

**CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN COLORÍMETRO
BASADO EN UNA CÁMARA CCD PARA INSPECCIÓN DE COLOR
EN TEXTILES**

NATALITH ANDREA PALACIOS ORTEGA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA
EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2011**

**CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN COLORÍMETRO
BASADO EN UNA CÁMARA CCD PARA INSPECCIÓN DE COLOR
EN TEXTILES**

NATALITH ANDREA PALACIOS ORTEGA

DIRECTOR

Ing. Mario Milver Patiño

CODIRECTOR

MSc. German Ricaurte

ASESOR EXTERNO

Ing. Martin Aguilar Muñoz

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA
EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2011**

Nota de Aceptación

Director _____
Ing. Mario Milver Patiño

Jurado _____
MSc. Luis Fernando Echeverri

Jurado _____
MSc. Jorge Washington Coronel

Popayán, 14 de Abril de 2011

AGRADECIMIENTOS.

- A mi madre, por sus oraciones, por darme la más grande muestra de sacrificio, superación, apoyo, paciencia y, sobretodo amor. A mi padre....mi ángel protector.
- A mis hermanas Isa y Laura por su compañía, ejemplo, alegría y lágrimas, amistad e incondicionalidad.
- A José por su paciencia, humildad y apoyo.
- A toda mi familia y mi tío Mylo, por su especial afecto, acogida, unión y compañía.
- A Daniel, por levantarme una y otra vez, su amor y consejo.
- A Nana y familia, por permitirme entrar en sus corazones.
- A todos mis amigos a lo largo de todo éste proceso por permitirme aprender de ellos, brindarme su amistad cerca y lejos
- Al profesor Mario Patiño quien ha sido una guía primordial durante todos estos años.
- Al profesor Germán Ricaurte y la Universidad de Antioquia por abrirme sus puertas y regalarme su conocimiento.
- A la compañía INTECOL por permitirme ejercer mi carrera y abrir las puertas al programa de Ing. Física.
- A todos mis profesores del departamento de Física por toda su colaboración, esfuerzos y esmero en mi desarrollo profesional.

TABLA DE CONTENIDOS.

TABLA DE CONTENIDOS.	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	9
INTRODUCCION	10
CAPÍTULO I.	
COLORIMETRÍA, RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA.	12
1.1. COLORIMETRÍA.	12
1.1.1. FOTORRECEPTORES DEL OJO HUMANO.	12
1.1.2. MODELO DE COLOR CIE-XYZ.	14
1.1.3. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE COLOR.	19
1.2. RADIOMETRIA Y FOTOMETRÍA.....	24
1.2.1. RADIOMETRÍA.....	24
1.2.2. FOTOMETRÍA.....	26
CAPITULO II.	
COLORIMETRO TRIESTIMULO CON CÁMARA CCD-RGB PARA MEDICION DE COLOR EN TEXTILES.	28
2.1. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UN COLORIMETRO TRIESTIMULO.	28
2.1.1. GEOMETRÍA DE LA DISPOSICION DE LOS ELEMENTOS DE UN INSTRUMENTO DE MEDICION DE COLOR.	28
2.1.2. MATERIALES DE REFERENCIA O PATRONES- MATERIAL DE RECUBRIMIENTO PARA LA ESFERA INTEGRADORA.	32
2.1.3. FUENTES DE LUZ E ILUMINANTES.....	34
2.2. MEDICION Y PERCEPCION DEL COLOR EN AMBIENTES INDUSTRIALES.	35
2.2.1. Percepción del color: Cabinas para la comparación del color.	35
2.2.2. MEDICIÓN CON ESPECTROFOTÓMETROS.....	37
2.2.3. MEDICION DE COLOR EN LINEA.....	38

CAPITULO III.

CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL COLORIMETRO TRIESTÍMULO BASADO EN CAMARA CCD-RGB PARA MEDICIÓN DE COLOR EN TEXTILES.

.....	44
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL COLORÍMETRO RECIBIDO POR PARTE DE INTECOL S.A.	44
3.1.1. CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTO.....	44
3.1.2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EN CONJUNTO.....	47
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL COLORIMETRO PARA MEDICIÓN DE COLOR EN LÍNEA.	51
3.2.1. RECUBRIMIENTO INTERNO.....	51
3.2.2. ILUMINACIÓN.	51

CAPÍTULO IV.

CARACTERIZACIÓN DE CÁMARAS: CONVERSION DE VALORES RGB A CIE- L*a*b*.....

.....	75
4.1. CARACTERIZACION DE CÁMARAS.....	76
4.2. CORRECCIÓN DE NO-LINEALIDADES.....	76
4.3. TRANSFORMACIONES RGB-XYZ.....	78
4.3.1. CARACTERIZACION DE LA CÁMARA INDUSTRIAL DEL COLORÍMETRO PARA MEDICIÓN DE COLOR EN TEXTILES.....	79
4.3.2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA INDUSTRIAL.	81

CONCLUSIONES 94

BIBLIOGRAFÍA 96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de sensibilidad espectral normalizadas de los conos humanos.	13
Figura 2. Curvas de eficiencia luminosa.....	13
Figura 3. Experimento de Igualación del color.	14
Figura 4. Funciones de igualación del color.	17
Figura 5. Modelo CIExy 1931, representación 2D del modelo XYZ.	17
Figura 6. Modelo CIELab: vista 2D.....	18
Figura 7. Modelo CIE-L*a*b*: vista 3D.	19
Figura 8. Espectrorradiómetro.....	20
Figura 9. Espectrofotómetro.....	21
Figura 10. Colorímetro.	22
Figura 11. Arreglos de sensores de color para cámaras digitales.....	23
Figura 12. Representación del ángulo sólido.	25
Figura 13. Radiancia.	25
Figura 14. Tipos de difusores.	29
Figura 15. Disposición muestra/iluminación/detector recomendadas por la CIE...	30
Figura 16. Reflectancia del Óxido de Magnesio preparado por la compañía KODAK.....	33
Figura 17. Reflectancia de distintos materiales.....	33
Figura 18. Distribución espectral de potencia relativa de los iluminantes recomendados por la CIE.....	35
Figura 19. Cabinas para la evaluación del color.....	36
Figura 20. Instrumento para medición de color basado en un espectrofotómetro que se desplaza.	38
Figura 21. Prototipo del colorímetro medición de color en textiles.	40
Figura 22. Detalle de la geometría del colorímetro.....	41
Figura 23. Comparación de reflectancias de muestras de pinturas hechas a base de: Sulfato de Bario.	45

Figura 24. Distribución espectral de potencia relativa para la lámpara fluorescente blanca.....	46
Figura 25. Distribución espectral de potencia relativa para la lámpara fluorescente blanca: Detalle hacia las bajas longitudes de onda.....	47
Figura 26. Carta de color COLORCHECKER.....	48
Figura 27. Reflectancia muestra de color blanco de la carta de color: comparación entre el colorímetro diseñado y un espectrofotómetro de referencia.....	48
Figura 28. Reflectancia muestra color negro de la carta de color: comparación entre el colorímetro diseñado y un espectrofotómetro de referencia.....	49
Figura 29. Distribución espectral de potencia relativa para el LED blanco del colorímetro.	50
Figura 30. Comparación entre la distribución espectral de un LED blanco y una lámpara blanca tipo fluorescente.....	52
Figura 31. Curvas de caracterización de distribución espectral relativa para los LEDs propuestos para la optimización de la iluminación del colorímetro.	54
Figura 32. Detalle del domo completo con las lámparas a emular.	56
Figura 33. Detalle del domo a emular en TRACEPRO y de la lámpara.	57
Figura 34. Detalle de una de las lámparas ubicadas en el domo.....	57
Figura 35. Curva x-y para el LED violeta.....	58
Figura 36. Emulación de iluminación tipo LED violeta sobre una muestra de BaSO ₄	58
Figura 37. Curva x-y para el LED amarillo.....	59
Figura 38. Emulación de iluminación tipo LED amarillo sobre una muestra de BaSO ₄	59
Figura 39. Curva x-y para el LED verde.	60
Figura 40. Emulación iluminación tipo LED verde sobre una muestra de BaSO ₄ . 60	
Figura 41. Curva x-y para el LED rojo.	61
Figura 42. Emulación iluminación tipo LED rojo sobre una muestra de BaSO ₄	61
Figura 43. Curva x-y para el LED azul.	62
Figura 44. Emulación iluminación tipo LED azul sobre una muestra de BaSO ₄	62
Figura 45. Curva x-y para el LED rojo intenso.....	63

Figura 46. Emulación de iluminación tipo LED rojo intenso sobre una muestra de BaSO ₄	43
Figura 47. Curva x-y para la combinación de todos los LEDs.	64
Figura 48. Emulación de combinación de todos los LEDs sobre una muestra de BaSO ₄	64
Figura 49. Trazado de rayos para todos los LEDs.	65
Figura 50. Trazado de rayos para el LED verde.....	67
Figura 51. Trazado de rayos para el LED rojo.....	67
Figura 52. Curva de Intensidad radiante de un LED azul.....	70
Figura 53. Curva de Intensidad radiante de la muestra en el domo, iluminada por un LED azul.....	70
Figura 54. Curva de Intensidad radiante de un LED rojo.	71
Figura 55. Curva de Intensidad radiante de la muestra en el domo, iluminada por un LED rojo.	71
Figura 56. Curva de Intensidad radiante de un LED violeta.	72
Figura 57. Curva de Intensidad radiante de la muestra en el domo, iluminada por un LED violeta.	72
Figura 58. Curva de Intensidad radiante de la muestra en el domo, iluminada por la lámpara blanca compuesta por todos los LEDs caracterizados.....	73
Figura 59. Vista detallada del domo, muestra analizada, ángulos horizontal (y) y vertical (z).....	74
Figura 60. a. Curva de sensibilidad de la cámara empleada: DVT 542C, b. Modelo de cámara DVT 544.	80
Figura 61. Carta de color ColorChecker Macbeth utilizada para ejecutar la caracterización de la cámara industrial.	81
Figura 62. Detalle de la carta de color empleada y las muestras que se utilizaron para cálculo de la matriz de transformación y colores de prueba.....	81
Figura 63. Valores RGB sin calibración de reflectancia de cámara vs. % Reflectancia de espectrofotómetro; lámpara tipo fluorescente.....	83
Figura 64. Valores RGB con calibración de reflectancia de cámara vs. % Reflectancia de espectrofotómetro; lámpara tipo fluorescente.....	84

Figura 65. Curva de comportamiento de sistemas de adquisición de imágenes...	85
Figura 66. Valores RGB sin calibración de reflectancia de cámara vs. % Reflectancia de espectrofotómetro; lámpara tipo LED.	86
Figura 67. Valores RGB con calibración de reflectancia de cámara vs. % Reflectancia de espectrofotómetro; lámpara tipo fluorescente.....	87
Figura 68. Color 19 de la carta de color sin calibración de reflectancias y sin balance manual de blancos, lámpara tipo fluorescente.....	88
Figura 69. Color 19 de la carta de color con calibración de reflectancias y balance manual de blancos, lámpara tipo fluorescente.	88
Figura 70. Color 19 de la carta de color sin calibración de reflectancias y sin balance manual de blancos, lámpara tipo LED	89
Figura 71. Color 19 de la carta de color con calibración de reflectancias y balance manual de blancos, lámpara tipo LED.....	89
Figura 72. Curva de reflectancia del color 12: Orange Yellow, espectrofotómetro de comparación: Laboratorio TINTAS & TINTAS.	90
Figura 73. Curva de reflectancia del color 3: Blue Sky, espectrofotómetro de comparación: Laboratorio TINTAS & TINTAS.	91
Figura 74. Curva de reflectancia del color 5: Blue Flower, espectrofotómetro de comparación: Laboratorio TINTAS & TINTAS.	91
Figura 75. Curva de reflectancia del color 8: Purplish Blue, espectrofotómetro de comparación: Laboratorio TINTAS & TINTAS.	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los LEDs propuestos para la optimización: experimentales y de acuerdo a hoja técnica.	53
Tabla 2. Potencia radiante de salida de los LEDs y de salida de la muestra.	68
Tabla 3. Comparación de potencias radiantes obtenidas vs, Esperadas para una muestra de sulfato de Bario evaluada en el domo.	69
Tabla 4. Comparación de Intensidades radiantes de los LEDs vs. Intensidades radiantes obtenidas para la muestra.	69
Tabla 5. Modelos varios de transformaciones polinomiales según Cheung y Westland (2004).	79
Tabla 6. Resultados del colorímetro con cámara y caracterización en matlab.	8¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7. Resultados del colorímetro y valores CIE L*a*b* entregados directamente por la cámara industrial.	88

INTRODUCCION

En la actualidad los sistemas de visión artificial han llegado a tener gran acogida en el sector industrial ya que se presentan como una opción innovadora, de buen rendimiento y costo asequible para el control de calidad del producto final. Existen diversas características que pueden ser monitoreadas por medio de visión artificial, entre las cuales se encuentran: forma, tamaño, cantidad, color, códigos de barras/2D, texto impreso, entre otras.

Uno de los elementos esenciales dentro de un sistema de visión artificial son las cámaras de estado sólido (CCD o CMOS), su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico, produciendo una señal que es proporcional a la irradiancia de la escena capturada. Al final del proceso de digitalización se tiene una matriz compuesta por tres planos, donde cada uno de estos representa un color en el espacio RGB.

El monitoreo de color es de especial interés dentro de varios campos de la industria donde se requiere evaluar este parámetro. Uno de ellos es el sector textil debido a que las telas deben cumplir un proceso de estandarización; sin embargo, los métodos de inspección utilizados no son los más adecuados, ya que en algunos casos los encargados de esto no son equipos sino personal del campo, lo cual no garantiza homogeneidad en la comparación entre uno y otro operario; además, a pesar de que los instrumentos existentes (espectrofotómetros, colorímetros, entre otros) son útiles para estas aplicaciones, no sirven para un control continuo ya que son para uso de laboratorio; y aquellos equipos que son para tal fin resultan costosos.

Debido al panorama presentado, la línea de Visión Artificial de la empresa de automatización y control industrial: INTECOL S.A. hace un tiempo planteó la necesidad de implementar un colorímetro que estuviera en capacidad de analizar las muestras de tela in situ. En un estudio previo se diseñó un sistema para tal fin,

sin embargo, no ha sido el más óptimo en varios aspectos, por lo que todavía no se ha podido implementar en planta.

Este informe presenta la caracterización realizada a los elementos críticos de dicho prototipo e identifica cuáles de ellos deben ser optimizados para una apta medición de color en textiles en el modelo estándar CIE-L*a*b*. Dicho estudio fue ejecutado en conjunto con la Universidad del Cauca, Universidad de Antioquia, y la empresa INTECOL S.A. de Medellín.

Dentro del presente informe se muestra en el capítulo I aspectos básicos sobre la medición de color, la percepción del color por el ojo humano, e información acerca de radiometría y fotometría. En el segundo capítulo se hace un recuento sobre el prototipo recibido y los parámetros que se tuvieron en cuenta para su diseño. El capítulo III se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de dicho prototipo, se determina qué parámetros deben ser optimizados y la caracterización de los elementos a montar en un futuro diseño adecuado para la medición de color en línea. El capítulo final consiste en el algoritmo empleado para la conversión de los valores RGB entregados por la cámara CCD al modelo de color estándar para medición de color en línea: CIE-L*a*b*.

CAPÍTULO I.

COLORIMETRÍA, RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA.

1.1. COLORIMETRÍA.

La colorimetría es la ciencia encargada de medir y describir por medio de modelos matemáticos el color percibido por el hombre [1]. Para dicho fin ha construido equipos de medición, modelado el comportamiento de dicha percepción de color, generado diversas escalas para la medición de ésta característica; entre otros.

1.1.1. FOTORRECEPTORES DEL OJO HUMANO.

Bien es conocido que, en el ojo humano, los fotorreceptores son los conos y bastones, albergados en la retina, llamados así debido a su forma.

Los bastones son mucho más sensibles a la luz que los conos. La población de conos llega a ser bastante densa en el centro de la fovea donde no hay ningún bastón, y hacia sus afueras, empieza a decrecer significativamente; los bastones empiezan a aparecer a 1 grado del centro de la fovea, a los 20 grados alcanzan su máxima densidad poblacional; luego empieza a decrecer.

El pico de la curva de sensibilidad de los bastones se encuentra alrededor de los 507nm (en la córnea). Hay tres tipos de conos: los tipo L, sensibles a las longitudes de onda largas, los tipo M, para longitudes de onda medianas, y los tipo S para las longitudes de onda cortas (short), sus longitudes de onda pico para sus respectivas curvas de sensibilidad (en la córnea) son: 566nm, 543nm, y 440nm. [2]

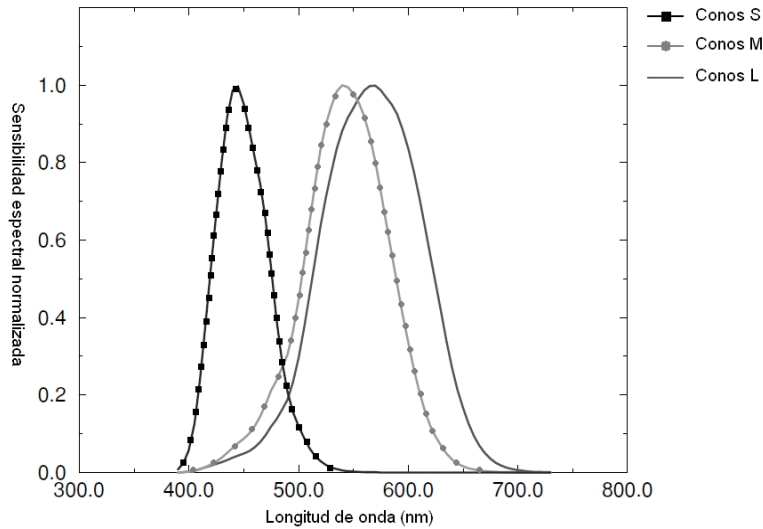


Figura 1. Curvas de sensibilidad espectral normalizadas de los conos humanos (Stockman–MacLeod–Johnson) [2].

La curva de sensibilidad de cada uno de los tres tipos de conos y bastones se debe a distintos fotopigmentos que tienen cada uno de ellos. Debido a la existencia de un solo pigmento en los bastones esto los hace mucho menos sensibles al color que los conos y debido a su alta sensibilidad su importancia se da en la visión escotópica. Se entiende por visión escotópica aquella asociada a un rango bajo de iluminación, visión fotópica para altos rangos de iluminación, una visión mesópica es aquel rango intermedio entre la fotópica y la escotópica. [2]

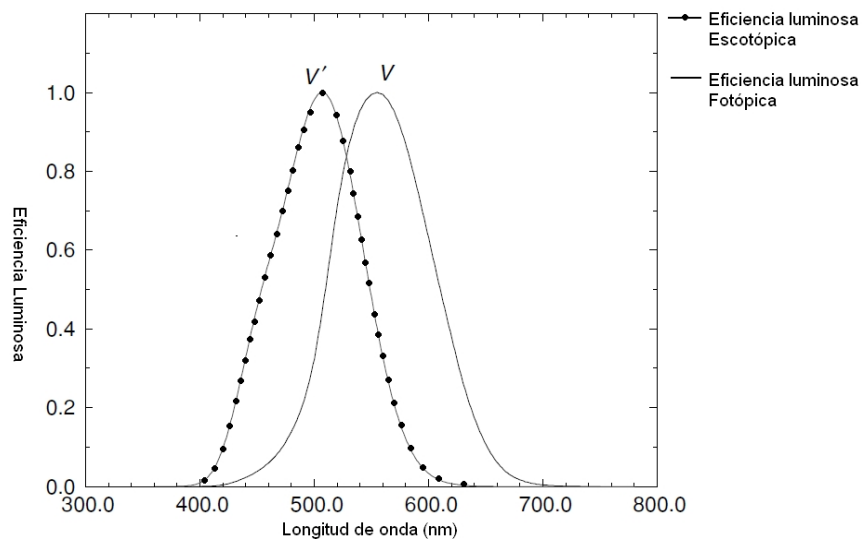


Figura 2. Curvas de eficiencia luminosa: Escotópica V' (λ), Fotópica: V (λ). [2].

1.1.2. MODELO DE COLOR CIE-XYZ.

1.1.2.1. EXPERIMENTO DE IGUALACIÓN DEL COLOR.

La CIE o Comité Internacional de Iluminación es la organización que está encargada de todo lo concerniente a luz, iluminación y espacios de color, así, definió el modelo de color XYZ como estándar para los colores que percibe el ojo humano; los XYZ son tres primarios imaginarios que representan el color, para llegar a estos, la CIE empleó el experimento básico de *apareamiento ó igualación del color*:

El observador mira un campo bipartita, en el cual cada lado es espacialmente uniforme pero difieren en sus distribuciones espectrales de potencia, b_t es una fuente de luz conocida como *Test Light* que se encuentra bajo control experimental, mientras que b_m está bajo control del observador y recibe el nombre de *Matching Light*. El objetivo del experimento es que el observador ajuste b_m lo más cercana posible a b_t . El campo bipartita se encuentra rodeado por una fuente de luz b_a que permanece fija durante el proceso de igualación. El dispositivo viene equipado de forma tal que el observador pueda ajustar b_m controlando la intensidad de un número de luces primarias superpuestas. Experimentos muestran que los observadores se encuentran en capacidad de reproducir cualquier luz “test” ajustando la intensidad de solo tres primarios. [3]

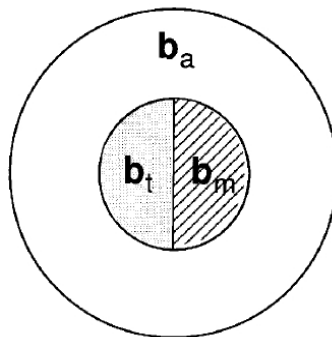


Figura 3. Experimento de Igualación del color [3].

1.1.2.2. Coordenadas triestímulo.

Son conocidas como coordenadas triestímulo los “pesos” o intensidades de los primarios brindados por el observador al igualar b_t con b_m en el experimento de igualación del color.

Si se modela matemáticamente la fuente de luz b_t se tendría que:

$$b_t \approx Pt \quad (1)$$

Donde:

P representa la matriz conformada por las distribuciones espectrales de potencia de los primarios (p_1, p_2, p_3).

t es un vector tridimensional que representa las coordenadas triestímulo.

1.1.2.3. Funciones de igualación del color.

Sea T la matriz de valores triestímulo para los vectores base del modelo identidad, (y las dimensiones de T son $3 \times N_\lambda$). En el modelo identidad, la representación de cualquier fuente de luz b , es simplemente b misma. Así, se tiene que:

$$t = Tb \quad (2)$$

Donde T es conocida también como la matriz de las funciones de igualación del color “*Color matching functions*”. [3]

La CIE también definió iluminantes estándar (tablas de distribuciones espectrales de potencia) que pueden ser usados para calcular la señal de un color para una superficie dando la reflectancia de la misma bajo dicho iluminante.

Una fórmula práctica para calcular los valores triestímulo CIE (1931) de una superficie con reflectancia $P(\lambda)$, bajo el efecto de un iluminante con distribución espectral de potencia relativa $E(\lambda)$ son:

$$\begin{aligned} X &= k \sum_{400 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} E(\lambda)P(\lambda)x(\lambda) \\ Y &= k \sum_{400 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} E(\lambda)P(\lambda)y(\lambda) \\ Z &= k \sum_{400 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} E(\lambda)P(\lambda)z(\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde $k = 100 / \sum_{400 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} E(\lambda)y(\lambda)$ es una constante de normalización.

El valor triestímulo X , hace referencia a longitudes de onda largas, es decir hacia el rojo “RED”, el valor Y , hacia las medianas, es decir hacia el verde: “GREEN”, y Z hacia las cortas, hacia el azul: “BLUE”.

