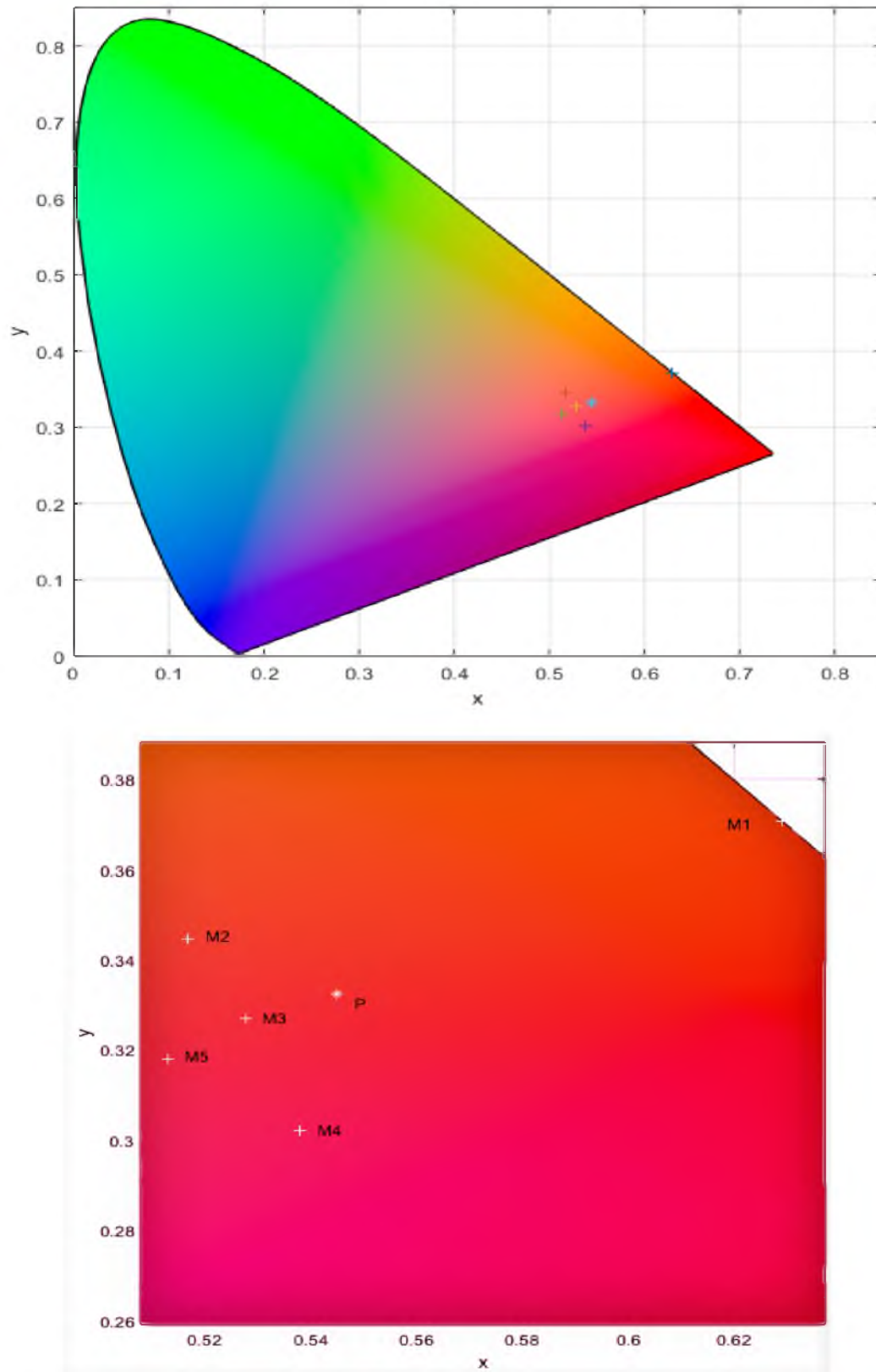


Figura 5.22: Ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de CIE 1931 de la muestra 5.

Como se observó, cada coordenada que se calculó de las diferentes muestras se ubicaron en el diagrama de CIE, ya que este nos permite representar de manera única un color en una escala internacional por lo cual facilita la identificación entre una etapa y otra, incluso cuando la diferencia entre una y otra sea poco notoria.