Las funciones de igualación del color de 1931 fueron derivadas de experimentos de igualación del color que usaron un campo bipartita subtendido a 2° (en términos de ángulo visual) en la retina. Un segundo set de funciones de igualación del color fue calculado en 1964 usando un campo con un ángulo mayor: 10°. Ambos experimentos usaron el mismo set de primarios XYZ pero exhiben varias diferencias. Una de las razones para éste comportamiento es que, como ya se dijo, la distribución de conos no es uniforme en la retina; por ejemplo, no hay conos S en la región central de la retina, es decir en la fovea. Por tanto, hay dos sets de funciones de igualación del color conocidas como: a. Para observador a 2 grados, 1931 y b. Para observador a 10 grados, 1964. [4]

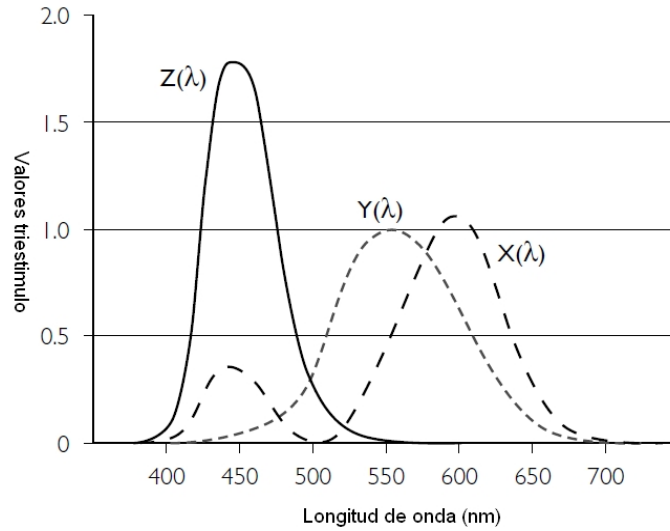


Figura 4. Funciones de igualación del color, CIE 1931, observador a 2° [4].

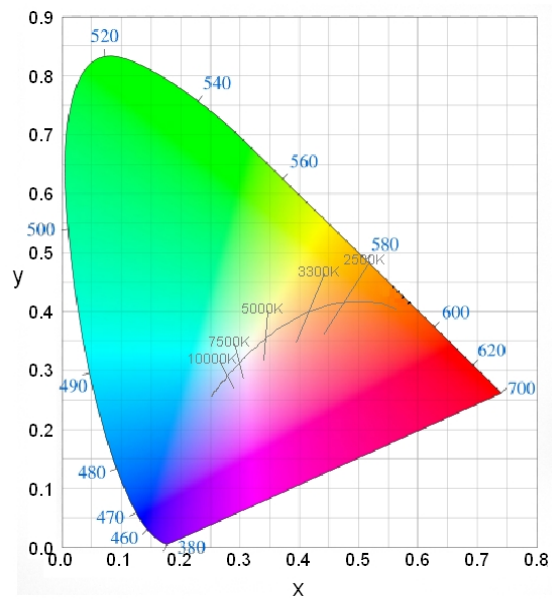


Figura 5. Modelo CIExy 1931, representación 2D del modelo XYZ.

Existe una representación en 2D del modelo XYZ, conocida como CIExy; donde:

$$\begin{aligned}
 x &= X / (X + Y + Z) \\
 y &= Y / (X + Y + Z)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Un mayor avance fue hecho por la CIE en 1976 con la introducción del sistema de color CIE-L*a*b*. Esta transformación no lineal de los valores XYZ proveyó soluciones parciales a problemas que se estaban presentando con el modelo XYZ relacionados con apariencia y diferencia del color. La transformación de los valores XYZ a valores L*a*b* está dada por:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\
 a^* &= 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \\
 b^* &= 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Donde X_n , Y_n y Z_n son los valores triestímulo del iluminante empleado. Este espacio está representado por una coordenada de color de luminosidad: L^* , y dos coordenadas de cromaticidad: a^* y b^* .

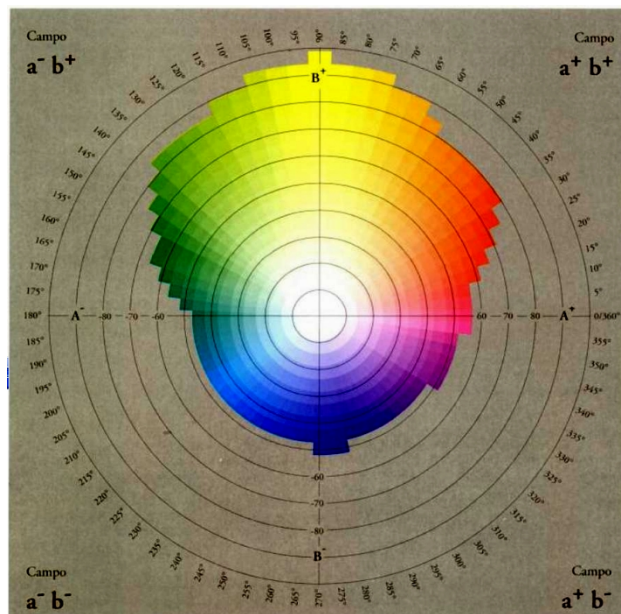


Figura 6. Modelo CIELab: vista 2D. [5]

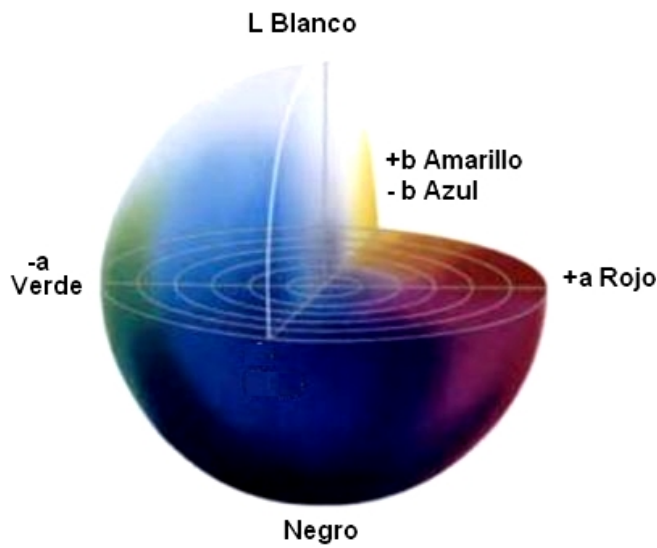


Figura 7. Modelo CIE-L*a*b*: vista 3D. [6]

1.1.3. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE COLOR.

1.1.3.1. ESPECTRORRADIOMETRO

Un espectrorradiómetro permite medir la distribución espectral de potencia absoluta de un estímulo, éste instrumento consiste en 4 partes principales: a. Óptica colectora, b. Monocromador, c. Detector, y d. Dispositivo de lectura. La óptica colectora sirve para recoger la luz proveniente de la muestra, formando un haz apropiado para el monocromador. El monocromador selecciona y transmite una banda estrecha de longitudes de onda del espectro proveniente del haz incidente. Un elemento dispersor (prisma o una rejilla de difracción) dentro del monocromador recibe el rayo incidente y propaga diferentes longitudes de onda en diferentes direcciones angulares. A la salida del monocromador otro arreglo óptico se encarga de enfocar la información sobre el detector. El detector a su vez sensa la potencia radiante y convierte todo a una señal eléctrica que es enviada hacia el dispositivo de lectura. [2]

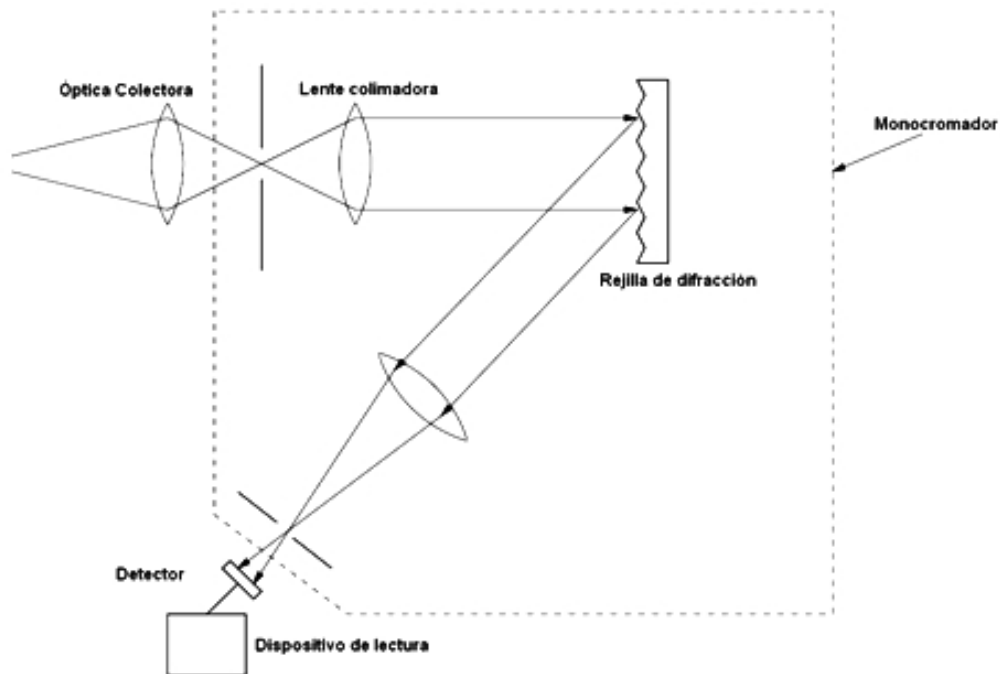


Figura 8. Espectrorradiómetro. [2]

1.1.3.2. ESPECTROFOTÓMETROS.

Los espectrofotómetros son usualmente usados para medir la razón entre la luz incidente y la luz reflejada de cierta superficie a lo largo del espectro visible. Los resultados se expresan como la reflectancia de una superficie de color. Sus elementos son: fuente de luz, esfera integradora, monocromador y un detector. El espectrofotómetro puede ser usado para control de calidad y formulación de recetas, en comparación con los colorímetros, son más costosos. [6]

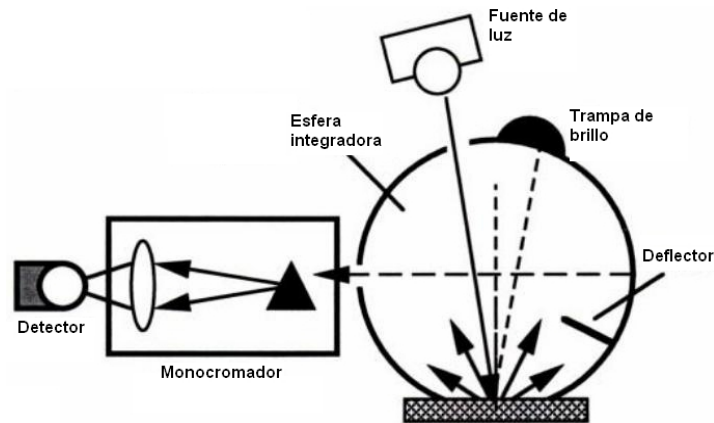


Figura 9. Espectrofotómetro. [6]

1.1.3.3. COLORÍMETROS TRIESTÍMULO.

Los colorímetros triestímulo pueden solamente medir color en términos de valores triestímulo bajo un set de condiciones iluminante/observador. Estos instrumentos son muy útiles para cuantificar la diferencia de color entre pares de muestras para control de calidad y, como se mencionó anteriormente, son mucho menos costosos que los espectrofotómetros. Están compuestos por: fuente de luz, esfera integradora y un detector; éste último incluye tres o cuatro filtros que intentan igualar las funciones de igualación del color. El objetivo de éste equipo es lograr una respuesta cercana a la de la ecuación (3).

En general, un colorímetro triestímulo es fácil de usar y poco costoso. Sin embargo, la repetibilidad de dicho instrumento es pobre debido al envejecimiento de los filtros y a la poca reproducibilidad de los filtros de acuerdo a las funciones de igualación del color CIE. [6]

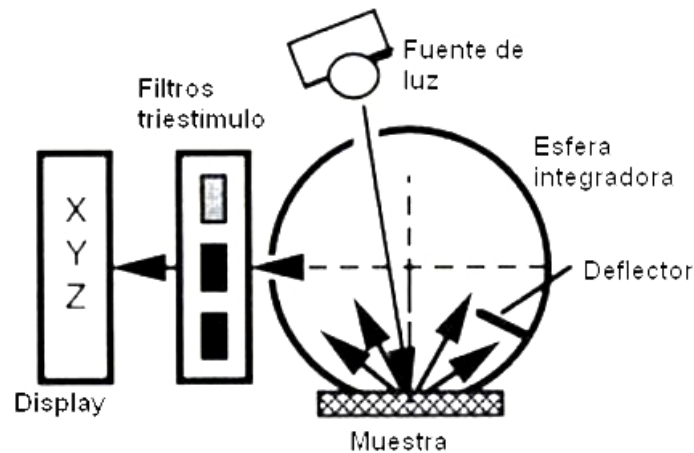


Figura 10. Colorímetro. [6]

1.1.3.4. REPRODUCCIÓN DIGITAL DEL COLOR: CAMARAS CCD-RGB.

En digitalización de las imágenes se habla de espacio de color RGB a aquella escala dada en tres valores distintos primarios: uno rojo, otro verde y otro azul; a partir de los cuales, combinados apropiadamente se obtiene determinado color. Este espacio es uno de los más usados en procesamiento de imágenes, cada primario se representa por medio de una escala de 0 a 255 ó de 0 a 1.

Con CCD se hace referencia al tipo de sensor que utiliza la cámara, CCD es la abreviación para Dispositivo de Carga Acoplada. Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico (generación de fotoelectrones a partir de un estímulo luminoso).

El elemento básico de un CCD es el píxel, que es la unidad donde se producen los fotoelectrones libres, la acumulación de estos produce una carga eléctrica proporcional a la intensidad de luz que incide, los píxeles en un sensor CCD actúan de forma tal que, la carga asociada a uno se transfiere al que se encuentra a su lado a un tiempo o ciclo determinado.

Existen varios tipos de diseño para producir una imagen RGB a partir de una cámara CCD, entre ellos se pueden mencionar dos. El primero consiste en un arreglo de 3 ó 4 sensores de color que son puestos de forma intercalada en un mosaico, formando un arreglo de sensores, las señales R,G,B, son logradas con la adecuada combinación y suma de las señales provenientes de éstos sensores. Uno de los diseños más comunes es el filtro de Bayer, el cual consiste de tres sensores, R, G, B en éste arreglo, el espacio ocupado por los sensores G es el doble en comparación a los sensores R y B; así, se permite que una vez digitalizada la imagen, la componente correspondiente a la luminancia tenga mayor representación que las componentes cromáticas, tal y como sucede en el ojo humano. El segundo diseño consiste en un prisma que permite separar en tres bandas de distinta longitud de onda la luz, dichas bandas son detectadas por tres arreglos distintos de sensores, para éste diseño no es posible lograr similitud con el modelo de color XYZ del ojo humano.

El diseño basado en el filtro de Bayer consta de un sensor CCD monocromático con un arreglo de filtros de color que es superpuesto sobre él; para reproducir digitalmente las imágenes capturadas los valores provenientes de cada sensor son interpolados para formar una imagen R,G,B en todos los puntos del arreglo; este proceso es llamado: *demosaicing*. [4]

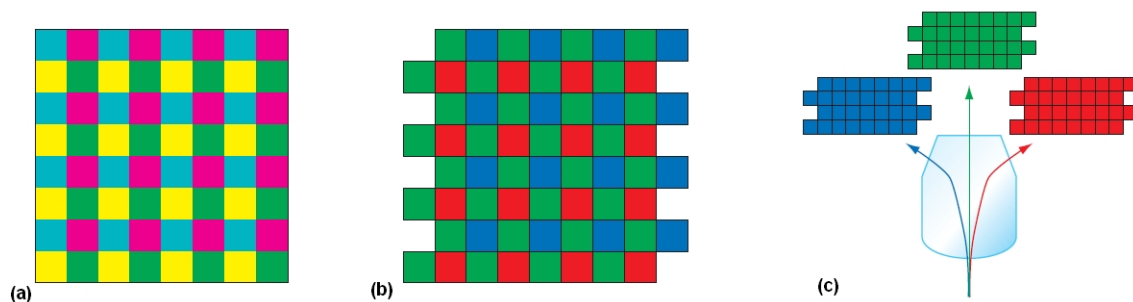


Figura 11. Arreglos de sensores de color para cámaras digitales: (a) Filtro de cuatro colores, (b) Filtro de tres colores, arreglo de Bayer, (c) Prisma. [4]

1.2. RADIOMETRIA Y FOTOMETRÍA

1.2.1. RADIOMETRÍA.

La radiometría es la medición del contenido de energía de la radiación electromagnética, y la determinación de cómo ésta energía es transferida desde una fuente a través de un medio hacia un detector. Por lo general, dichas mediciones se obtienen en unidades de potencia, por ejemplo, en watts, aunque también se pueden expresar en fotones por segundo, o en unidades de energía: fotones o joules. Las cantidades más manejadas en la radiometría son:

Energía Radiante (Q): energía emitida, transferida o recibida en forma de radiación electromagnética, unidad: joule (J).

Potencia Radiante (Φ): la potencia radiante o flujo radiante es la potencia (energía por unidad de tiempo), emitida, transferida, o recibida en la forma de radiación electromagnética, unidad: watt (W).

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (6)$$

Irradiancia (E): es la razón entre la potencia radiante incidente sobre una superficie de área dA_d , en la cual la normal se encuentra a un ángulo θ_d de la dirección de la radiación, unidad: watt/m².

$$E = \frac{d\Phi}{\cos \theta_d A_d} \quad (7)$$

Intensidad Radiante (I): es la razón entre la potencia radiante que sale de una fuente y que se propaga en determinada dirección hacia un elemento (un detector por ejemplo), con un ángulo sólido $d\Omega$, unidad: watt/steradián.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (8)$$

Donde el ángulo sólido $d\Omega$, se entiende como la razón de una porción del área superficial de una esfera y el cuadrado del radio de la misma:

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} \quad (9)$$

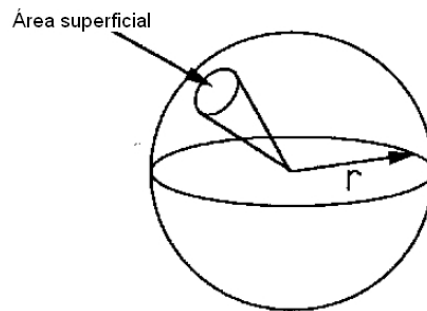


Figura 12. Representación del ángulo sólido.

Radiancia (L): Es la razón entre la potencia radiante y el ángulo sólido con respecto a la normal de una superficie, en dirección del flujo. Dicha superficie bien puede ser de la fuente o de un detector. Unidades: watt/ m² steradián.

$$L = \frac{d\Phi}{\cos\theta_s dA_s d\Omega} \quad (10)$$

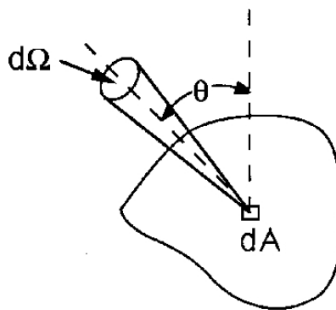


Figura 13. Radiancia

1.2.2. FOTOMETRÍA.

La fotometría es la medición de la radiación enfocada hacia el ojo humano como detector. Ya que la sensación que percibe el ojo es una experiencia subjetiva, no es directamente cuantificable en unidades físicas absolutas. En un principio, las calibraciones fotométricas se basaban en observadores humanos comparándose una fuente de luz desconocida con otra estándar. Actualmente, las calibraciones fotométricas son basadas en mediciones usando instrumentos físicos. Éstos emulan la respuesta del ojo humano con un detector de respuesta espectral cercana al observador estándar CIE o usando la función de respuesta espectral del observador estándar CIE en el análisis de los datos. Cabe anotar que, la fotometría se limita a la medición de la magnitud de la sensación visual sin tener en cuenta el color, lo cual compete a la colorimetría. Así como en la radiometría se miden ciertas características, en la fotometría se tienen sus similares:

Flujo Luminoso (Φ_v): Esta cantidad se deriva de la potencia de radiación espectral, evaluada de acuerdo al observador estándar CIE. Su unidad de medida es el lumen (lm).

$$\Phi_v = K_m \int \Phi_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

$V(\lambda)$ es la función de eficiencia para la visión fotópica, K_m es la eficiencia luminosa para la visión fotópica, donde $V(\lambda)$ alcanza su máximo valor (hacia los 555nm).

$$K_m = 683 \frac{V(\lambda_m)}{V(555.016nm)} \cong 683 \text{lmW}^{-1} \quad (12)$$

Así, también las cantidades medidas en la fotometría son equivalentes a las cantidades radiométricas, con la diferencia de que, así como en el flujo luminoso, se tiene en cuenta el observador estándar CIE (K_m):

Illuminancia (E_v): es el equivalente fotométrico de la irradiancia, por tanto es el flujo luminoso por unidad de área, su unidad de medida es el lumen/metro².

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{\cos \theta_d dA_d} = \frac{d\left[K_m \int \Phi_\lambda V(\lambda) d\lambda\right]}{\cos \theta_d dA_d}$$

(13)

Intensidad Luminosa (I_v): es el equivalente en fotometría de la intensidad radiante. La intensidad luminosa es el flujo luminoso por ángulo sólido. La unidad de medida es la candela (lm/sterradián).

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} = \frac{d\left[K_m \int \Phi_\lambda V(\lambda) d\lambda\right]}{d\Omega} \quad (14)$$

Luminancia (L_v): Equivalente para la radiancia. Es el flujo luminoso por unidad de área por unidad de ángulo sólido. Su unidad es la candela/metro².

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{\cos \theta_s dA_s d\Omega} = \frac{d\left[K_m \int \Phi_\lambda V(\lambda) d\lambda\right]}{\cos \theta_s dA_s d\Omega} \quad (15)$$

CAPITULO II.

COLORIMETRO TRIESTIMULO CON CÁMARA CCD-RGB PARA MEDICION DE COLOR EN TEXTILES.

En el presente capítulo se muestra el colorímetro triestímulo diseñado en la empresa INTECOL S.A. basado en cámara CCD-RGB para medición de color en textiles y los aspectos considerados para su diseño.

2.1. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UN COLORIMETRO TRIESTIMULO.

2.1.1. GEOMETRÍA DE LA DISPOSICION DE LOS ELEMENTOS DE UN INSTRUMENTO DE MEDICION DE COLOR.

La disposición de los elementos fundamentales en los instrumentos de medición de color como lo son el detector, la muestra evaluada y la fuente de luz es definida de acuerdo a las características de la muestra: turbidez, reflectancia, transparencia, espesor, acabado de la superficie, tamaño, etc. La reflexión de los materiales, también se caracteriza por su apariencia subjetiva. Existen cualidades como el brillo, textura, entre otras que corresponden a distintas evaluaciones psicológicas de diferentes características reflectoras goniométricas de la muestra. En realidad son una combinación de las sensaciones que dan lugar las reflexiones especulares y difusas combinadas. [7]

2.1.1.1. LEY DE LAMBERT, CLASIFICACION DE SUPERFICIES DE ACUERDO A SU REFLECTANCIA.

Una fuente plana de dimensiones finitas tiene en una dirección dada, una intensidad energética proporcional al coseno del ángulo θ que forma esa dirección con la normal a la superficie, así:

$$E_{\theta} = E_n \cos \theta \quad (16)$$

Donde: E_{θ} es la intensidad radiante en la dirección de θ , E_n es la intensidad en la dirección normal a la superficie.

Un difusor perfecto ó superficie lambertiana es aquél en el cual para cualquier ángulo de incidencia del haz, el flujo reflejado posee una intensidad igual a la prevista por la ley de Lambert. Un cuerpo altamente difusor se conoce por cuerpo “mate”, los medianamente difusores “semi-mate”; y, por último, se encuentran los cuerpos poco difusores o “brillantes”. [7]

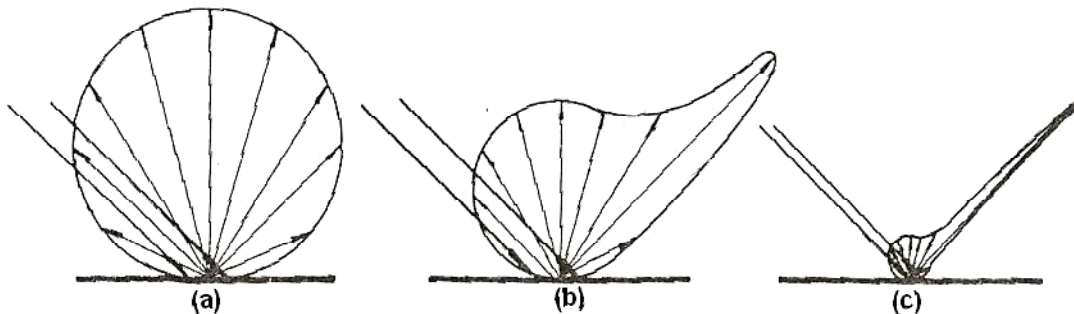


Figura 14. (a) Difusor perfecto, (b) Cuerpo mate o altamente difusor, (c) Cuerpo brillante o poco difusor. [7]

Así, la CIE recomienda las siguientes disposiciones muestra-iluminación-detector para los instrumentos de medición de color, dependiendo del tipo de análisis a realizar y de la muestra empleada: $0^{\circ}/45^{\circ}$, $45^{\circ}/0^{\circ}$, Difuso/ 0° , 0° / Difuso; donde, el

primer ángulo indica la posición de la lámpara con respecto a la normal a la muestra y el segundo la posición del detector con respecto a la normal a la muestra. [7]

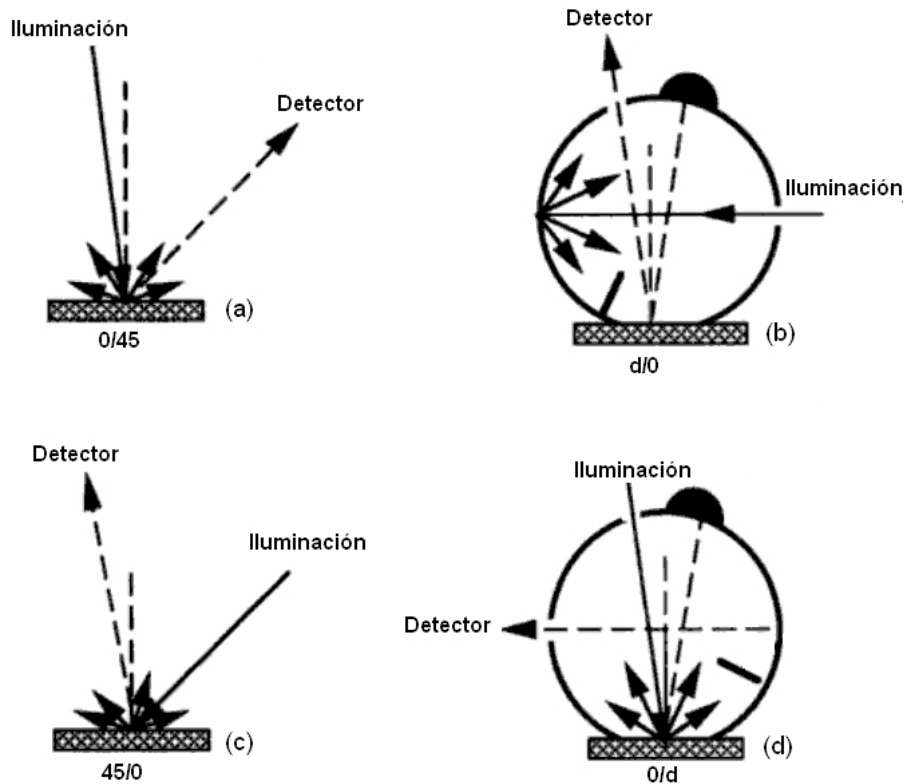


Figura 15. Disposiciones muestra/iluminación/detector recomendadas por la CIE: (a). 0/45, (b) d/0, (c) 45/0, (d) 0/d. [7]

2.1.1.2. ESFERA INTEGRADORA O ESFERA DE ULLBRICHT.

Como se mencionó en el capítulo anterior, un colorímetro está integrado por distintos componentes tales como: fuente de luz, detector, filtros triestímulo, esfera integradora, entre otros. Un elemento clave entre estos es la esfera integradora, la cual, permite realizar distintos tipos de caracterizaciones: medición del flujo de una lámpara, información sobre la transmitancia o reflectancia de una muestra, en fin. Una esfera integradora es una esfera semi-cerrada con algunas aperturas útiles para ubicar una lámpara, la muestra a evaluar y un detector. Dicha esfera se

encuentra cubierta por dentro con una pintura 100% reflectiva (idealmente), uniforme y difusa, en pocas palabras, debe tener características de difusor lambertiano. Para evitar que la luz llegue directamente al detector o a la muestra, se emplea también un deflector o barrera de luz.

El arreglo permite que se produzcan repetidas reflexiones difusas en la esfera antes de llegar al detector y, al llegar a éste lo hagan de forma uniforme, esto indica que una esfera integradora tiene también uso de fuente de luz uniforme-difusa.

Si el interior de una esfera de radio R es iluminado (ya sea por una lámpara de dimensiones físicas despreciables frente al tamaño de la esfera, o a través de una abertura que sea despreciable en comparación con la superficie total) el flujo radiante se distribuirá en la superficie interior por reflexión en las paredes, que deberían estar recubiertas con un material similar al de un difusor ideal perfecto.

Asumiendo que la fuente emite un flujo de Φ_v lumens, después de una primera reflexión el flujo en dicha esfera será $\rho\Phi_v$, después de una segunda reflexión será $\rho^2\Phi_v$, y así sucesivamente para las reflexiones restantes, el flujo total reflejado en dicha esfera será:

$$\Phi_{v\text{reflejado}} = \Phi_v (\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^n) \quad (17)$$

La suma de potencias $(\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^n)$ es equivalente a escribir: $\rho/(1 - \rho)$ por tanto la ecuación queda de la forma:

$$\Phi_{v\text{reflejado}} = \Phi_v (\rho / (1 - \rho)) \quad (18)$$

Por tanto, la iluminancia debido a los lumens reflejados será el flujo reflejado en dicha esfera sobre el área de la superficie de la misma así:

$$E = \Phi_v \left(\rho / \pi R^2 (1 - \rho) \right) \quad (19)$$

Donde $\rho/(1-\rho)$ se conoce como *factor de la esfera integradora*. [8]

2.1.2. MATERIALES DE REFERENCIA O PATRONES- MATERIAL DE RECUBRIMIENTO PARA LA ESFERA INTEGRADORA.

Existen dos mediciones típicas: reflexión especular y difusa. Para la colorimetría es más importante conocer las características absorbentes para cada longitud de onda del material que se quiere estudiar, que conocer la capacidad de su superficie para reflejar el flujo que incide sobre él. Esto es: sin modificarse, como resultado de la absorción del medio. Por ello es más conveniente que la superficie a estudiar sea un material opaco mate casi ideal, es decir, que se aproxime a un difusor perfecto que a la vez posea un factor de reflectancia cercano a la unidad, de modo que sirva como referencia para evaluar las características de otros materiales más selectivos. En la práctica esto es una superficie blanca y mate.

Inicialmente la CIE recomendó como dicho patrón el óxido de magnesio (MgO), sin embargo, debido a estudios realizados, se llegó a la conclusión que dicho material modifica sus características reflectantes después de ser aplicado. Debido a esto, y a otros estudios, a partir de 1969 se recomienda el uso del Sulfato de Bario (BaSO₄) como un patrón de reflectancia más reproducible y estable, del sulfato de Bario se conoce que sus cualidades permanecen mucho más estables. [7]

Por tanto, para el diseño de esferas de Ulbricht o integradoras, se recomienda cubrir el interior de la misma con pintura a base de Sulfato de Bario, y, en el

momento de realizar medidas, calibrar el instrumento con un patrón de éste mismo material.

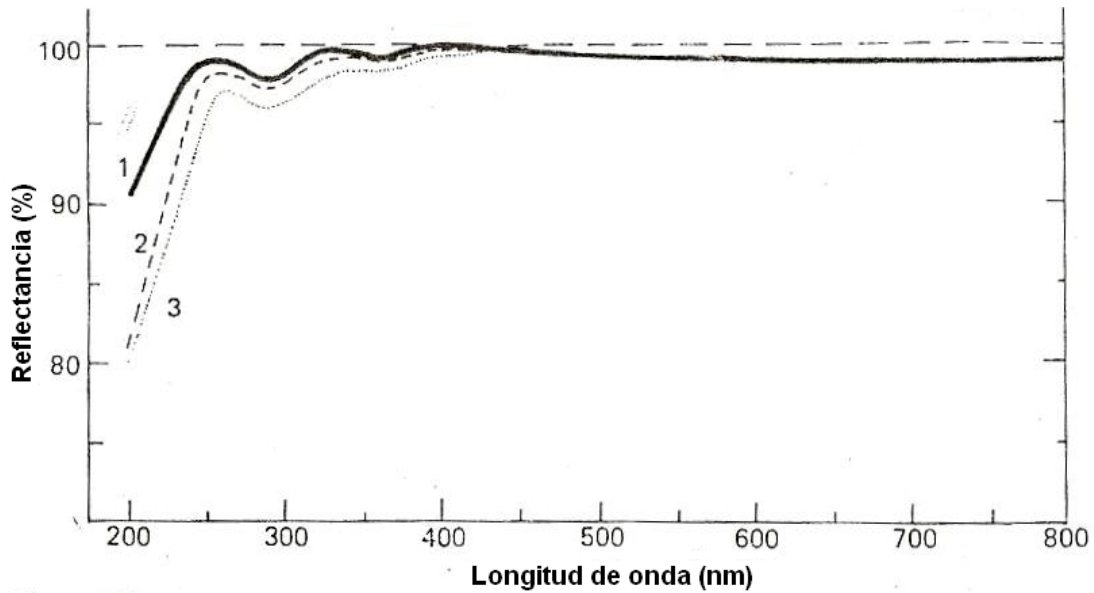


Figura 16. Reflectancia del Óxido de Magnesio preparado por la compañía KODAK, 1. Recién preparado, 2. Después de 24 horas de preparado, 3. Después de 48 horas de preparado. [7]

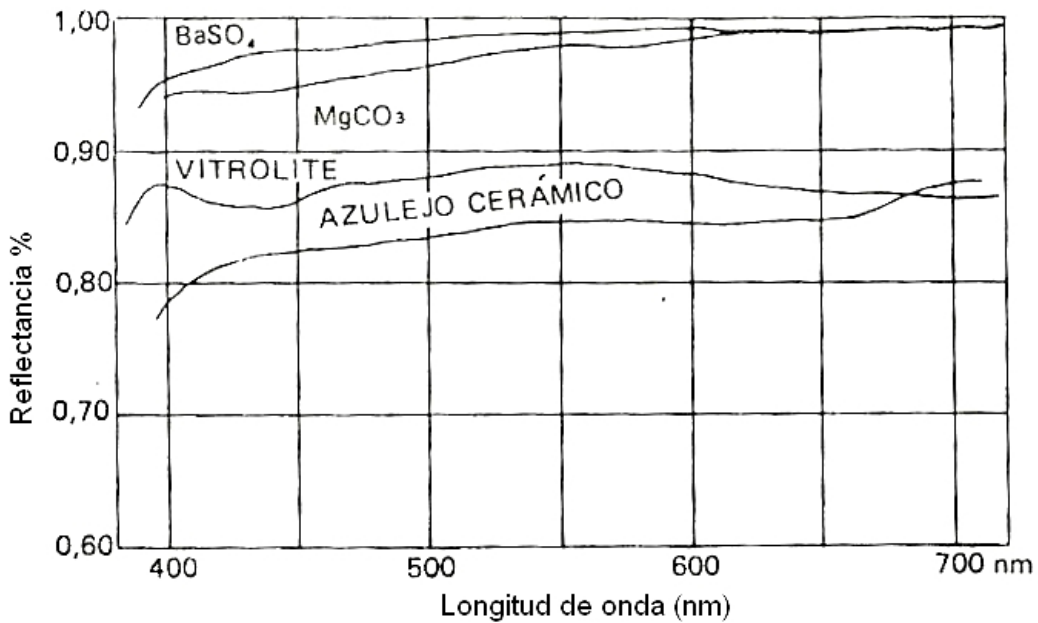


Figura 17. Reflectancia de distintos materiales, entre ellos el sulfato de Bario (BaSO₄). [7]

2.1.3. FUENTES DE LUZ E ILUMINANTES.

Tal como se explicó anteriormente, las coordenadas de color de una muestra dependen tanto de la reflectancia de la misma, así como del espectro de emisión de la fuente de luz empleada para caracterizarla. Por tanto, se definieron unas distribuciones espectrales de potencia llamadas “*iluminantes*”, ya que éstas fuentes de luz son teóricas, se definieron también unas fuentes de luz estándar reales para simular dichos iluminantes, los iluminantes fueron establecidos en 1931 por la CIE éstos son:

- Iluminante A: Un iluminante que tiene la misma distribución de potencia espectral relativa que una temperatura de Planck de 2856°K.
- Iluminante B: Un iluminante que tiene una distribución de potencia espectral relativa cercana a la luz del sol directa. (Ya obsoleto).
- Iluminante C: Iluminante que representa la luz día promedio con una temperatura de color correlacionada de aproximadamente 6800°K. (Ya obsoleto).
- Iluminante D65: Iluminante que representa una fase de la luz día con una temperatura de color correlacionada de aproximadamente 6504°K.

La CIE recomienda principalmente los iluminantes tipo A y D65, igualmente, existen otros iluminantes tipo luz día tales como: D50, D55 y D75 que corresponden a temperaturas de color correlacionadas de 5000°K, 5500°K y 7500°K respectivamente. [1]

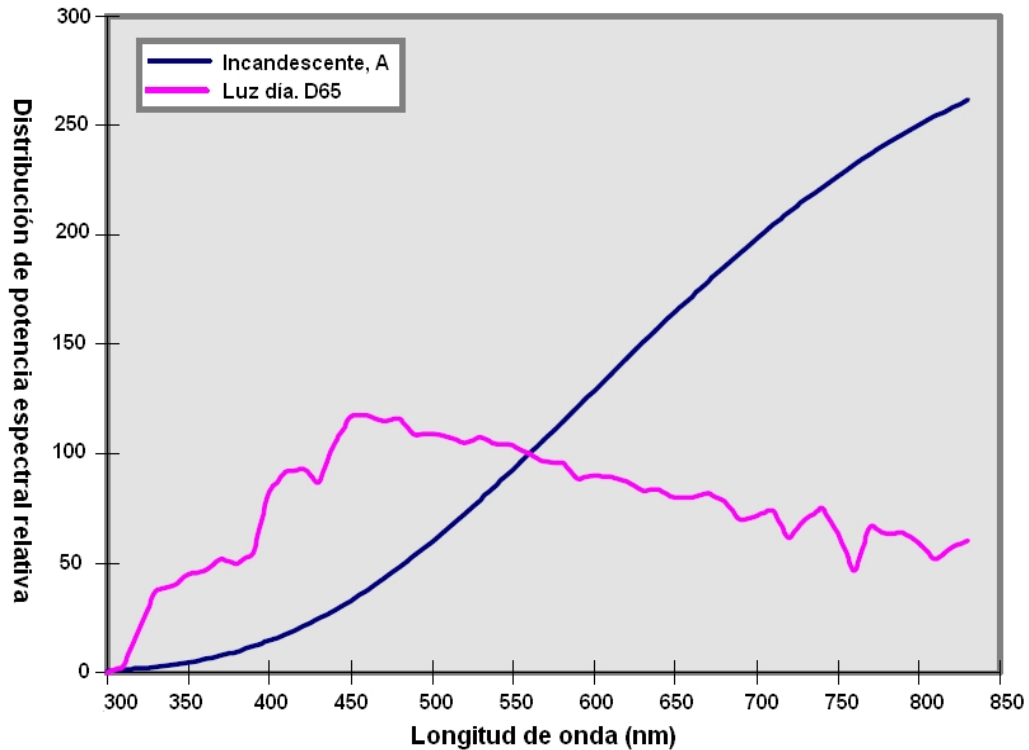


Figura 18. Distribución espectral de potencia relativa de los iluminantes recomendados por la CIE: Incandescente: A, y Luz día: D65. [1]

2.2. MEDICION Y PERCEPCION DEL COLOR EN AMBIENTES INDUSTRIALES.

2.2.1. PERCEPCIÓN DEL COLOR: CABINAS PARA LA COMPARACIÓN DEL COLOR.

Usualmente, en la industria se emplean este tipo de sistemas para inspección visual del color de sus productos, bien sea en la industria alimenticia, cosmética, textilera, entre otras.

Las cabinas de inspección visual consisten en un “encerramiento” el cual, por lo general se encuentra equipado con varios iluminantes para la evaluación del color, como su nombre lo dice la inspección se hace visual, el operario de este sistema pone la muestra en dicho encerramiento, y la somete a varios de los iluminantes.

El operario compara la muestra frente a una de la cual se conoce tiene un color adecuado. Los resultados consisten en decir que tanto se parece la muestra frente al patrón y son subjetivos, es decir, depende de la persona que manipule el sistema y no son funcionales para evaluación del color en línea, sino para hacer muestreos cada cierto tiempo. Igualmente, no brindan medidas de color de la muestra. Estas cabinas permiten también detectar el metamerismo, fenómeno en el cual dos muestras parecen similares frente a cierto iluminante, pero cambian al utilizarse otro.



Figura 19. Cabinas para la evaluación del color, fabricadas por la compañía:
Grafitec International Inc.

Por lo general, se montan mesas con este tipo de equipo al lado de las líneas de producción para realizar la inspección de alguna muestra, o se montan sobre las líneas de producción lámparas que traten de reproducir los iluminantes, de forma tal que los operarios cada cierto tiempo realicen una inspección muestral del producto.

2.2.2. MEDICIÓN CON ESPECTROFOTÓMETROS.

Por lo general, en ambientes industriales, a nivel de laboratorio se emplean espectrofotómetros y colorímetros para la medición muestral de color de sus productos. En el sector textil esta no es la excepción, gracias a una visita realizada a una fábrica textilera en Colombia, se obtuvo dicha información; cada cierto tiempo, se extraen pequeñas muestras de tela de un lote de producción para verificar que sus coordenadas de color, L^* , a^* , b^* correspondan a una diferencia de color $\Delta E \leq 1.0$ (depende del cliente también), donde dicha diferencia de color es igual a:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

(20)

Donde:

$$\Delta L = L_1^* - L_2^*$$

$$\Delta a = a_1^* - a_2^*$$

$$\Delta b = b_1^* - b_2^*$$

Donde L_1^*, a_1^*, b_1^* corresponden a las coordenadas de cromaticidad de una muestra 1, y L_2^*, a_2^*, b_2^* corresponden a las coordenadas cromáticas de una muestra patrón 2.

2.2.3. MEDICION DE COLOR EN LINEA.

2.2.3.1. ESPECTROFOTÓMETROS MÓVILES.

Actualmente existen varios equipos para medición de color de textiles en línea, entre los más conocidos se encuentran los espectrofotómetros móviles, los cuales se mueven a lo ancho de la tela con precisiones de un $\Delta E = 0.1$, y otros que consisten en una barra dotada por hasta 5 sensores, que se encargan de cubrir ciertas partes del ancho de la tela, que miden variaciones en el tono de la misma. Entre sus diversas prestaciones, las más comunes además de una buena precisión, son: entrega de datos en tiempo real (a operaciones de máquina de 120 metros/minuto), cubrimiento de medición de color en todo el ancho de la muestra, ya que hay algunas que pueden llegar a medir en un ancho de 200cm, y, por último, interfaces gráficas llamativas y sencillas para el personal que opera dichos sistemas. En general, son sistemas hechos para trabajar en ambientes industriales, que se acoplan fácilmente a las máquinas del sector. [9]



Figura 20. Instrumento para medición de color basado en un espectrofotómetro que se desplaza: Compañía MAHLO.

2.2.3.2. MEDICION DE COLOR CON CÁMARAS CCD EN LA INDUSTRIA.

Anteriormente se mencionó que con ciertos arreglos de filtros sobre el CCD de las cámaras digitales se puede percibir el color de forma cercana a como lo realiza el ojo humano, a pesar de que algunos de estos arreglos permiten una mayor

reproducción del modelo de color humano que otros, no son tan precisos como lo son los espectrofotómetros o los colorímetros.

A nivel industrial, las cámaras CCD actualmente han ganado auge en la inspección de la calidad de sus productos, se emplean para mediciones, detección de presencia/ausencia de características, lectura de texto, códigos de barras o 2D, conteo, medición de color entre otras. Dichas cámaras tienen características especiales para el ambiente industrial: protección contra agua, polvo, memoria de gran capacidad para almacenar los programas, salidas/entradas digitales para configurar el inicio de la adquisición de imágenes, o señales de aceptación/rechazo de la pieza inspeccionada, capacidad para trabajar a altas velocidades en líneas de producción con buena resolución de imagen, entre otras, dichas cámaras o sistemas son conocidas como smart camera, las cuales son específicamente sistemas embebidos, con software de procesamiento de imágenes listo para configuraciones rápidas de inspección en líneas de producción.

Las características anteriormente descritas no son la excepción para la medición de color en línea, como ya se explicó, las cámaras digitales ofrecen 3 coordenadas de color en el espacio R, G, B: las cuales en una imagen digital, corresponden a valores que van desde el 0 hasta el 255; sin embargo, el ojo humano no percibe valores de éste tipo (como ya se explicó en la anterior sección); por lo tanto, muchas de estas cámaras para entregar valores en el modelo CIE-L*a*b*, les son introducidas transformaciones lineales o no lineales, LUTs entre otros; si bien, a veces este tipo de valores no son muy precisos, son un buen punto de partida para la medición de color en línea, sin embargo, actualmente no son muy comunes en la medición de color de textiles en línea.

2.2.3.3. COLORÍMETRO TRIESTÍMULO BASADO EN UNA CAMARA CCD-RGB, PARA MEDICIÓN DE COLOR EN LÍNEA.

El grupo de desarrollo de INTECOL S.A. en conjunto con la Universidad de Antioquia diseñaron el colorímetro triestímulo basado en cámara CCD-RGB para medición de color de textiles en línea [10] que se presenta a continuación, el cual, en el presente trabajo fue caracterizado y optimizado, para su diseño inicial se tuvo en cuenta:

a. Tamaño de la muestra (tela) a medir.

Como se describió en los equipos de medición de color de textiles en línea, dichas muestras pueden llegar a medir hasta 2.30m de ancho, el colorímetro prototipo fue elaborado para medir muestras de hasta 50cm de ancho, por lo cual, para monitorear toda la tela se tendría la opción de ubicar 3 de estos equipos para muestras de hasta 1.40-150m los cuales son los tamaños más comunes en dicha industria.