Un trabajo a futuro que se podría desarrollar por medio de este, sería que a partir de la ubicación de los parámetros de color XYZ en el diagrama de CIE se podría desarrollar una escala con la variación de colores que tiene el tomate según el porcentaje de concentración de licopeno que contenga el tomate en determinada etapa de madurez, lo cual facilitaría tener una idea del porcentaje aproximado que exista de esta sustancia en el tomate sin la necesidad de destruir la muestra.

---

## CONCLUSIONES

---

- De acuerdo al arreglo experimental que se realizó en esta tesis, se llevaron a cabo pruebas con distintas fuentes de luz (foco de bombilla, lampara incandescente y un LED de baja potencia) y se obtuvieron las curvas espectrales donde observo que para obtener resultados confiables la importancia de tener una fuente de luz con una intensidad considerable y sobre todo confinada es de gran importancia, ya que si no cumple con estas características, el espectrómetro no puede detectar la suficiente cantidad de luz que refleja de la muestra y por tanto, los resultados obtenidos para el diagrama de CIE serian erróneos.
- A partir del arreglo experimental propuesto, es posible obtener los espectros correspondientes de cada muestra y por medio de la teoría dada, se puede llevar a su respectiva transformación de coordenadas XYZ.
- En este trabajo la colorimetría aplicada como técnica de medición del color en el proceso de maduración de frutos en particular del tomate, hace posible conocer el rango del espectro en el que se encuentra la muestra en determinada etapa y a partir de ello tener un indicador aproximado de maduración de la fruta, cabe mencionar que la colorimetría tiene como ventaja ser la única técnica que hace posible determinar la maduración de un fruto en su estado natural.

- El algoritmo diseñado en el software MATLAB para el cálculo de las coordenada XYZ a partir de los parámetros: longitud de onda  $\lambda$ , reflectancia  $p(\lambda)$ , funciones de coincidencia de color  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$  o bien  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  y  $\bar{b}(\lambda)$ , así como también los valores del iluminante  $S(\lambda)$  que se desee utilizar, puede ser utilizado en general para diferentes intervalos de longitud de onda dentro del espectro visible, siempre y cuando se conozcan los valores de los parámetros ya mencionados.
  
- A partir del cálculo del margen de error por medio de la desviación estándar de los resultados obtenidos para cada una de las muestras, se tiene que el error para las coordenadas xyz entre una medición y otra de la misma muestra es mínimo. Por lo tanto a partir de estos resultados, resulta decir que el arreglo experimental propuesto para la medición de curvas espectrales de una muestra en particular es factible.
  
- En lo que corresponde a la ubicación de las coordenadas  $xy$  en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 se tiene que los valores obtenidos para las coordenadas ya mencionadas a partir del proceso de transformación son confiables, debido a que se encuentran dentro de la gama de los colores que adopta un tomate de esa variedad en su proceso de maduración, también es necesario decir que los colores que se observen en el diagrama de CIE tendrán ciertas variaciones de acuerdo con las características que tenga la computadora donde se genere el diagrama para la ubicación de estas.
  
- Finalmente, se concluye, que se cumple con todos los objetivos deseados para esta tesis.



```

%*****
%*****

TR_Trans = [TR]';
L = length(TR_Trans);
for i=1:L
    if TR_Trans(i) > 0
        TR_Trans(i) = TR_Trans(i);
    elseif TR_Trans(i) < 0
        TR_Trans(i) = 0;
    else
        TR_Trans(i) = TR_trans(i);
    end
end

%*****
%*****

TR_Eval = TR_Trans;
Reflectancia = [TR_Eval]';
LD65 = xlsread(filename, 'A62:A83');
Estimulo_color = Reflectancia.*LD65

%*****
%*****

sheet = 1;
FC_color = 'B62:D83';
Matriz_xyz = xlsread(filename, sheet, FC_color);
Fcoincidencia_color = [Matriz_xyz]';

%*****
%*****

% RIF calcula el producto de los valores curva espectral el