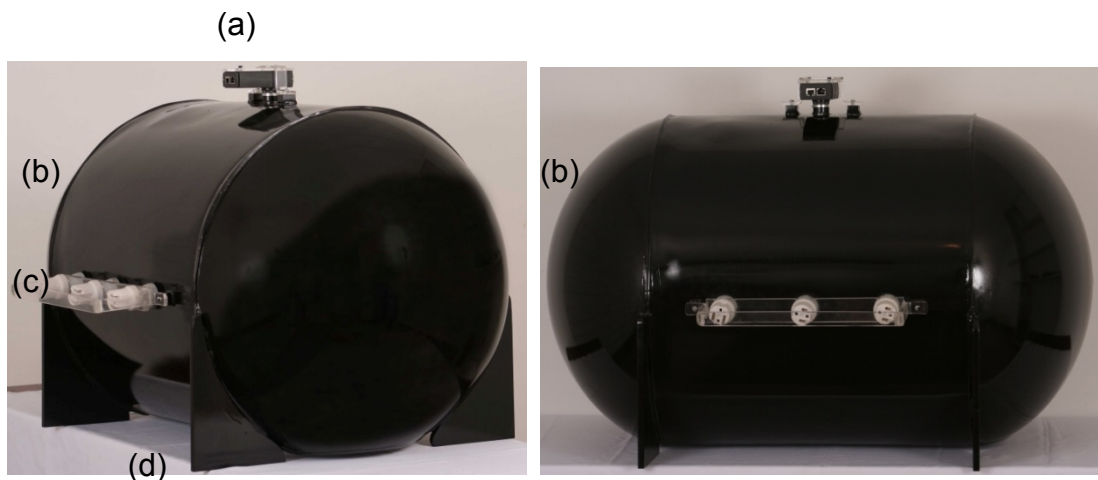


Figura 21. Prototipo del colorímetro triestímulo para medición de color en textiles:
(a) Cámara, (b) Tapas esféricas, (c) Iluminación tipo LED, (d) Cavidad para la muestra. [10]

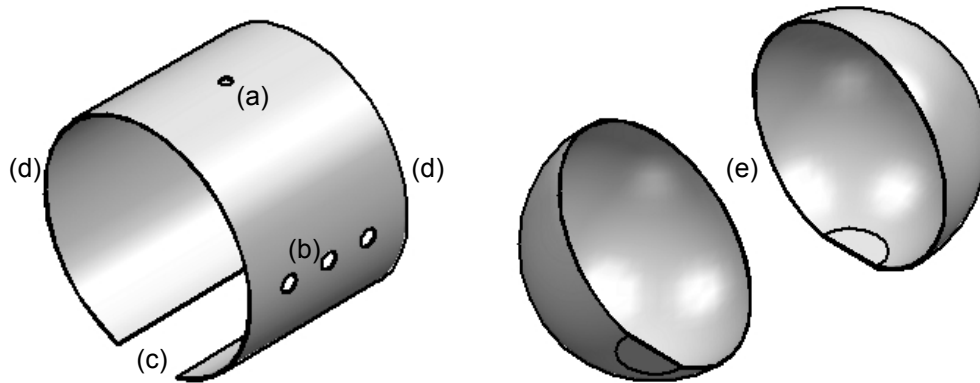


Figura 22. Detalle de la geometría del colorímetro: (a) Ubicación del detector. (b) Ubicación de la iluminación. (c) Cavidad para la muestra. (d) Punto de montaje de las tapas esféricas. (e) Tapas esféricas del domo.

b. Esfera integradora

Con un tamaño de muestra definido, para el colorímetro se tendría que dimensionar una esfera integradora o un tipo de geometría que produjera una iluminación uniforme sobre la tela; teniéndose en cuenta este parámetro, y, además, que en las líneas de producción de textiles en ocasiones no hay el suficiente espacio para ubicar una geometría de este tipo con dichas dimensiones. Así, se dimensionó una geometría que, consiste en un cilindro, con tapas esféricas a los lados, el cual cubre los 50cm de largo de la muestra.

El tipo de geometría empleada, fue basada en una de las presentadas anteriormente: D/0°, por lo cual se tendría una iluminación tipo difusa y el detector ubicado en un ángulo a 0° de la normal a la muestra.

c. Modelo de color a manipular para la entrega de resultados: Detector.

A pesar de que las cámaras CCD-RGB entregan valores de 0 a 255 o de 0 a 1 de acuerdo al procesamiento digital realizado de la imagen adquirida (promedios del valor del color en el área de inspección), dichos valores no reproducen idénticamente los valores de color de acuerdo la percepción del ojo humano; debido a esto, algunas de las cámaras empleadas en inspección de color a nivel

industrial le son introducidas transformaciones de tipo lineal o no lineal con el fin de entregar valores de color cercanos a dicha percepción; estas transformaciones permiten pasar del espacio de color R,G,B, manejado en procesamiento digital de imágenes al modelo de color CIE-L*a*b*. Aquellas cámaras que no tienen introducidas dichas transformaciones, es necesario calcularlas; para el caso del diseño del colorímetro presentado, en un inicio no se vio necesario dicho cálculo; ya que la cámara dimensionada para el sistema de inspección contaba con el algoritmo necesario para hacer la transformación. Además de contar con un algoritmo incorporado de transformación entre espacios de color, la cámara empleada cuenta con protección para ambientes industriales: agua a ciertas presiones y polvo, entradas/salidas digitales para la generación de alarmas de aceptación/rechazo, comunicación Ethernet, la cual es muy común en caso de que se deseen enviar los datos a un computador o PLC, y un completo software de procesamiento de imágenes que permite configurar, además de tareas de inspección de color, tareas típicas en la industria de: conteo, lectura de texto, lectura de código de barras o 2D, entre otras ya descritas; cabe mencionar que éstas cámaras son sistemas completamente embebidos, en las cuales, quedan almacenadas las tareas de procesamiento y son ejecutadas sin necesidad de un procesador adicional. La cámara empleada proviene de la compañía COGNEX, la cual es muy reconocida en el sector de la visión artificial para inspección en la industria.

d. Velocidad de desplazamiento del textil.

La cámara seleccionada adquiere imágenes a una velocidad de 30 frames por segundo, con un tiempo de procesamiento de aproximadamente 100ms por cada 25cm de alto por 50 cm de ancho de textil, lo cual es adecuado, ya que comúnmente se manejan velocidades de 100metros/min en dicha industria.

e. Iluminación.

Por sistema de iluminación se propusieron 3 lámparas tipo LED blancas que serían distribuidas a lo largo del domo construido, juntas, lograrían una iluminación difusa, propuesta en la geometría $D/0^\circ$.

f. Material y recubrimiento del domo.

El material a partir del cual se fabricó el domo fue acrílico, el cual no tiene alto costo y no es muy pesado para su transporte; generalmente en la industria se recomienda para este tipo de montajes un material más resistente, sin embargo, debido a que éste fue un prototipo, se fabricó en acrílico. Para cubrir el domo internamente se empleó pintura común, a base de TiO_2 , componente del cual están fabricadas gran parte de las pinturas, el domo no fue pintado con un recubrimiento a base de BaSO_4 debido a que es una pintura bastante costosa, y, de acuerdo al fabricante, para que tenga una buena reflectancia difusa y cubra correctamente, recomienda aplicar varias capas (más de las normales que para una pintura de TiO_2).

CAPITULO III.

CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL COLORIMETRO TRIESTÍMULO BASADO EN CAMARA CCD-RGB PARA MEDICIÓN DE COLOR EN TEXTILES.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL COLORÍMETRO RECIBIDO POR PARTE DE INTECOL S.A.

El colorímetro propuesto en el capítulo anterior fue el recibido para la etapa de caracterización de este proyecto, para la cual, fueron necesarias realizar las siguientes medidas:

3.1.1. CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTO.

El recubrimiento fue caracterizado con un espectrofotómetro Ocean Optics de la Universidad de Antioquia. Como esfera integradora se empleó el mismo domo y por iluminación fue empleada una lámpara fluorescente blanca, de la cual, se tiene conocimiento tiene un espectro que abarca gran parte del espectro visible, el patrón referencia fue una pequeña muestra de pintura hecha a base de sulfato de Bario ($BaSO_4$). A continuación se tomaron curvas de reflectancia con la misma lámpara y con una muestra de la pintura hecha a base de Dióxido de Titanio las cuales fueron comparadas con respecto a la curva de reflectancia del sulfato de Bario:

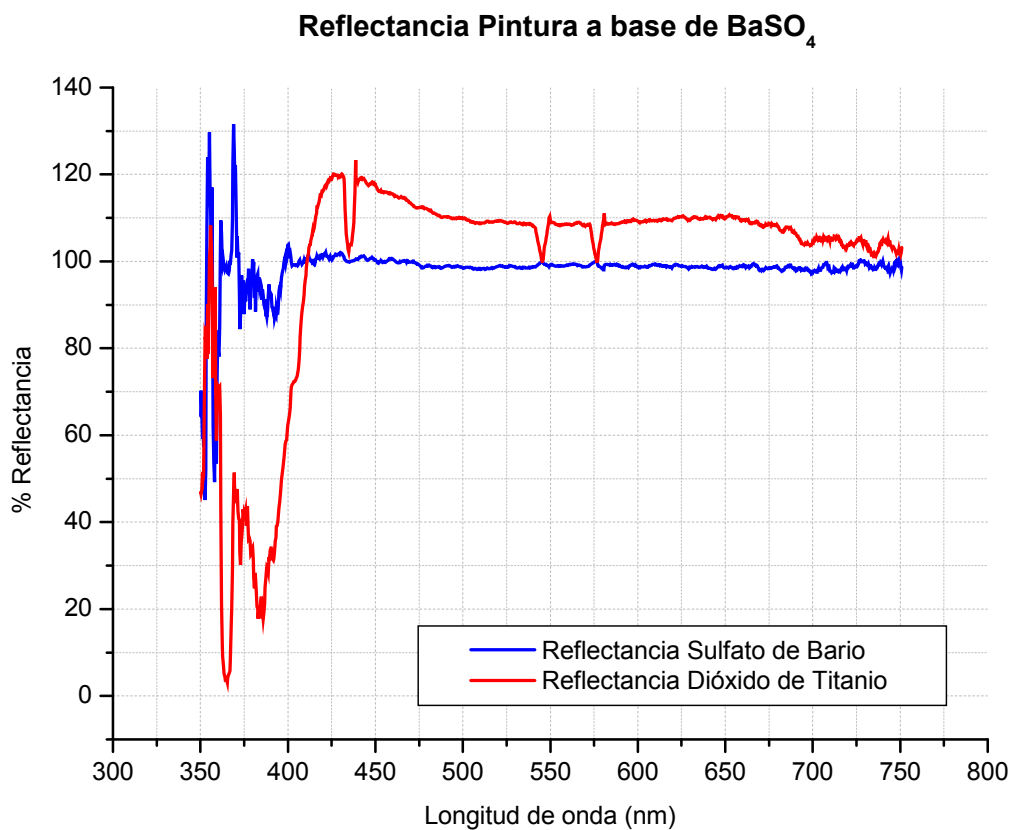


Figura 23. Comparación de reflectancias de muestras de pinturas hechas a base de: Sulfato de Bario (azul), Dióxido de Titanio (rojo).

Como se observa, el sulfato de Bario tiene una buena reflectancia hacia el violeta, característica no muy buena en el dióxido de titanio el cual tiene una curva de reflectancia menos uniforme que el sulfato de Bario; por lo cual, en el caso de muestras que sean de alta reflectancia en dicha región del espectro visible no será posible cubrir la esfera integradora con pintura a base de TiO₂ ó tomar por patrón una muestra de ésta pintura, ya que hacia los violetas, el dióxido de Titanio absorbe la luz proveniente de éstas longitudes de onda. En dichas curvas de reflectancia se presenta también una reflectancia mayor para el Dióxido de titanio que para el sulfato de Bario hacia longitudes de onda de aproximadamente 420nm en adelante, lo cual se debe a que el sulfato de Bario es un poco mas opaco que

el dióxido de Titanio. El efecto de absorbanza del violeta por parte del Dióxido de Titanio pudo haberse visualizarse mucho mejor si el domo empleado hubiera estado recubierto completamente por Sulfato de Bario, pero por razones ya mencionadas esto no fue posible. La absorción del dióxido de Titanio hacia las longitudes de onda bajas también se puede verificar en las curvas de distribución espectral de potencia relativa vs. Longitud de onda de la lámpara fluorescente blanca empleada; en las cuales, se visualiza un pequeño pico antes de los 400nm el cual se presenta para el sulfato de Bario más no para el dióxido de Titanio para el cual es absorbido, además, dicha potencia relativa es mayor en los 400nm para el sulfato de Bario que para el dióxido de Titanio, de ahí en adelante, se visualiza una mayor potencia relativa para el dióxido de Titanio que para el sulfato de Bario, lo cual ya fue explicado.

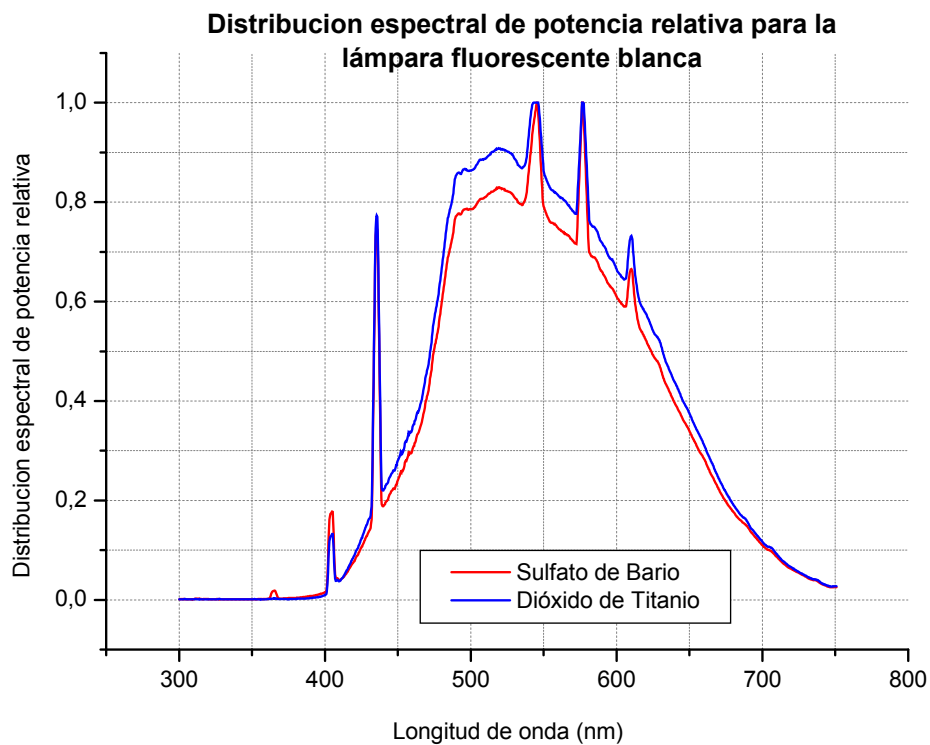


Figura 24. Distribución espectral de potencia relativa para la lámpara fluorescente blanca.

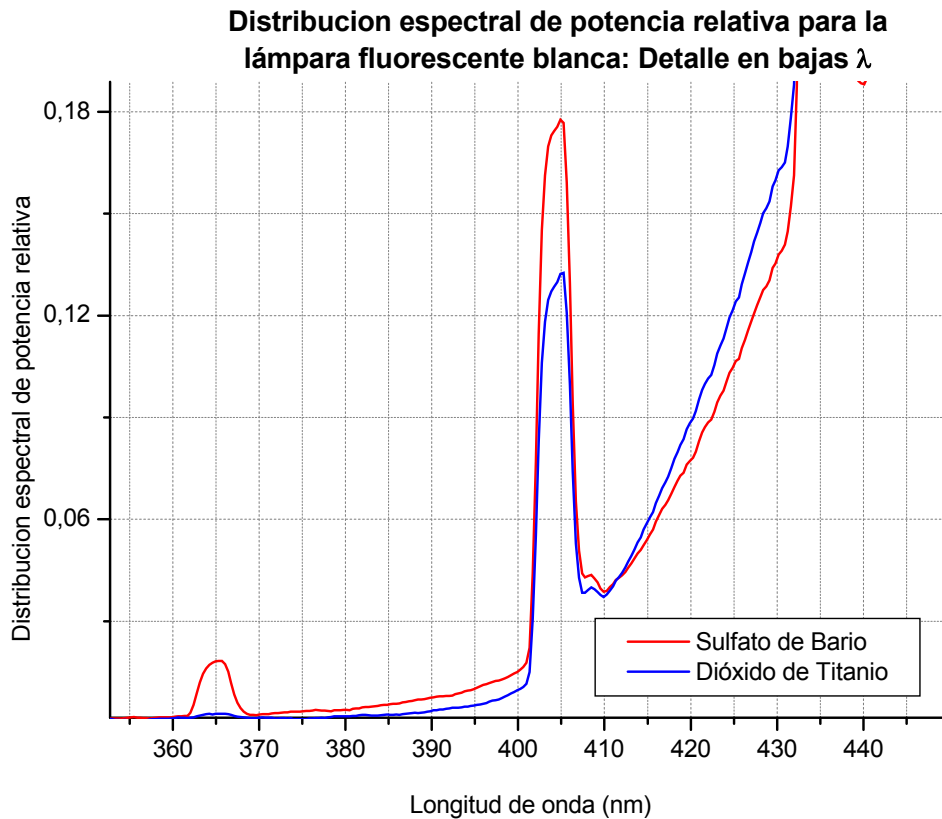


Figura 25. Distribución espectral de potencia relativa para la lámpara fluorescente blanca: Detalle hacia las bajas longitudes de onda.

3.1.2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EN CONJUNTO.

Para verificar el buen funcionamiento del sistema como un conjunto: esfera (domo), lámparas y recubrimiento, se empleó una carta de color COLORCHECKER con 24 muestras distintas (entre ellas una escala de grises), las cuales vienen con sus valores de color CIE-L*a*b*. A dichas muestras se les tomaron curvas de reflectancia y fueron comparadas con mediciones realizadas en un laboratorio de la compañía TINTAS & TINTAS.

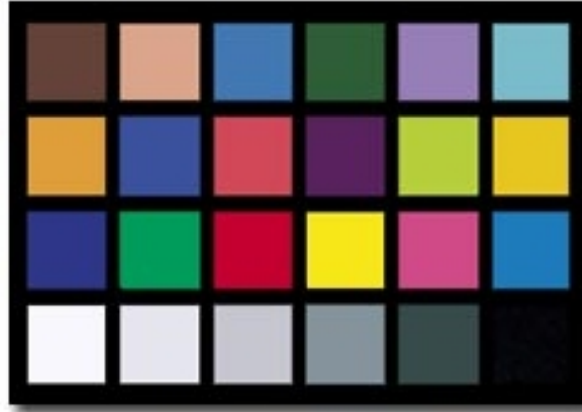


Figura 26. Carta de color COLORCHECKER.

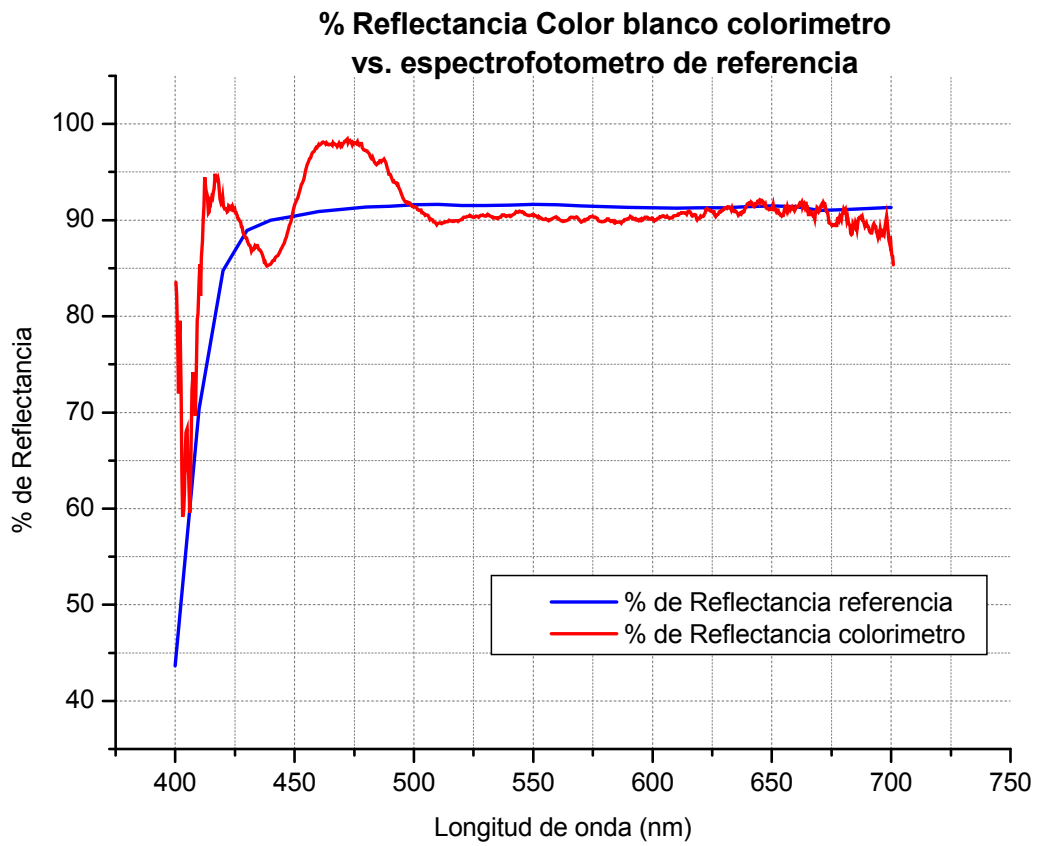


Figura 27. Reflectancia para la muestra de color blanco de la carta de color: comparación entre el colorímetro diseñado y un espectrofotómetro de referencia.

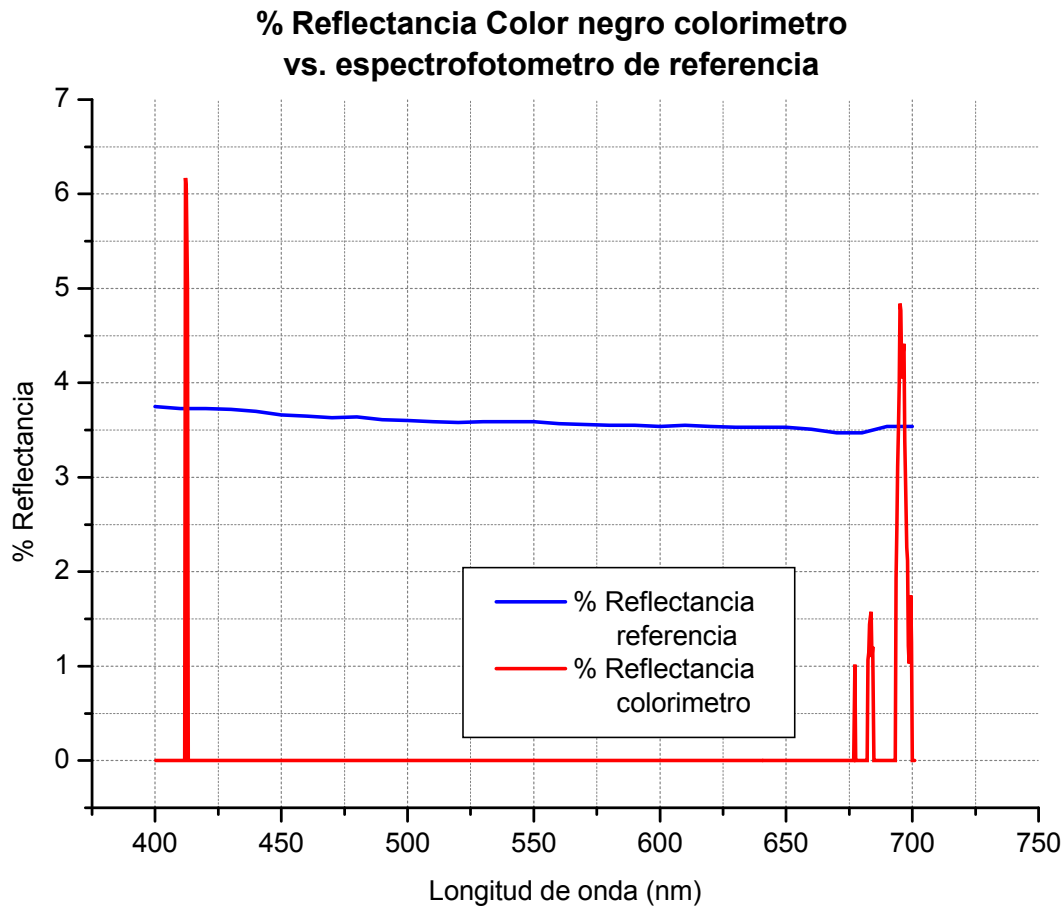


Figura 28. Reflectancia para la muestra color negro de la carta de color: comparación entre el colorímetro diseñado y un espectrofotómetro de referencia.

La reflectancia para colores con componente en longitudes de onda altas (650nm en adelante) o bajas (450nm hacia abajo) no se ve muy favorecida debido a las distribuciones espectrales de las lámparas del colorímetro, ya que éstas tienen, a su vez una componente muy pobre en los colores azul-violeta y rojos, como se muestra a continuación, en una curva de distribución espectral tomada a dicha lámpara, a esto se le añade que, la pintura de TiO_2 es muy poco reflectiva en el violeta, por tanto, la información en total hacia estos valores de longitudes de onda será pobre. Además, la distribución espectral del

iluminante tipo LED no es muy uniforme a lo largo del espectro, lo cual no favorece la medición del color:

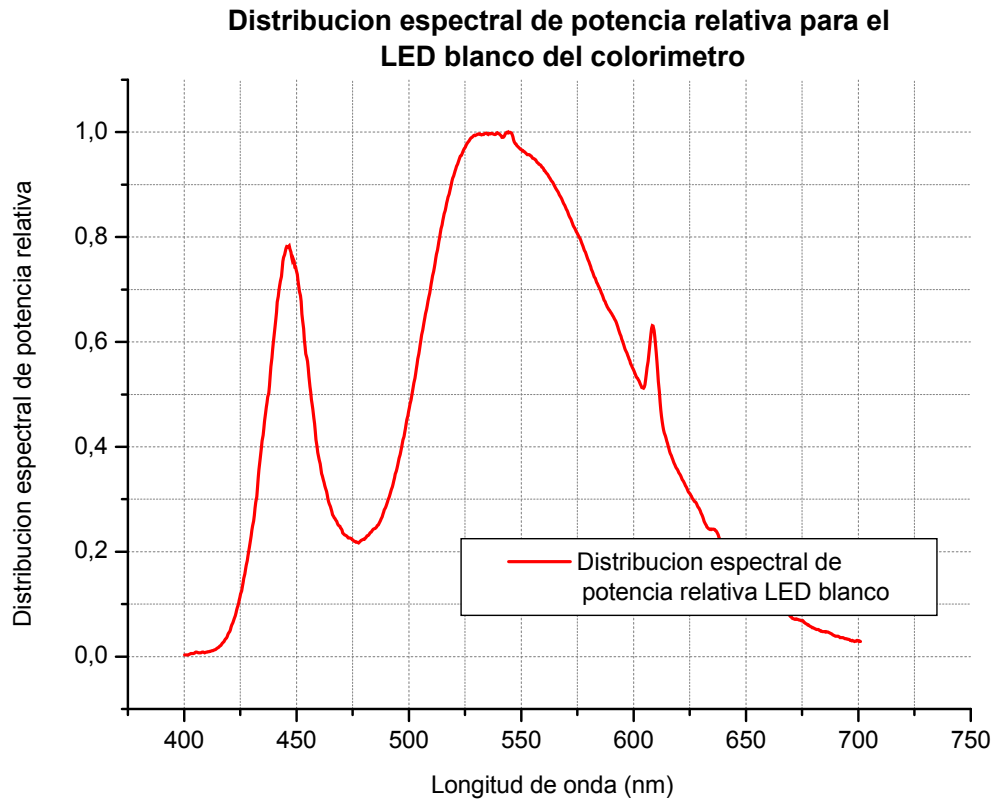


Figura 29. Distribución espectral de potencia relativa para el LED blanco del colorímetro.

Finalmente, para verificar el funcionamiento del conjunto como colorímetro triestímulo con cámara CCD-RGB, se realizó el procedimiento detallado en el capítulo 4.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL COLORÍMETRO PARA MEDICIÓN DE COLOR EN LÍNEA.

A continuación se presenta una propuesta de los elementos más críticos a mejorar en el colorímetro para medición de color en línea, identificados en el capítulo anterior:

3.2.1. RECUBRIMIENTO INTERNO.

Anteriormente se identificó que, el recubrimiento interno del colorímetro, una pintura hecha a base de TiO_2 , no era el más apropiado, y que se debía seguir la recomendación de la CIE: cubrir la capa interna del domo con BaSO_4 y por referencia tomar éste mismo material.

3.2.2. ILUMINACIÓN.

Se hace necesario realizar una optimización de la iluminación del sistema, ya que, anteriormente se detectó que las lámparas tipo LED empleadas tienen un espectro poco uniforme, no muy cercano a un iluminante tipo D65 o A que es lo recomendado por la CIE, además, se encontró que, sus componentes en las altas y bajas longitudes de onda es muy pobre; lo cual no permitiría realizar la caracterización de muestras con componentes hacia dichas partes del espectro visible.

Debido a esto, se hace una breve explicación de la fotometría y radiometría, las cuales son muy empleadas en especial en caracterización de fuentes de luz como lo que se realizó en el presente capítulo.

3.2.2.1. ILUMINACIÓN TIPO FLUORESCENTE.

Como primer sistema se propone uno basado en una lámpara fluorescente blanca, la cual, por su correspondiente caracterización tiene un espectro mucho más completo que el de un LED blanco.

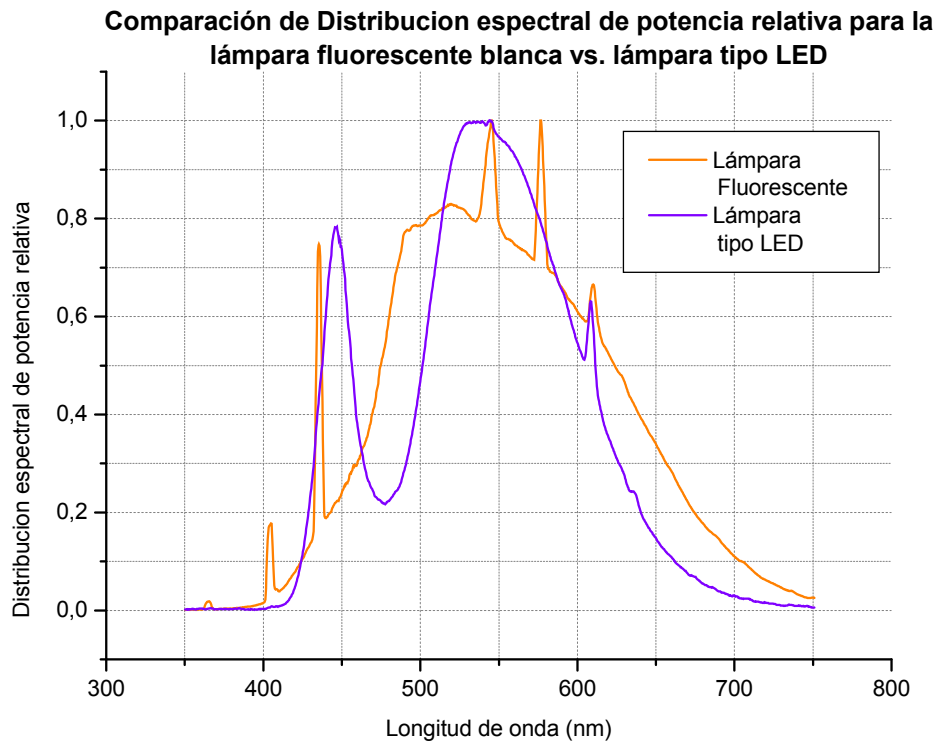


Figura 30. Comparación entre la distribución espectral de un LED blanco y una lámpara blanca tipo fluorescente

Las curvas presentadas anteriormente fueron obtenidas con el mismo montaje señalado en el capítulo II. Aquí se observa un comparativo entre la curva de distribución espectral relativa de una lámpara fluorescente vs. Las lámparas tipo LED blancas con las cuales se recibió originalmente el sistema, de ésta forma se muestra que la lámpara fluorescente tiene una distribución un poco más uniforme que la de un LED blanco, además, la información del espectro hacia el violeta y hacia el rojo es mejor para dicha lámpara que para la tipo LED.

3.2.2.2. ILUMINACIÓN TIPO LED, CARACTERIZACIÓN Y EMULACIÓN DE LÁMPARAS DE VARIADAS LONGITUDES DE ONDA.

Desde unos años atrás, con el desarrollo de los LEDs, se han detectado ciertas ventajas de éstos en comparación a las lámparas tipo fluorescentes, como su tiempo de vida (100.000 horas) y consumo de energía; además, el voltaje requerido por estas lámparas es pulsante (60Hz), produciéndose un parpadeo en la luz emitida lo cual resulta, para elementos como las cámaras CCD algo problemático, ya que dicho parpadeo, dependiendo del tiempo de exposición de la cámara, puede llegar a ser visible, ocasionándose en el caso del presente trabajo cambios en las mediciones de color. Debido a esto, la propuesta inicial de colocar lámparas tipo LED en el colorímetro construido no se deshecha, por lo cual, se realizó una búsqueda de LEDs de variados colores que, juntos traten de reconstruir el espectro visible de una lámpara blanca tipo D65 o cercano, esperándose así una mejoría en comparación a la distribución espectral de la lámpara tipo LED blanca.

Se recolectaron lámparas comunes tipo LED de 5mm de variados colores y que fueran de fácil adquisición, tanto en precio así como en disponibilidad de los mismos para que, en caso de fabricar una lámpara a base de varios LEDs fuera reproducible. Igualmente, se procuró que dichos LEDs fueran de la más alta intensidad posible, debido a que el domo fabricado es de un área grande por lo cual entre menor la intensidad de los LEDs se tendrían que colocar mayor cantidad en la lámpara propuesta al final.

Finalmente, los LEDs caracterizados fueron 6: violeta, azul, verde, amarillo, rojo y rojo intenso. Todos éstos LEDs fueron conseguidos de forma fácil en el mercado, excepto el LED violeta, del cual, se consigue, pero de menor intensidad, por lo que los LEDs violeta de alta intensidad tuvieron que ser importados. La caracterización de los LEDs mencionados se realizó de forma similar a la presentada anteriormente: por lámpara patrón se empleó la lámpara tipo fluorescente y por

esfera integradora, el domo construido, para dichos LEDs se tomaron curvas de distribución espectral relativa para conocer en qué parte del espectro visible harían su aporte para la construcción de la lámpara blanca.

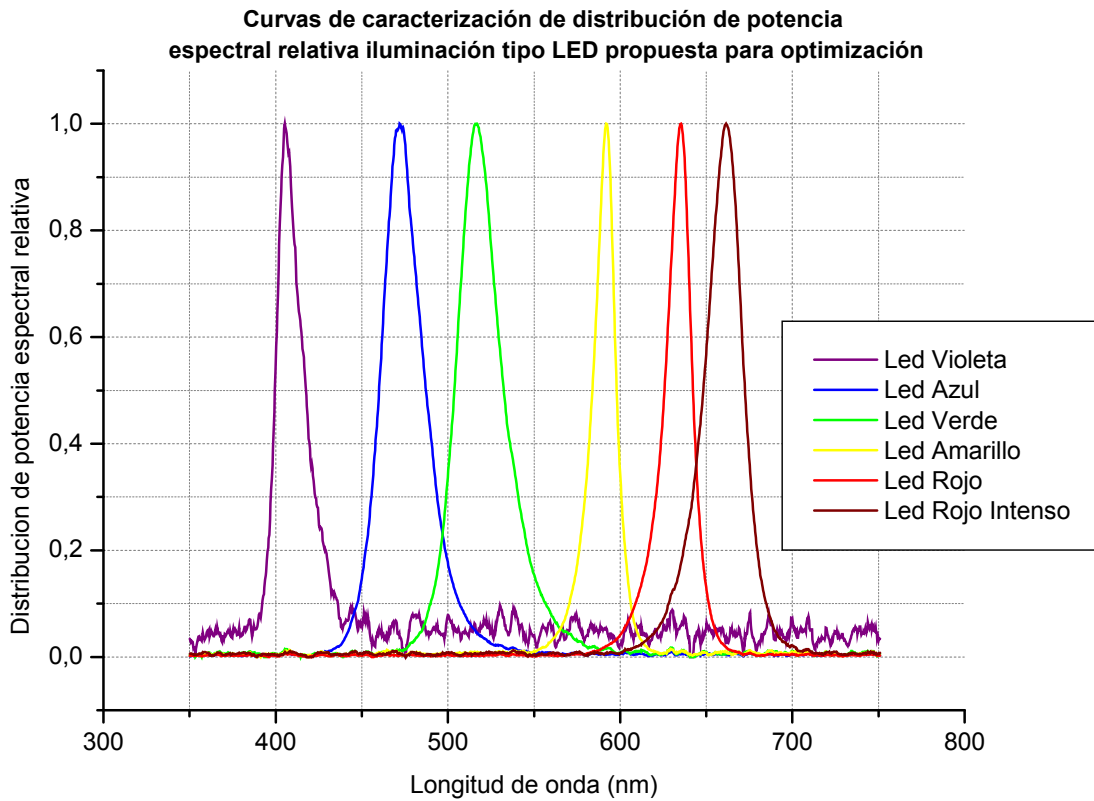


Figura 31. Curvas de caracterización de distribución espectral relativa para los LEDs propuestos para la optimización de la iluminación del colorímetro.

LED vs. Característica	Φ (mW)	λ pico (nm)	Ángulo de visión (grados)	$\Delta\lambda$ (nm)	λ pico experimental (nm)	$\Delta\lambda$ experimental (nm)	% error λ pico	% error $\Delta\lambda$
Violeta	1.3	405	25	10	405.3	17.5	0.1	74.9
Azul	8.5	465	10	26	472.1	26.9	1.5	3.5
Verde	4.8	520	10	35	516.8	27.9	0.6	20.4
Amarillo	1.9	591	10	15	592.0	13.8	0.2	8.1
Rojo	6.0	632	10	20	635.4	15.9	0.5	20.4
Rojo Intenso	1.3	660	40	20	661.4	24.0	0.2	20.0

Tabla 1. Características de los LEDs propuestos para la optimización:
experimentales y de acuerdo a hoja técnica.

Comparándose los datos tomados experimentalmente con los de las hojas técnicas, se nota cierta similitud y un alto error en el ancho espectral para el LED violeta, lo cual se puede relacionar con el hecho de que éstos LEDs fueron caracterizados en el domo pintado con TiO_2 (sobre una muestra de sulfato de Bario), para un análisis más profundo, se requiere conocer el equipo con el cual fueron caracterizados los LEDs por parte del fabricante, el cual se desconoce.

Para conocer el comportamiento de los LEDs caracterizados, combinados en el domo con la pintura de BaSO_4 , se tomaron varias combinaciones de los mismos, hasta lograr una que alcanzara el blanco aproximado a un iluminante D65, es decir a 6500°K, dicho comportamiento se logró simular por medio de TRACEPRO, un software de emulación de sistemas ópticos: desde lentes, pasando por cavidades para láser hasta lámparas que es el tema que compete a éste documento, entre otros.

Para la emulación de lámparas, dicho software permite hacerlo agregando su distribución espectral, angular, y potencia radiante, además es amable con modelos tipo CAD, por lo cual se logró emular el comportamiento de los LEDs en

el modelo tipo SOLIDEDGE del domo, el cual había sido diseñado en el software mencionado, igualmente, se incluyó la curva de reflectancia del recubrimiento de BaSO_4 , la cual fue aplicada en el modelo del domo.

Como resultados de emulación el software ofrece curvas de intensidad radiante, predicción del color en la curva tipo 2D x-y (valores x-y de color), entre otros. Dicho software permite, además, en qué escala de intensidad ajustar los LEDs, es decir, permite emular un control de intensidad, herramienta que facilitó lograr una lámpara similar al iluminante D65.

La lámpara emulada fue conformada por 3 pequeñas lámparas las cuales, a su vez contenían 6 de los LEDs mostrados anteriormente (cada una). Las lámparas fueron ubicadas en el mismo punto en el cual se encontraban las puestas en el diseño inicial. En un principio se emularían 5 lámparas, sin embargo, no fue posible debido a que TRACEPRO es un software que consume bastantes recursos para dichas tareas, en especial para trazar los rayos necesarios para éstas 5 lámparas (para un total de 30 LEDs).

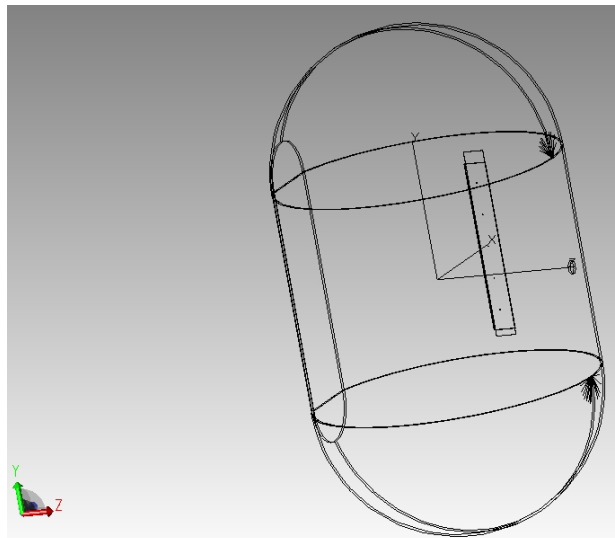


Figura 32. Detalle del domo completo con las lámparas a emular

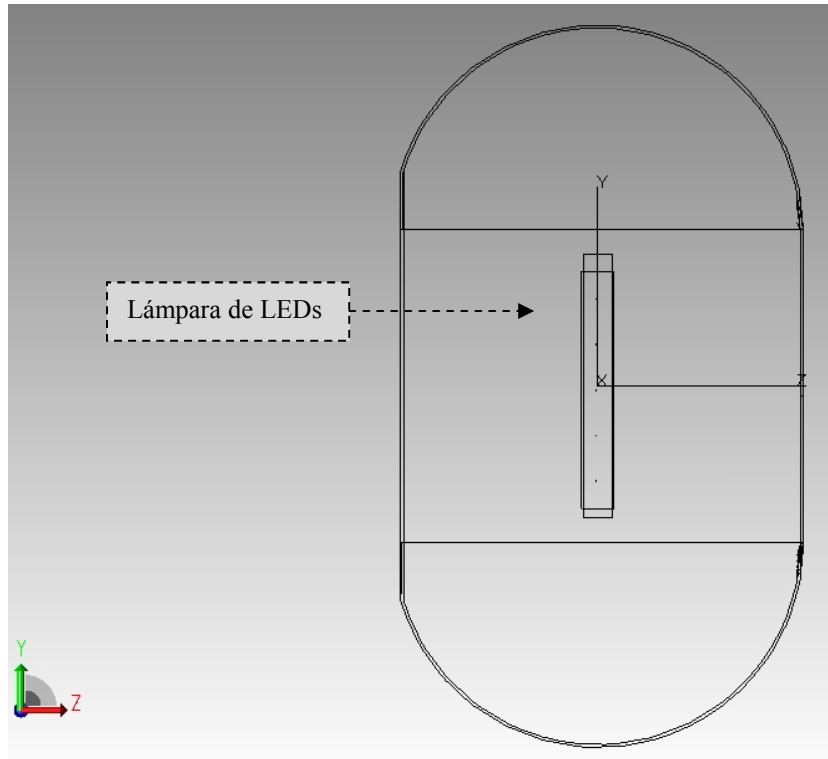


Figura 33. Detalle del domo a emular en TRACEPRO y de la lámpara.

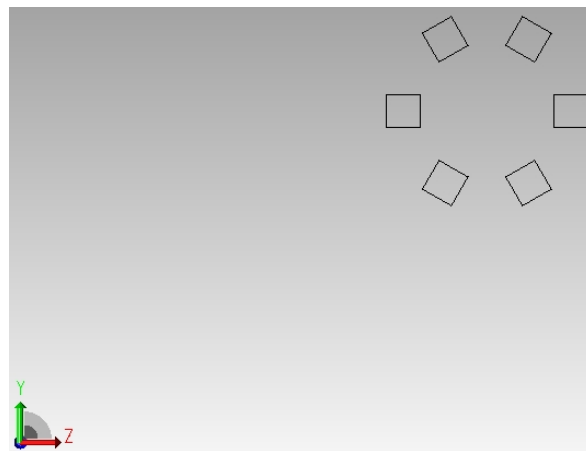


Figura 34. Detalle de una de las lámparas ubicadas en el domo

- **PREDICCIÓN DE COLOR.**

Tal como se mencionó, el software de emulación TRACEPRO permite realizar una predicción de color, bien sea de un grupo de lámparas iluminando cierta superficie, o de una sola lámpara. La superficie analizada fue aquella sobre la cual se

ubicarían las muestras de textiles en el colorímetro, en este caso, para la emulación se colocó una muestra de BaSO₄.

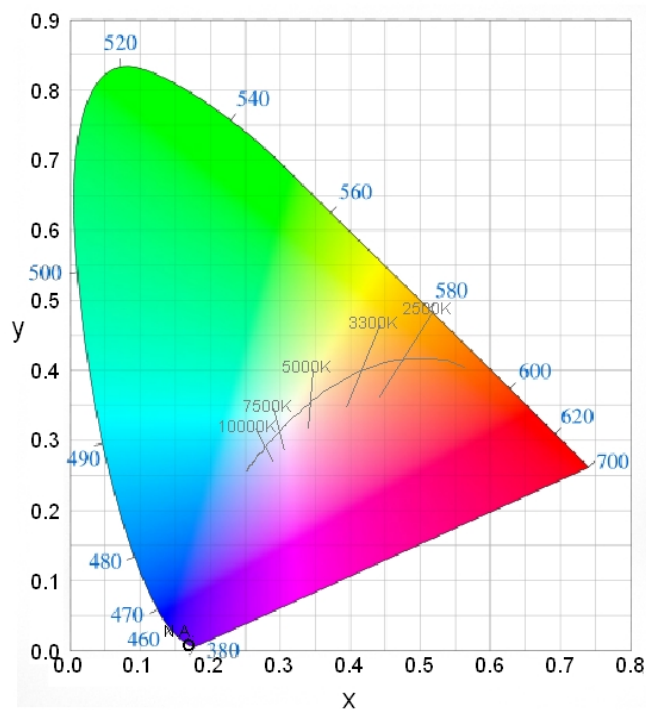


Figura 35. Curva x-y para el LED violeta

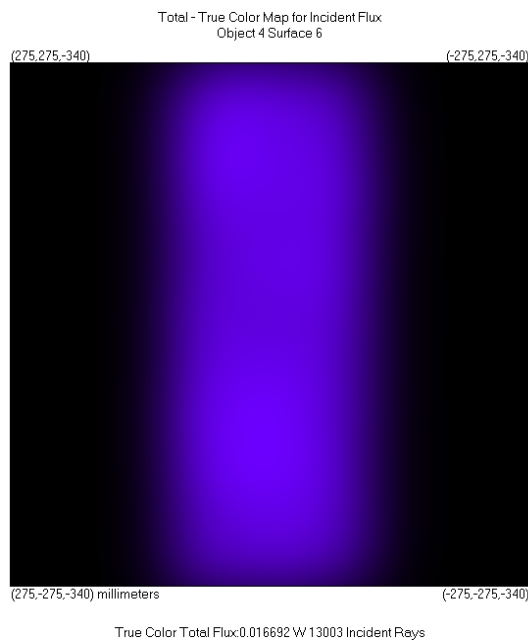


Figura 36. Emulación de iluminación tipo LED violeta sobre una muestra de BaSO₄.

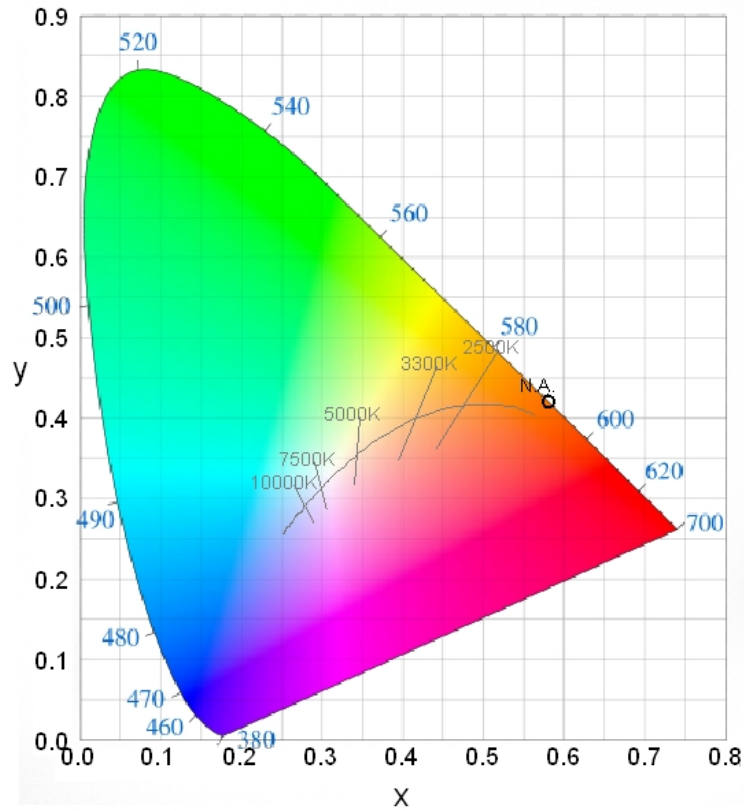


Figura 37. Curva x-y para el LED amarillo.