```



**NOTA:** El archivo "*espectro\_de\_la\_muestra.xls*" contiene los valores de: las funciones de coincidencia de color, respuesta espectral de la muestra y del iluminante D65, así como también la matriz de referencia necesaria para la transformación de XYZ a RGB. El archivo no se agrega aquí ya que es demasiado grande puesto que contiene los valores de todas las mediciones realizadas.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] M.A. Acemel, *Digitization of Colorimetric Measurements for Quantitative Analyses Using a Smartphone*, Tesis de Maestría, Open University of Catalonia, 2017.
- [2] G.P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Wiley Interscience, 3rd ed, 2002.
- [3] D. Atchison, G. Smith, *Optics of the human eye*, Butterworth-Heinemann, 1st ed, 2000.
- [4] D.W. Ball, *The basics of spectroscopy*, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2001.
- [5] J. Blasco, N. Aleixos, E. Moltó, *Machine vision system for automatic quality grading of fruit*, Elsevier Science Ltd, June 2003, pp. 415-423.
- [6] J. M. Bujdud Pérez, *Medición práctica del color*, Tesis de Maestría, Universidad de Guanajuato, 1999.
- [7] M. Cinta, P. Marín, *Óptica Fisiológica: El sistema óptico del ojo y la visión binocular*, Universidad Complutense de Madrid 2006.

- [8] S. Cubero, N. Aleixos, E. Moltó, J. Gómez-Sanchis, J. Blasco, *Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables*, Springer Science+Business Media, Vol. 4, July 2010, pp. 487-504.
- [9] A.R. Elkington, Helena J. Frank, Michael J. Greaney, *Clinical optics*, Blackwell Science, 3rd ed, 1999.
- [10] S. Garg, S. Gupta, C.K. Ghosh, *Wave optics*, PHI Learning Private Limited, 2012.
- [11] A. Ghatak, K. Thyagarajan, *Introduction to Fiber Optics*, Viva Books, 3rd Edition, 2014.
- [12] B.D. Gupta, S.K. Srivastava, R. Verma, *Fiber optic sensors based on plasmonics*, World Scientific Publishing, 2015.
- [13] E. Hecht, *Óptica*, Addison Wesley, 3era ed, 2000.
- [14] R.W.G. Hunt, M.R. Pointer, *Measuring Colour*, Imaging Science and Technology, 4th ed, 2011.
- [15] D.L. MacAdam, *Color measurement: theme and variations*, Board, 2nd ed, 1985.
- [16] D. Malacara, *Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications*, Society of Photo Optical, 2nd ed, January 2011.
- [17] P. Menesatti, C. Angelini, F. Pallottino, F. Antonucci, J. Aguzzi, C. Costa, *RGB color calibration for quantitative Image Analysis: The “3D Thin-plate spline” warping approach*, Sensors, Vol. 12, May 2012, pp. 7063-7079.
- [18] W. Neumann, *Fundamentals of dispersive optical spectroscopy systems*, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2014.
- [19] I. Newton, *Optics*, Editura Academie, 1704.
- [20] D. Nickerson, *A method for determining the color of agricultural products*, U.S dept. of agriculture Washington, d.c., Technical bulletin No. 154, December 1929, pp. 1-32.

- [21] I. Nimeroff, *Colorimetry*, Institute for Basic Standards National Bureau of Standards Washington, 1968.
- [22] N. Ohta, A. Robertson, *Colorimetry: Fundamentals and Applications*, Wiley-IS&T series in imaging science and technology, 2005.
- [23] C.S. Peirce, *Note on the sensation of color*, Journal of science and arts, Vol. 13, Num. 76, April 1877, pp 247-251.
- [24] E. Perales Romero , *Sobre los colores óptimos y sus aplicaciones en visión y tecnología del color*, Tesis doctoral, Universidad de Alicante, 2009.
- [25] N. Ribe, F. Steinle, *Exploratory experimentation: Goethe, Land, and Color theory*, Physics today, Vol. 55, July 2002, pp. 43-49.
- [26] A. Ryer, *Light measurement handbook*, Printed in the United States of America, 2nd ed, 1997.
- [27] S.K. Shevell, *The science of color*, Optical Society of America, 2nd ed, 2003.
- [28] G. J. Tortora, B. Derrickson, *Principios de Anatomía y Fisiología*, Médica Panamericana, 11va ed, 2007.
- [29] A.M. Vásquez Riascos, *Estimación de las coordenadas CIEL\*a\*b\* en concentrados de tomate utilizando imágenes digitales*, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [30] L. D. Woolf, *Confusing color concepts clarified*, The physics teacher, Vol. 37, April 1939, pp. 204-206.
- [31] W. Wu, J.P. Allebach, M. Analoui, *Imaging colorimetry using a digital camera*, Journal of imaging science and technology, Vol. 44, Num. 4, july-august 2000, pp 267-279.
- [32] [www.cie.co.at](http://www.cie.co.at)