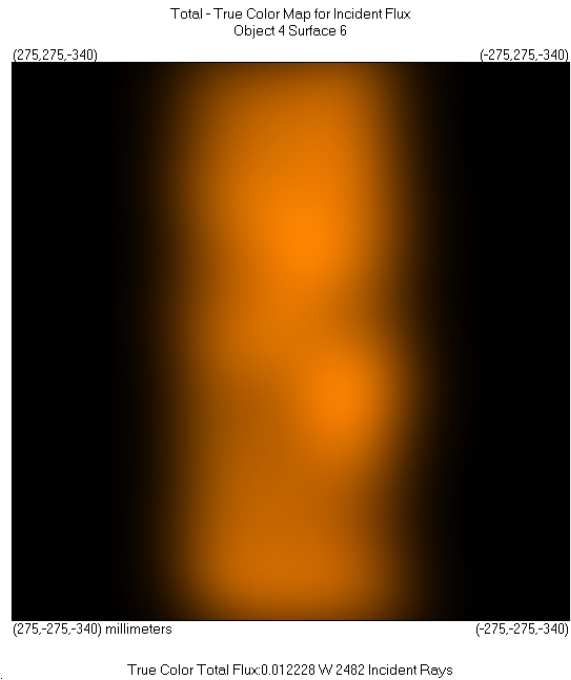


Figura 38. Emulación de iluminación tipo LED amarillo sobre una muestra de $BaSO_4$.

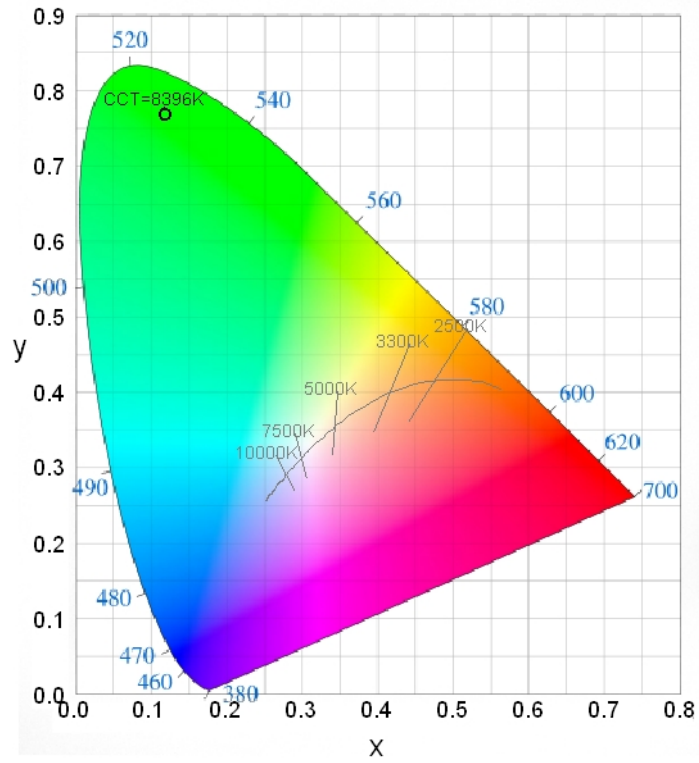


Figura 39. Curva x-y para el LED verde.

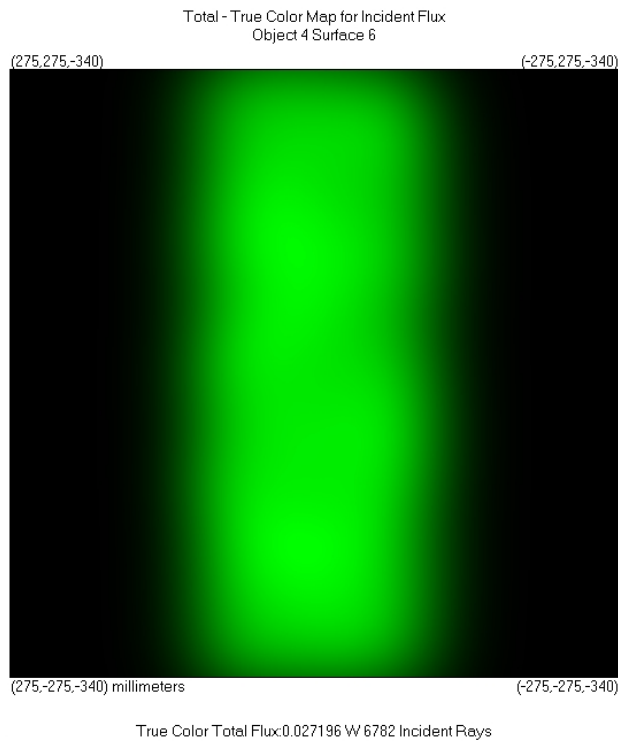


Figura 40. Emulación de iluminación tipo LED verde sobre una muestra de BaSO_4 .

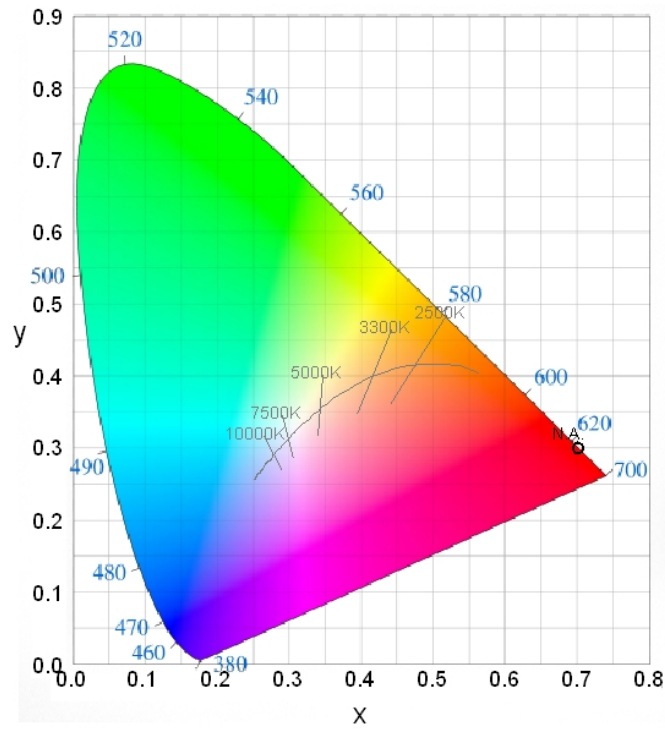


Figura 41. Curva x-y para el LED rojo.

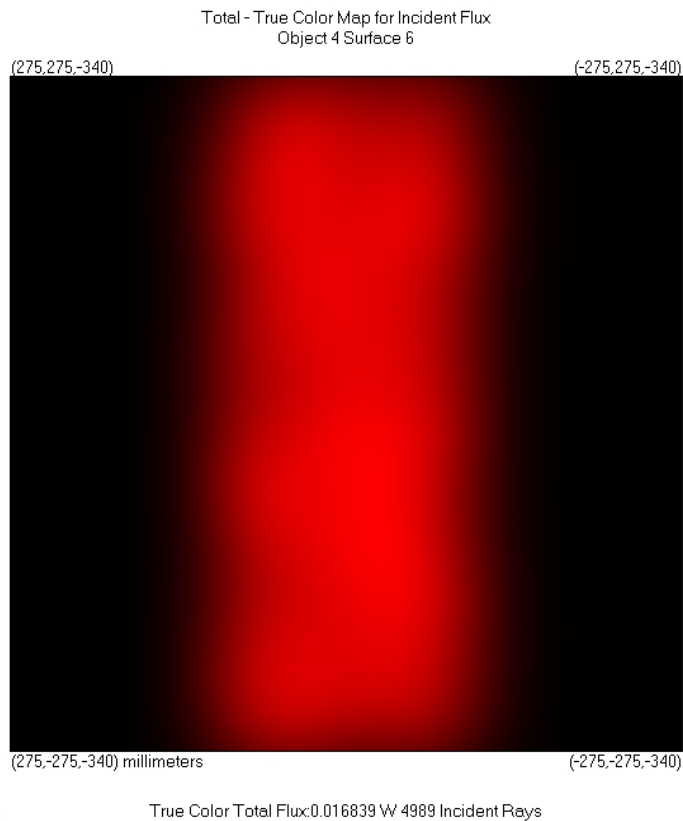


Figura 42. Emulación de iluminación tipo LED rojo sobre una muestra de BaSO_4 .

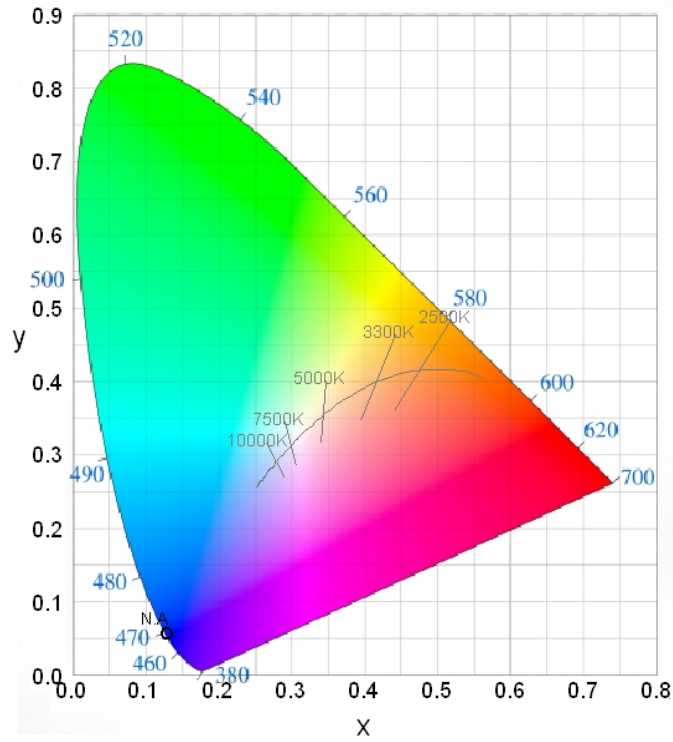


Figura 43. Curva x-y para el LED azul.

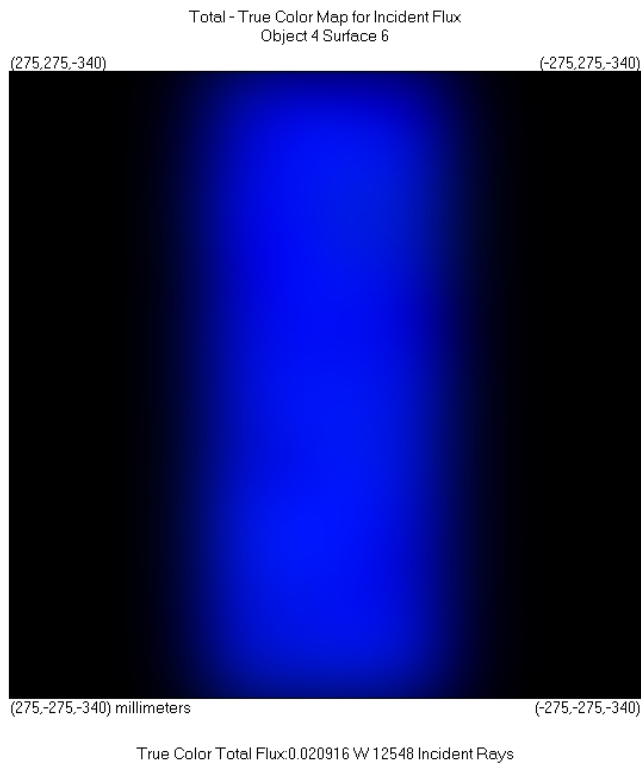


Figura 44. Emulación de iluminación tipo LED azul sobre una muestra de BaSO₄.

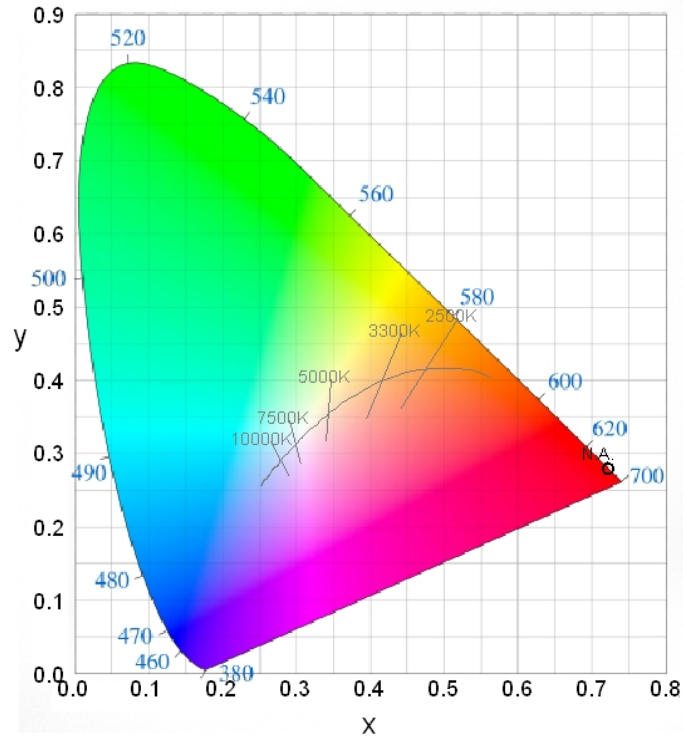


Figura 45. Curva x-y para el LED rojo intenso.

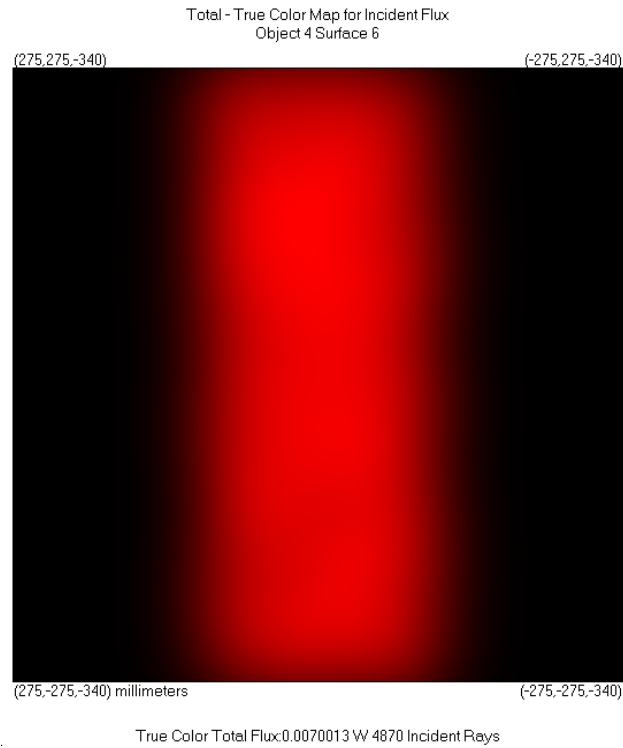


Figura 46. Emulación de iluminación tipo LED rojo intenso sobre una muestra de BaSO_4 .

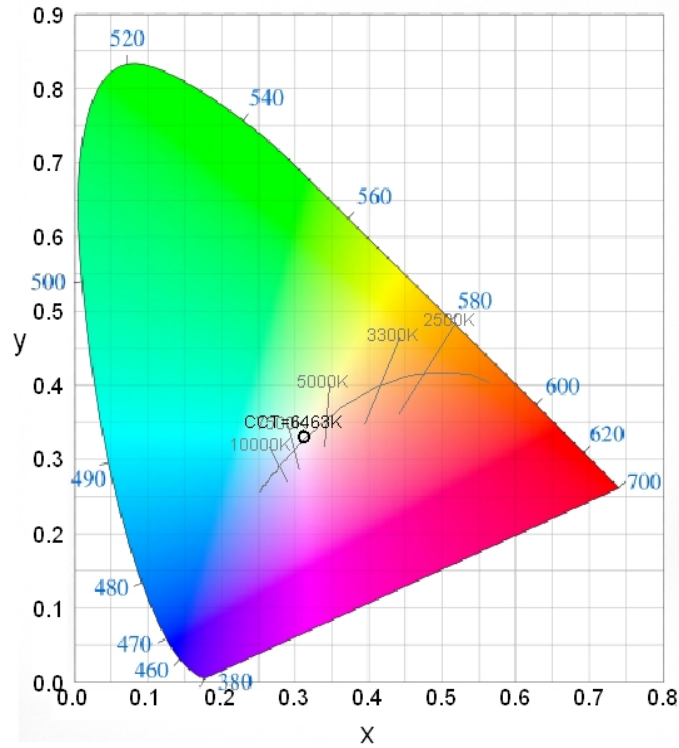


Figura 47. Curva x-y para la combinación de todos los LEDs.

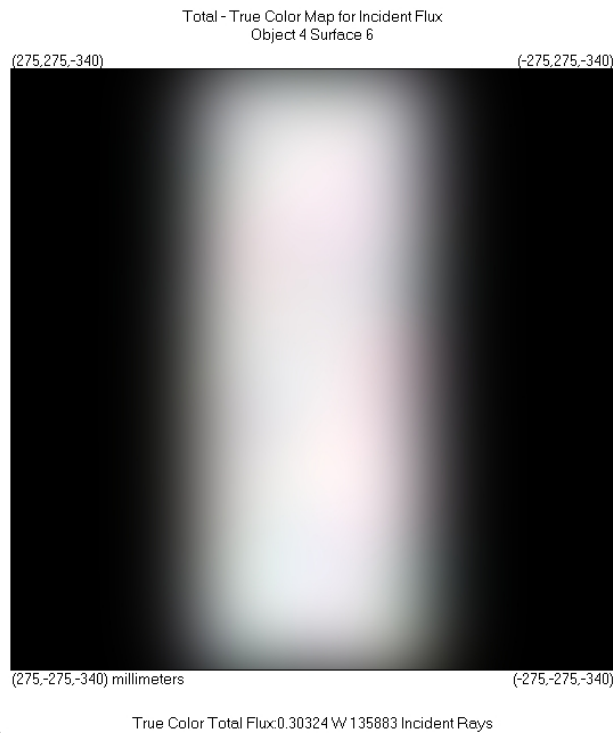


Figura 48. Emulación de combinación de todos los LEDs sobre una muestra de $BaSO_4$ (3 LÁMPARAS JUNTAS CON TODOS LOS LEDs).

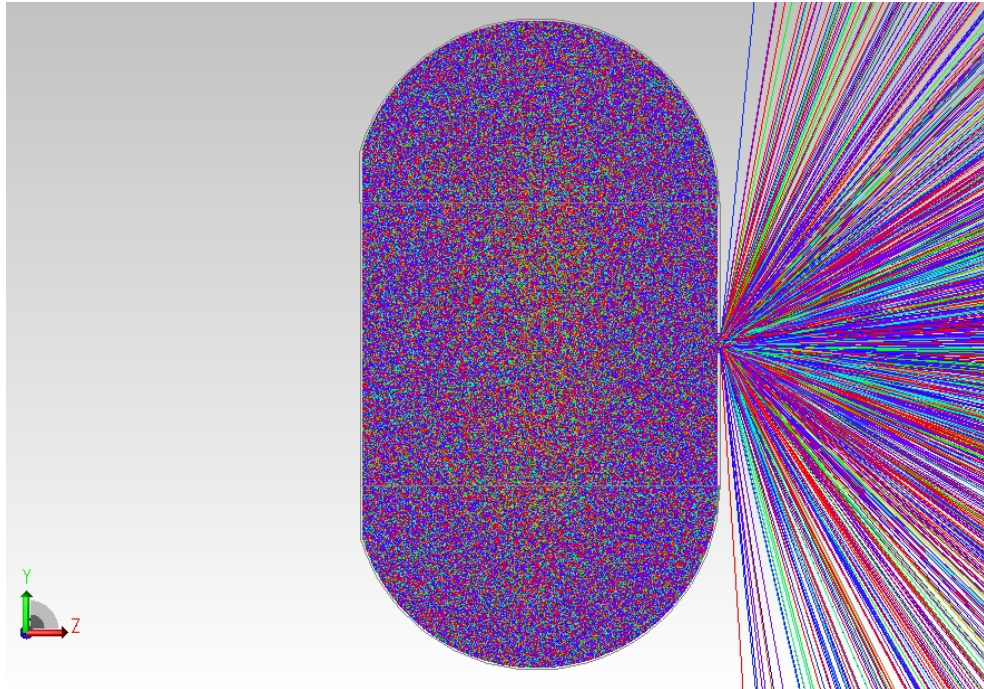


Figura 49. Trazado de rayos para todos los LEDs.

De las curvas anteriores, para los LEDs violeta, azul, amarillo, rojo y rojo intenso, en las curvas x-y TracePro grafica un punto como N.A. sobre la línea de longitudes de onda lo cual indica que, son fuentes de luz con un ancho espectral pequeño, mientras que para el LED verde se grafica un punto en la región del área de la curva con una temperatura de 8396°K, éste LED a diferencia del resto tiene un ancho espectral mayor: 35nm, (para los demás es de 20nm aproximadamente); siendo para TracePro más predominante la longitud de onda pico de aquellos LEDs con ancho espectral pequeño, por lo cual los ubica sobre la curva de longitudes de onda más no dentro del área de la curva. Igualmente, a partir de la ley de Planck, se tiene una temperatura correlacionada a cada radiador (en este caso los LEDs), dicha temperatura corresponde a una distribución espectral asociada, es decir a la integración de la función de Planck (Ley Stefan-Boltzmann) alrededor de un λ_1 y un λ_2 , lo cual no aplica (N.A. para TracePro) para aquellos LEDs con anchos espectrales pequeños, ya que dicha integración de la función de Planck sería cero (para TracePro).

La información del color predicho por TracePro corresponde a los rayos que inciden sobre la muestra, en este caso sobre una muestra de pintura de BaSO₄, es por esto que, en las imágenes de emulación del color de cada lámpara se menciona: “True Color map for incident flux”.

Al evaluar la curva final, la resultante de los LEDs combinados, se observa que se logró llegar a una lámpara similar al iluminante D65, con T=6463°K, además, el color predicho por TracePro es un color blanco bastante uniforme.

La combinación adecuada de LEDs para llegar a ésta lámpara cercana al iluminante D65 se logró intentando colocar la escala ó intensidad de cada uno de los LEDs similar al iluminante D65, retomando la figura 18, del capítulo II, se observa que, en su mayoría, el iluminante D65 tiene una alta potencia espectral relativa hacia los 450nm, es decir, hacia el azul, y se mantiene un poco hacia el verde; disminuyéndose mucho más hacia el rojo y hacia el violeta; lo cual también se observa en las curvas anteriores, en las cuales, la lámparas con mayor potencia radiante fueron los LEDs verde y azul, mientras que la de menor fue el rojo intenso, comportamiento similar a la distribución del iluminante D65. Dichas potencias radiantes se pueden observar en la parte inferior de las imágenes que muestra TracePro del posible color de la lámpara evaluada, por ejemplo, para el LED verde, dicha potencia radiante es de 27.2mW.

La imagen que representa el trazado de los rayos para todos los LEDs fue graficada de forma tal que, cada rayo correspondiera a un color aproximado de la longitud de onda trazada. Un trazado de rayos para un LED de color verde por ejemplo se vería como se muestra a continuación:

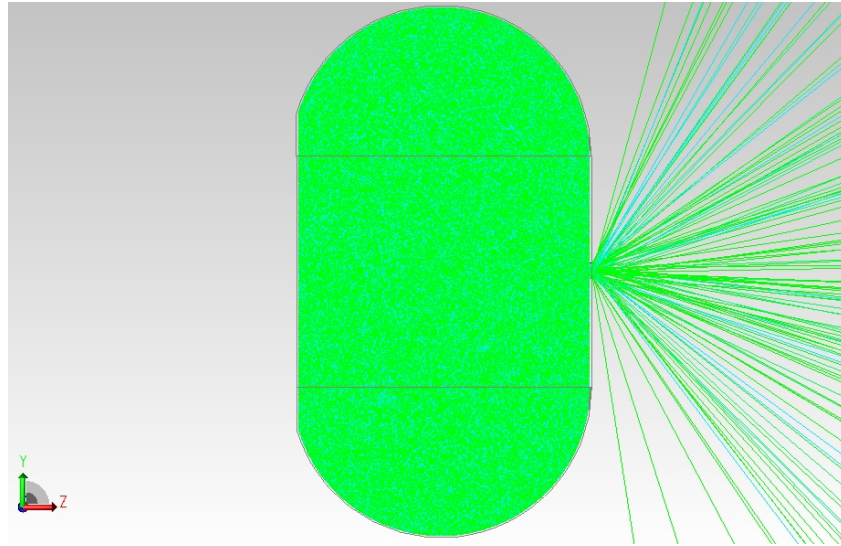


Figura 50. Trazado de rayos para el LED verde.

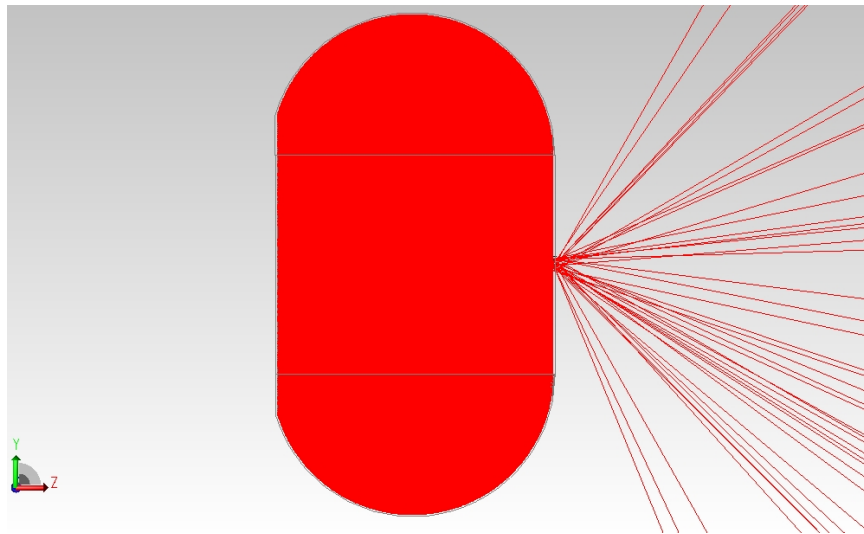


Figura 51. Trazado de rayos para el LED rojo.

- **DISTRIBUCIÓN ANGULAR DE LOS LEDs, POTENCIA RADIANTE E INTENSIDAD RADIANTE DE SALIDA DE LA MUESTRA.**

TracePro permite analizar a través de la herramienta de emulación la potencia de salida de la muestra vs. La de salida de la fuente, en este caso de los LEDs, en la siguiente tabla se muestran los datos de salida de cada LED, y de salida de la muestra:

LED	Potencia Radiante de salida de LEDs (mW)	Potencia radiante de salida de la muestra (mW)
Violeta	1.3	17.0
Azul	1.9	21.5
Verde	9.6	26.8
Amarillo	4.18	12.1
Rojo	6.00	17.0
Rojo Intenso	2.6	7.0

Tabla 2. Potencia radiante de salida de los LEDs y de salida de la muestra.

Se observa que, la potencia radiante de salida de la muestra crece considerablemente en comparación a la potencia radiante de salida para el LED, lo cual encuentra explicación en el efecto del domo en conjunto con la pintura de alta reflectancia, más específicamente, en el análisis del comportamiento de las reflexiones en una esfera de Ullbricht, para lo cual se puede revisar el capítulo II, de donde se mencionó que, si se tiene una fuente de luz de Φ lumens en una esfera integradora, debido a las varias reflexiones ocasionadas por la geometría de la esfera, en conjunto con la pintura, que sería similar a un difusor ideal perfecto, el flujo total entonces sería el producto del factor de la esfera integradora por el flujo de la fuente de luz; por tanto, el aumento del flujo de salida de la muestra en comparación al flujo del LED se ve explicado en el efecto de la pintura y de la geometría del domo, los cuales ocasionaron repetidas reflexiones. Sin embargo, ésta se puede considerar una aproximación, ya que no se está trabajando con una esfera integradora, sino con un domo cilíndrico de tapas esféricas.

Realizando un análisis más profundo de dicho producto (del flujo del LED por el factor de la esfera integradora), se observa que, no se obtuvieron los resultados esperados, lo cual puede ser debido a la geometría del domo, que, si bien tiene cierta similitud con una esfera integradora, el efecto, al parecer tiene variantes: el factor de la esfera integradora fue calculado de acuerdo a la ecuación (19):

LED	Reflectancia a la longitud de onda pico del LED	Factor de la Esfera Integradora	Potencia esperada (mW)	Potencia real (mW)
Violeta	0.990	103.38	134.40	17.0
Azul	0.997	380.68	723.29	21.5
Verde	0.985	64.02	614.59	26.8
Amarillo	0.986	70.63	295.25	12.1
Rojo	0.987	73.07	438.44	17.0
Rojo intenso	0.987	76.52	198.95	7.0

Tabla 3. Comparación de potencias radiantes obtenidas vs. Esperadas para una muestra de sulfato de Bario evaluada en el domo.

LED	Intensidad radiante de salida del LED (mW/sterradian)	Intensidad radiante de salida de la muestra (mW/sterradian)	Ángulo de visión (grados)
Violeta	2,18	5,9	25
Azul	20,3	7,85	10
Verde	100,6	10,1	10
Amarillo	39,1	4,8	10
Rojo	63,9	6,9	10
Rojo intenso	1,93	2,56	40

Tabla 4. Comparación de Intensidades radiantes de los LEDs vs. Intensidades radiantes obtenidas para la muestra.

Dicho cambio se ve explicado en el hecho de que la intensidad radiante de salida de la muestra se ve afectada por la pintura de alta reflectancia, (ya que la muestra se encuentra recubierta con BaSO₄ también) debido a su efecto difusor, y a que la muestra no se encuentra iluminada directamente por los LEDs sino por todos los rayos provenientes de las múltiples reflexiones difusas que ocurren en las paredes del domo, al observarse las intensidades de los LEDs de 10 grados se nota que la intensidad radiante de salida de la muestra decrece considerablemente con respecto a la proveniente del LED, mientras que para los LEDs de ángulos de 25° y 40° dicha intensidad aumenta; lo cual se debe al efecto difusor de la pintura de

BaSO₄. Dicho efecto se observa en las curvas de distribución polar de Intensidad Radiante de los LEDs:

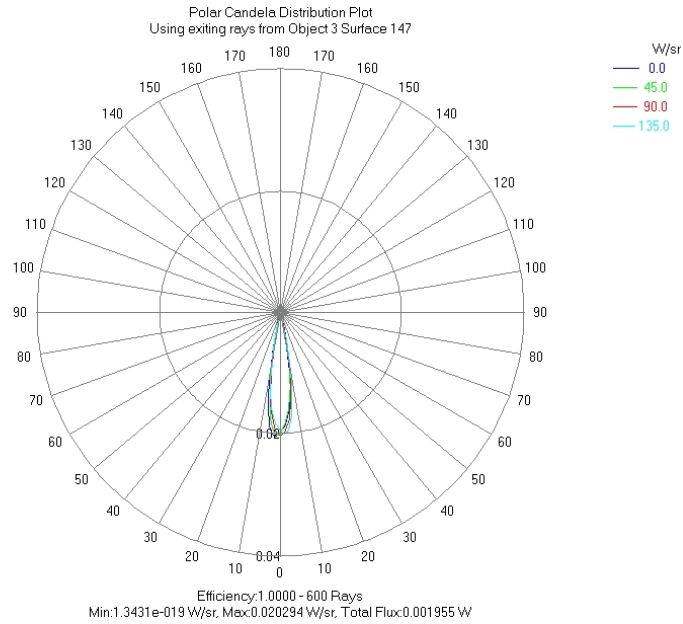


Figura 52. Curva de Intensidad radiante de un LED azul.

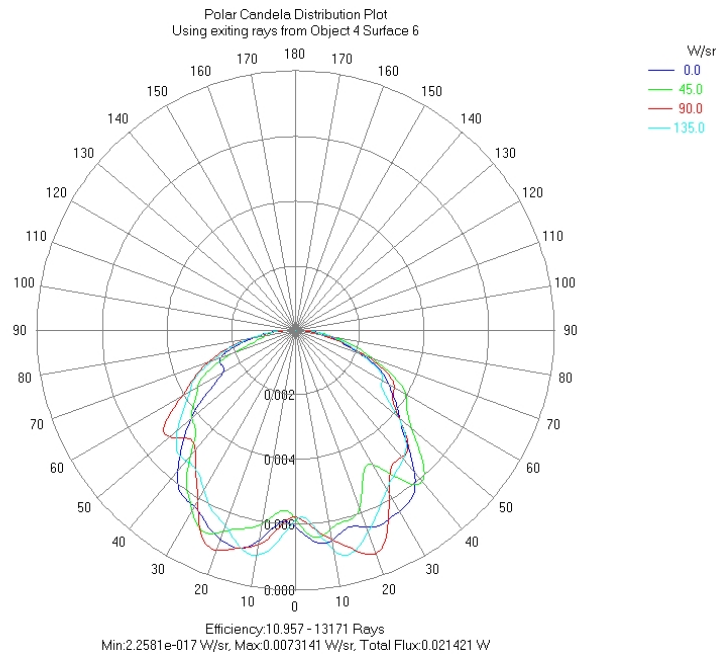


Figura 53. Curva de Intensidad radiante de la muestra en el domo, iluminada por un LED azul.

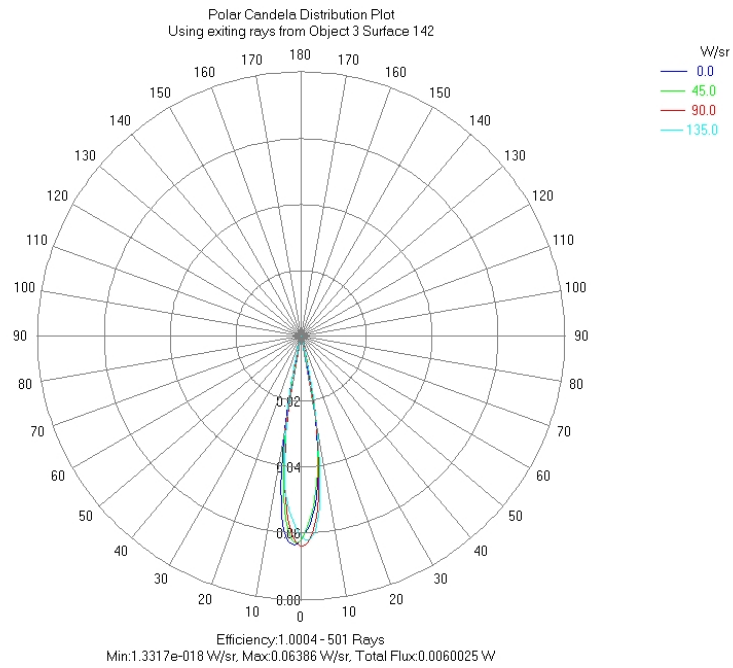


Figura 54. Curva de Intensidad radiante de un LED rojo.

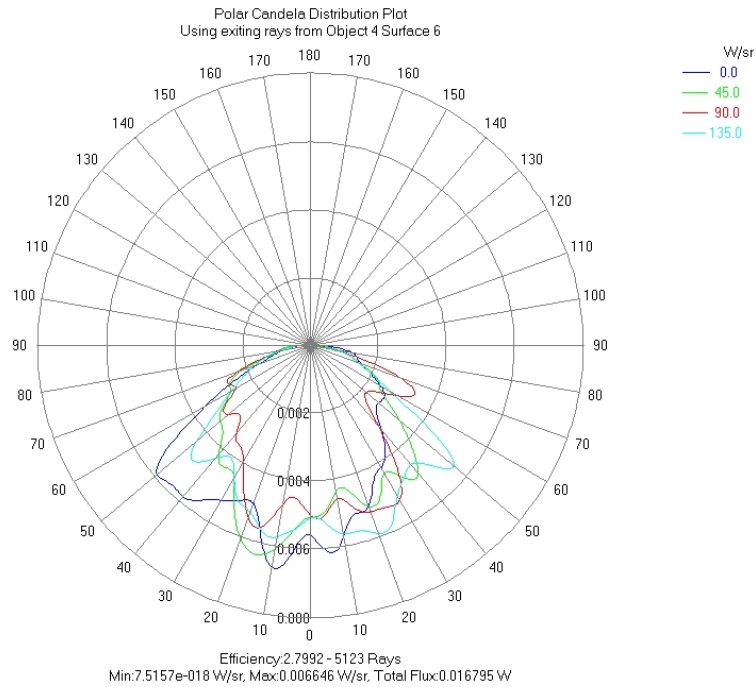


Figura 55. Curva de Intensidad radiante de la muestra en el domo, iluminada por un LED rojo.

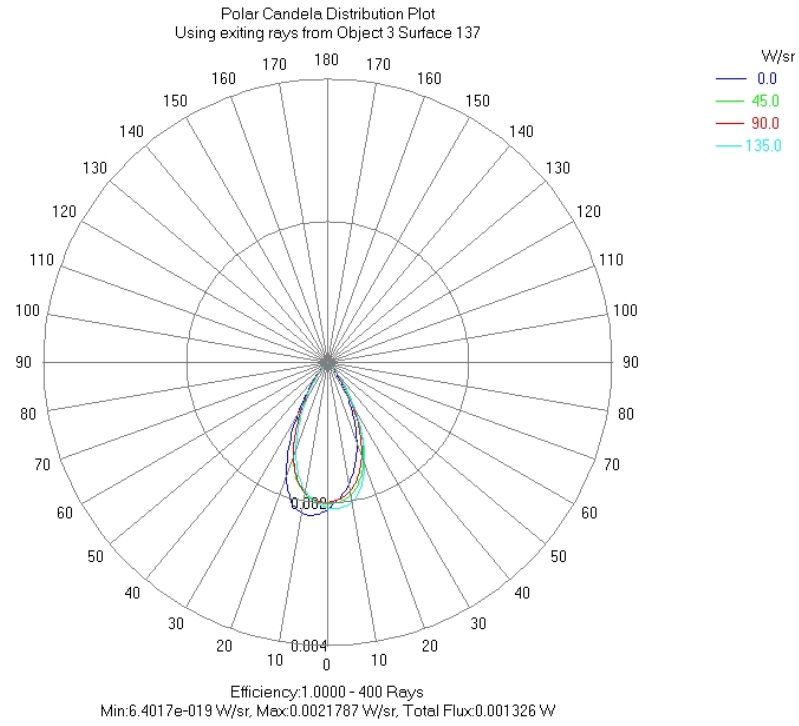


Figura 56. Curva de Intensidad radiante de un LED violeta.

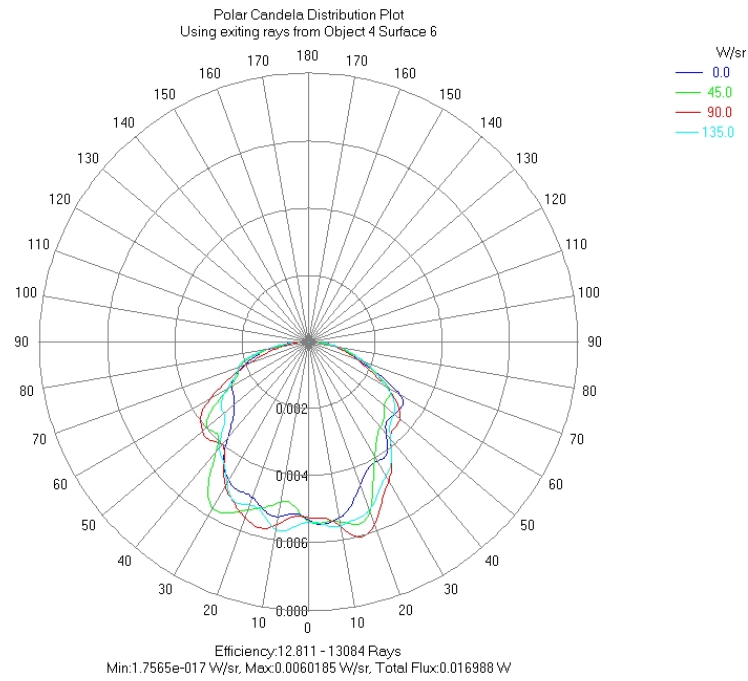


Figura 57. Curva de Intensidad radiante de la muestra en el domo, iluminada por un LED violeta.

El efecto difusor de la pintura se hace mucho más visible al evaluar la misma curva de intensidad radiante para todos los LEDs de la lámpara encendidos:

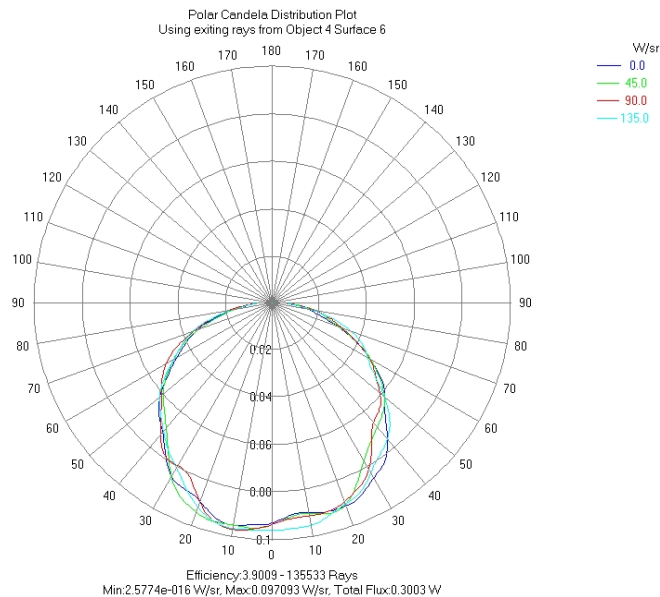


Figura 58. Curva de Intensidad radiante de la muestra en el domo, iluminada por la lámpara blanca compuesta por todos los LEDs caracterizados.

Analizando las curvas de intensidad radiante de salida de la muestra en el domo, se confirma que éstas presentan un comportamiento similar al de aquellas mostradas en el capítulo 2 para las curvas de *cuerpos difusores mate ó difusores reales*, lo cual verifica el comportamiento difusor de la pintura.

Las curvas de intensidad radiante corresponden, cada una a determinados ángulos horizontales como verticales, los horizontales se identifican porque son graficados en el eje polar correspondiente al ángulo (ángulos negativos en sentido de las manecillas del reloj, y positivos en sentido contrario), mientras que, a cada curva le es asignado un ángulo vertical, los cuales en la curva son identificados por su diferencia en color, éstos dependiendo del análisis requerido en TRACEPRO pueden ser varios o sólo uno, en éste caso se escogieron unos cuantos representativos: 0°, 45°, 90° y 135°, Los ángulos verticales son empleados en especial para aquellas fuentes de luz o superficies que no son simétricas, para

éste caso, si bien se consideran los LEDs como superficie simétrica, la superficie de sulfato de Bario podría ser asimétrica debido a sus dimensiones, y a que los rayos provenientes de las paredes del domo no vienen de distancias simétricas, es decir, la distancia de tapa a tapa esférica no es la misma que de lado a lado en el cuerpo cilíndrico, sin embargo, se nota cierta tendencia en el comportamiento a fuente simétrica; existe cierta variación de éste comportamiento, el cual puede atribuirse además a la asimetría de la muestra, al hecho de que el domo no tiene deflectores; más comúnmente conocidos como *baffles*, los cuales, en el caso de los espectrofotómetros evitan que la luz llegue de forma directa hacia la muestra o hacia el detector. Para observar en detalle la ubicación de los deflectores, se puede revisar el esquema de un espectrofotómetro detallado anteriormente, el cual sólo incluye un deflector para que la luz no llegue directamente hacia la muestra, otros incluyen dos: uno para la muestra, otro para el detector.

En este caso, los ángulos verticales fueron tomados de acuerdo al eje normal a la muestra, es decir al eje z, y los horizontales con respecto al eje paralelo a la misma, es decir al eje y.

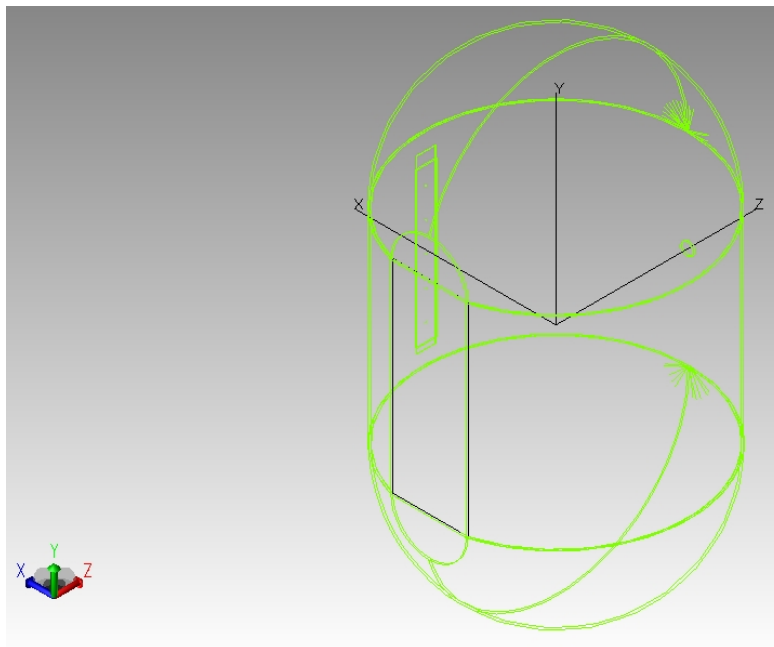


Figura 59. Vista detallada del domo (superficie verde), muestra analizada (superficie negra), ángulos horizontal (y) y vertical (z)

CAPÍTULO IV.

CARACTERIZACIÓN DE CÁMARAS: CONVERSION DE VALORES RGB A CIE-L*a*b*.

Se entiende como caracterización de un dispositivo de imágenes, (como cámara, impresora o scanner) a aquel mapeo o relación entre las coordenadas RGB, ó CMYK entregadas por el dispositivo, y sus correspondientes coordenadas en un modelo de color independiente del mismo como lo es el CIE XYZ. Existen varios métodos para dicha caracterización, entre éstos se encuentran modelos físicos, look-up tables y métodos numéricos. Los modelos físicos se basan en propiedades del dispositivo, tales como absorbanancia, scattering y reflectancia de los colorantes, el modelo Kubelka-Munk es un ejemplo de ello, usado en la caracterización de impresoras; similarmente el modelo GOG (gain-offset-gamma) es un modelo físico de computador o display basado en un tubo de rayos catódicos que puede ser empleado para la caracterización de la mayoría de monitores. Las Look-up tables definen un mapeado entre las coordenadas del espacio de color manejado por el dispositivo y un espacio de color CIE, los valores intermedios son interpolados. Dentro de los métodos numéricos, una serie de coeficientes es determinada, usualmente basada en un set de muestras medidas; dichos coeficientes permiten la conversión de valores del espacio de color del dispositivo, a las coordenadas CIE; entre estos métodos se encuentran: transformaciones lineales, no lineales o polinomiales y, redes neuronales.

Para muchos dispositivos, el proceso de caracterización consiste en dos etapas: la primera se encarga de linealizar los valores obtenidos del dispositivo, la segunda transforma los valores linealizados a valores triestímulo CIE XYZ.

4.1. CARACTERIZACION DE CÁMARAS.

Para dispositivos tales como cámaras y scanners es importante aclarar que una caracterización es efectiva si el dispositivo no hace balance automático de blancos. El balance automático de blancos es donde los valores RGB de cada pixel en la imagen capturada son transformados de forma tal que el pixel para la muestra más clara en la imagen sea denotado como blanco con valores $R=G=B=255$ ó 1. El método más eficiente para la caracterización de una cámara digital o scanner es por medio de una carta con un set de colores de valores triestímulo conocidos; éstas cartas por lo general incluyen muestras de colores neutrales (grises) que pueden ser usados para linealizar las salidas RGB de la cámara y muestras de color que pueden ser usadas para generar una transformación de los valores RGB linealizados a los valores CIE XYZ.

Varios estándares se han establecido para la definición de dichas tarjetas, las más empleadas son la tarjeta ColorChecker Macbeth (la cual contiene 24 muestras) y la tarjeta DC ColorChecker Macbeth (la cual contiene 200 muestras).

4.2. CORRECCIÓN DE NO-LINEALIDADES.

A pesar de que la respuesta de un sensor CCD es aproximadamente lineal a la intensidad que llega sobre éste, es poco probable que las salidas RGB de una cámara o scanner sean lineales a sus correspondientes valores triestímulo XYZ. Los valores en bruto de cada canal son procesados invariablemente por software on-board de forma tal que se generen respuestas RGB que se acerquen más a las funciones de igualación del color. Típicamente los valores en bruto RGB pueden ser transformados por una matriz lineal de 3×3 para obtener los valores de salida RGB de la cámara o scanner. Debido a esto, es común considerar una corrección de la no-linealidad, como primera etapa del proceso de caracterización de una cámara o scanner [11]:

Para una cámara digital se considera la ecuación:

$$C_c = (C'_c)^p \quad (21)$$

Donde C'_c es la respuesta en bruto de un canal c de la cámara, p es un exponente para el canal y C_c es la respuesta transformada de la cámara para dicho canal que es lineal a la entrada del mismo. Un conjunto de muestras de escala de grises es usualmente usado para determinar experimentalmente el exponente p . Así, las respuestas en bruto de la cámara son determinadas para un rango de muestras de gris bajo una fuente de luz conocida constante. Los valores XYZ pueden ser fácilmente calculados para las muestras de gris y la linealización se logra encontrando el valor del exponente p de forma tal que exista una relación lineal entre C_c y el valor Y para las muestras de gris.

Sin embargo, para determinar de forma correcta p se necesita conocer los valores de C'_c y C_c para cada una de las muestras de gris. El valor C'_c es la entrada del canal y el valor C_c es la respuesta del canal siguiendo procesamiento no lineal. La entrada del canal puede ser calculada si se conocen la reflectancia espectral de la muestra, la potencia espectral de la iluminación y la sensibilidad del canal. Desafortunadamente, es usual que la sensibilidad del canal no sea conocida. Si p se determina de forma tal que exista una relación lineal entre C_c y Y, entonces es claro que la función de igualación de color Y o la sensibilidad fotópica está siendo usada como una estimación aproximada de la sensibilidad del canal. Para las muestras de gris iluminadas bajo una misma fuente de luz, C'_c y Y están relacionadas linealmente de forma aproximada, pero esta proporcionalidad decrece al crecer las coordenadas cromáticas de las muestras y las fuentes de luz. [11]

4.3. TRANSFORMACIONES RGB-XYZ.

Si existe una relación lineal entre los canales de salida del dispositivo y los valores triestímulo, entonces, es posible determinar una transformación al espacio XYZ con al menos 3 muestras conocidas. Entonces, si se representan los n valores XYZ conocidos por una matriz T de $3 \times n$ y los n valores RGB con una matriz C de $3 \times n$, se tiene entonces

$$T = AC \quad (22)$$

Donde A es una matriz de 3×3 componentes. Si se tienen 3 muestras adecuadas, entonces el sistema lineal se determina. Igualmente, más muestras pueden ser usadas para sobre-determinar el sistema, pero son estrictamente necesarias sólo si la transformación lineal no existe entre los dos espacios de color. En ésta situación es preferible usar una transformación no lineal, sin embargo, sigue siendo necesario el proceso de linealización.

Un ejemplo de transformación no lineal puede ser:

$$\begin{aligned} X &= a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B + a_{14}R^2 + a_{15}G^2 + a_{16}B^2 + a_{17}RGB + a_{18} \\ Y &= a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B + a_{24}R^2 + a_{25}G^2 + a_{26}B^2 + a_{27}RGB + a_{28} \\ Z &= a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B + a_{34}R^2 + a_{35}G^2 + a_{36}B^2 + a_{37}RGB + a_{38} \end{aligned} \quad (23)$$

Donde en este caso, un total de 24 coeficientes son necesarios para definir la matriz A , en notación matricial podemos decir que:

$$T = AD \quad (24)$$

Donde la matriz A esta conformada por 3x8 coeficientes: $a_{11} - a_{38}$. La matriz D esta conformada por 8xn componentes de los canales RGB de la cámara (en el caso de la ecuación anterior son $R, G, B, R^2, G^2, B^2, RGB$).

La matriz A se calcula por medio de su pseudoinversa, así:

$$A = D^+T \quad (25)$$

Así también, existen diversas transformaciones polinomiales, como las generadas por Cheung y Westland (2004):

mx3	Matriz RGB (Matriz D)
3x3	$[R \ G \ B]$
5x3	$[R \ G \ B \ RG \ RB \ GB]$
10x3	$[R \ G \ B \ RG \ RB \ GB \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ 1]$
19x3	$[R \ G \ B \ RG \ RB \ GB \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ RGB \ R^2G \ G^2B \ B^2R \ R^2B \ G^2R \ B^2G \ R^3 \ G^3 \ B^3]$

Tabla 5. Modelos varios de transformaciones polinomiales según Cheung y Westland (2004).[11]

4.3.1. CARACTERIZACION DE LA CÁMARA INDUSTRIAL DEL COLORÍMETRO PARA MEDICIÓN DE COLOR EN TEXTILES.

En capítulos anteriores, se mencionó que la cámara empleada en el colorímetro consistía en una cámara de la marca COGNEX, conocida mundialmente para aplicaciones de visión artificial en la industria, consisten en sistemas embebidos, más detalladamente en DSP's con la robustez necesaria para el ambiente

industrial y con aplicaciones de software amigables para el requerimiento necesario; entre éstos se encuentran: lectura de texto ó código de barras y 2D, detección de objetos por medio de determinadas características: contraste, luminosidad, patrones, color; entre otros. Dichas cámaras entregan color en el sistema RGB ó CIE L*a*b*; para aplicaciones de color tienen herramientas especiales de balance de blancos y de cierto tipo de linealización llamado *calibración de reflectancias*.

La cámara empleada fue una de la familia DVT a color, una de las primeras familias de cámaras adquiridas por la compañía COGNEX a la compañía del mismo nombre: DVT; además de ésta familia, COGNEX tiene otros tipos de familias: INSIGHT, CHECKER, DATAMAN, entre otros. Actualmente las cámaras DVT se encuentran fuera de circulación; sin embargo han servido de base para el mejoramiento de los modelos actuales. La curva de sensibilidad de la cámara empleada se muestra a continuación:

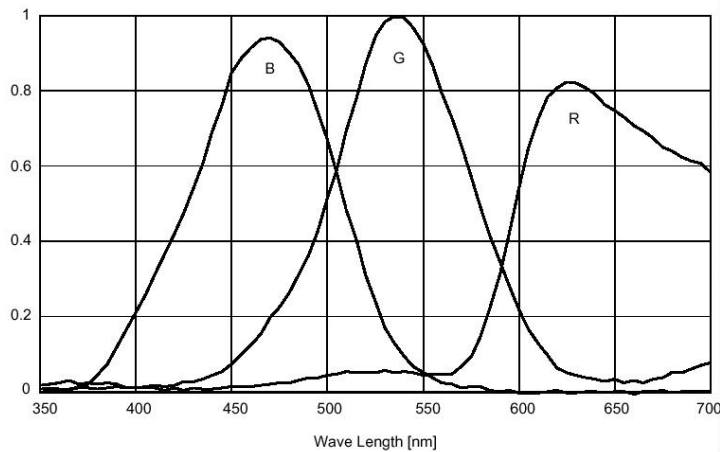


Figura 60. a. Curva de sensibilidad de la cámara empleada: DVT 542C, b. Modelo de cámara DVT 544, con hardware muy similar a una DVT a Color, (algunas de éstas cámaras traen integrado un anillo de LEDs, la cámara utilizada no lo tenía).



Figura 61. Carta de color ColorChecker Macbeth utilizada para ejecutar la caracterización de la cámara industrial.

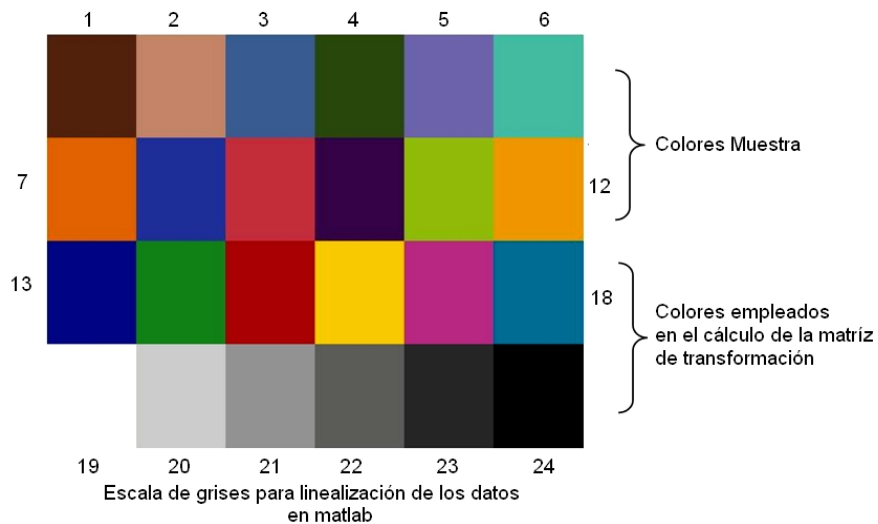


Figura 62. Detalle de la carta de color empleada y las muestras que se utilizaron para cálculo de la matriz de transformación y colores de prueba.

4.3.2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA INDUSTRIAL.

A continuación se detalla el procedimiento de caracterización de la cámara industrial:

1. Los datos de reflectancia con el espectrofotómetro y de color RGB con la cámara fueron tomados con dos lámparas las cuales ya fueron descritas en

los primeros capítulos: lámparas tipo LED blancas y una lámpara tipo fluorescente blanca.

2. Ya con la cámara, se ejecutó un balance de blancos manual por medio del software de la cámara, el cual consistió en enseñar la muestra blanca de la carta de color a la cámara y verificar que ésta diera valores cercanos o iguales a los RGB teóricos de la muestra, si éstos no dan, se ajustan las ganancias de los canales R, G, B de la cámara lo más cercano posible al valor teórico.
3. Se ejecuta una función conocida en el software de la cámara como “*calibración de reflectancias*”, el propósito de ésta herramienta es tener mediciones de color relativas más precisas con las herramientas de medición de color de la cámara más no valores de color absolutos más precisos. Además, con ésta calibración, en caso de que se tengan más cámaras, ya calibradas con las mismas muestras, se lograrán medidas más homogéneas de una cámara a otra. Para llevar a cabo ésta calibración, se ubican una a una las muestras de la escala de grises de la carta frente a la cámara, desde el blanco hasta el negro, cada vez que se enseña una muestra a la cámara se le introducen los valores RGB teóricos de cada muestra, de forma tal que la cámara formará una look up table con éstos valores; los cuales serán empleados cada vez que se ejecute una herramienta de medición de color (de forma muy similar a la linealización indicada en el inicio de éste capítulo).
4. Para evitar que los valores arrojados por la cámara fueran afectados por software in-situ (que provocan consecuencias ya detalladas), se tomó otro grupo de datos sin balance de blancos y sin calibración de reflectancias, es decir, se trató que los valores R,G,B de la cámara fueran lo más “*puros*” posible.
5. Una vez tomados los valores R,G,B éstos fueron linealizados y caracterizados por medio de código ejecutado en *MATLAB*, a continuación se dan los resultados:

Tipo de iluminación	Calibración de reflectancias de cámara	Linealización en matlab	$\overline{\Delta L}^*$	$\overline{\Delta a}^*$	$\overline{\Delta b}^*$	$\overline{\Delta E}$
Fluorescente	✓	✓	2,41	7,24	19,24	23,32
			9,76	9,40	7,44	17,58
		✓	2,06	3,83	6,0	8,41
			3,43	4,04	4,90	8,86
LED	✓	✓	3,15	4,02	7,74	11,11
			8,32	7,0	5,67	14,83
		✓	18,33	32,35	43,44	61,89
			17,61	29,71	42,33	59,59

Tabla 6. Resultados del colorímetro con cámara y caracterización en matlab.

Para analizar el comportamiento de los datos bajo la calibración de reflectancias de la cámara, se presentan las gráficas a continuación:

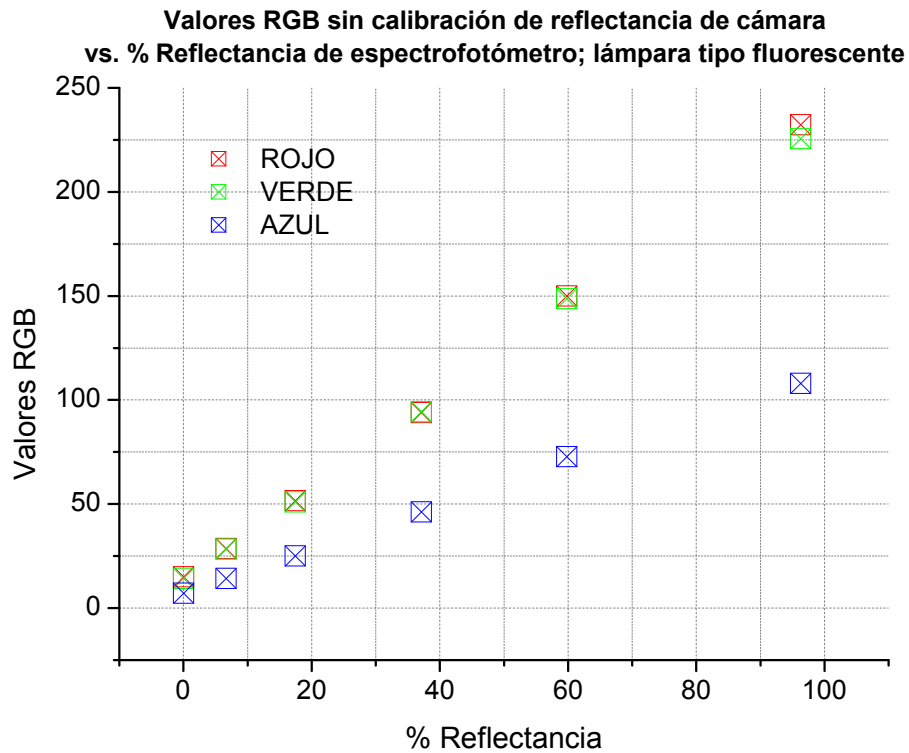


Figura 63. Valores RGB sin calibración de reflectancia de cámara vs. % Reflectancia de espectrofotómetro; lámpara tipo fluorescente.

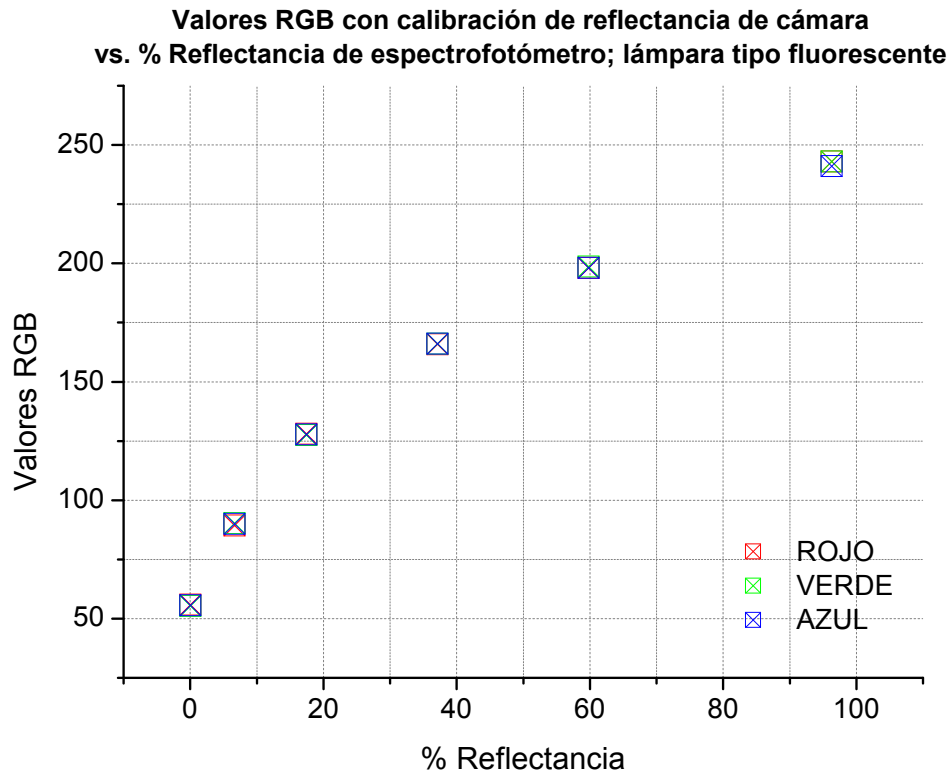


Figura 64. Valores RGB con calibración de reflectancia de cámara vs. % Reflectancia de espectrofotómetro; lámpara tipo fluorescente.

Al analizar los valores del sistema con lámpara tipo fluorescente, antes de la calibración de reflectancias, se nota que, el canal azul presenta valores pequeños con respecto a los valores de los canales rojo y verde, y, que en general las curvas se encuentran entre una relación lineal, cercano a una función de potencia, al ejecutarse la calibración de reflectancias la cual no es propiamente una calibración de reflectancias, ya que en la cámara no se están teniendo en cuenta las reflectancias de los colores, sino los valores RGB de las muestras de gris, la cámara estaría ejecutando una función de corrección gamma como si la imagen estuviera oscura, esto a causa de los bajos valores en el canal azul y, de la tendencia en general de los tres canales hacia valores de gamma mayores que 1,

por lo tanto, no ejecuta una corrección con el fin de llegar a una relación lineal, sino a un comportamiento de función de potencia con gamma menor que 1. Así:

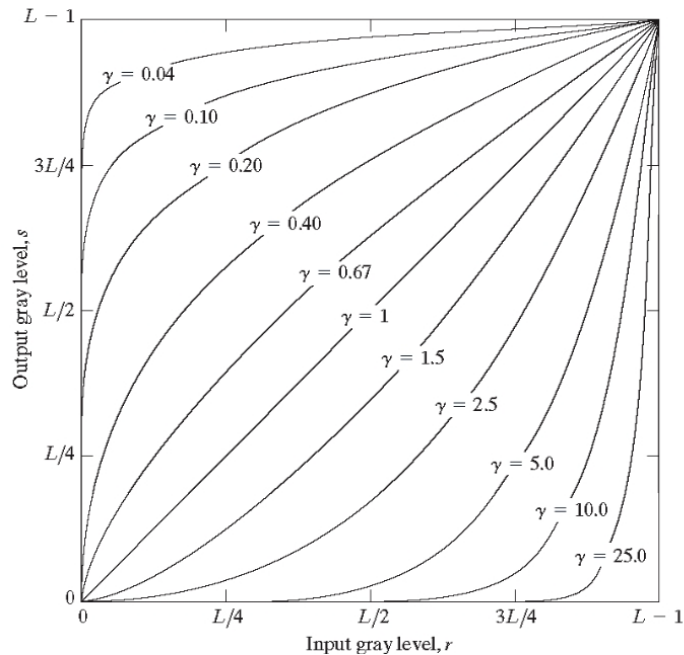


Figura 65. Curva de comportamiento de sistemas de adquisición de imágenes, de impresión; etc. [12]

La anterior gráfica tiene el comportamiento de una función de potencia de la forma:

$$s = cr^\gamma \quad (26)$$

Donde c y γ son valores constante positivos; para valores de gamma pequeños se tiene un resultado opuesto que para los grandes, generándose, imágenes más claras ($\gamma < 1$) ó más oscuras ($\gamma > 1$) [12]; por lo que se incurre en una diferencia de color mayor para el evento de calibración de reflectancias que para cuando no se ejecuta el mismo cuando se emplea en el sistema una fuente tipo fluorescente.

Para el sistema en el cual se empleó una fuente tipo LED se encuentra que al ejecutarse la calibración de reflectancias la diferencia de color fue menor que

cuando no se ejecutó. El comportamiento de las muestras grises de la carta para éste tipo de iluminación desmejoró en comparación con la fuente de luz tipo fluorescente, ya que ésta tiene pobres componentes tanto de altas como bajas longitudes de onda, por lo cual se debe corregir los canales B y R generándose una relación de reflectancias vs. Respuestas de los canales RGB mejor que cuando no se ejecutó la calibración de reflectancias. Si se analiza la curva de sensibilidad de cada uno de los canales de la cámara se observará que los canales R y B tienen menor sensibilidad que el canal G, lo cual se ve reflejado en las curvas de reflectancia vs. Respuesta canales RGB para ambos sistemas de iluminación; en los que, la respuesta en el canal rojo es mayor para la lámpara tipo fluorescente que para el canal azul y ambos tienen una respuesta considerablemente baja para la lámpara tipo LED la cual no tiene buena información hacia longitudes de onda altas y bajas.

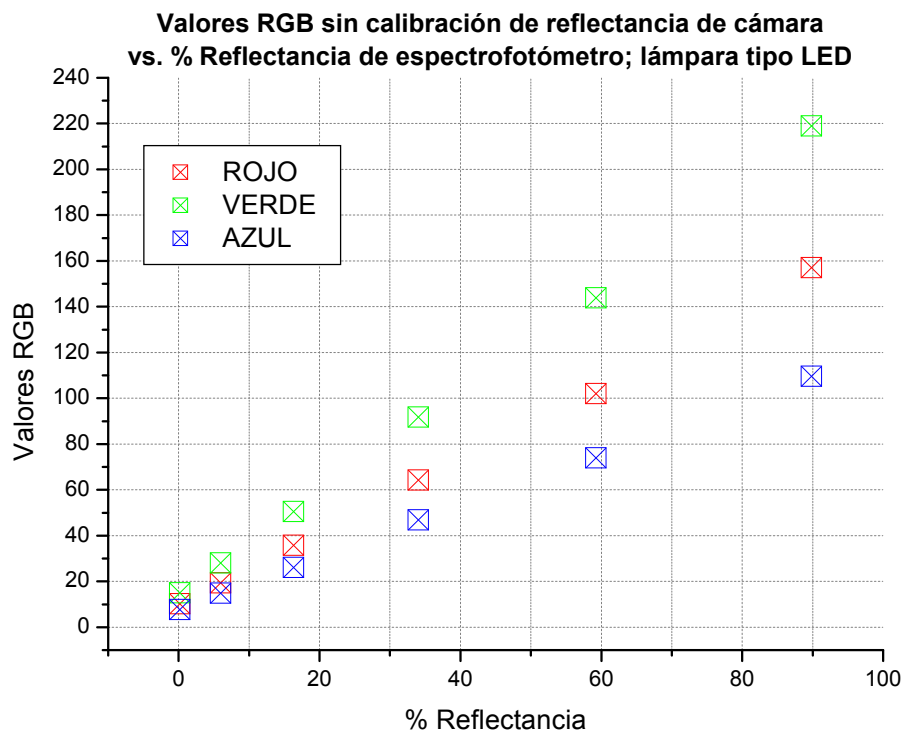


Figura 66. Valores RGB sin calibración de reflectancia de cámara vs. % Reflectancia de espectrofotómetro; lámpara tipo LED.

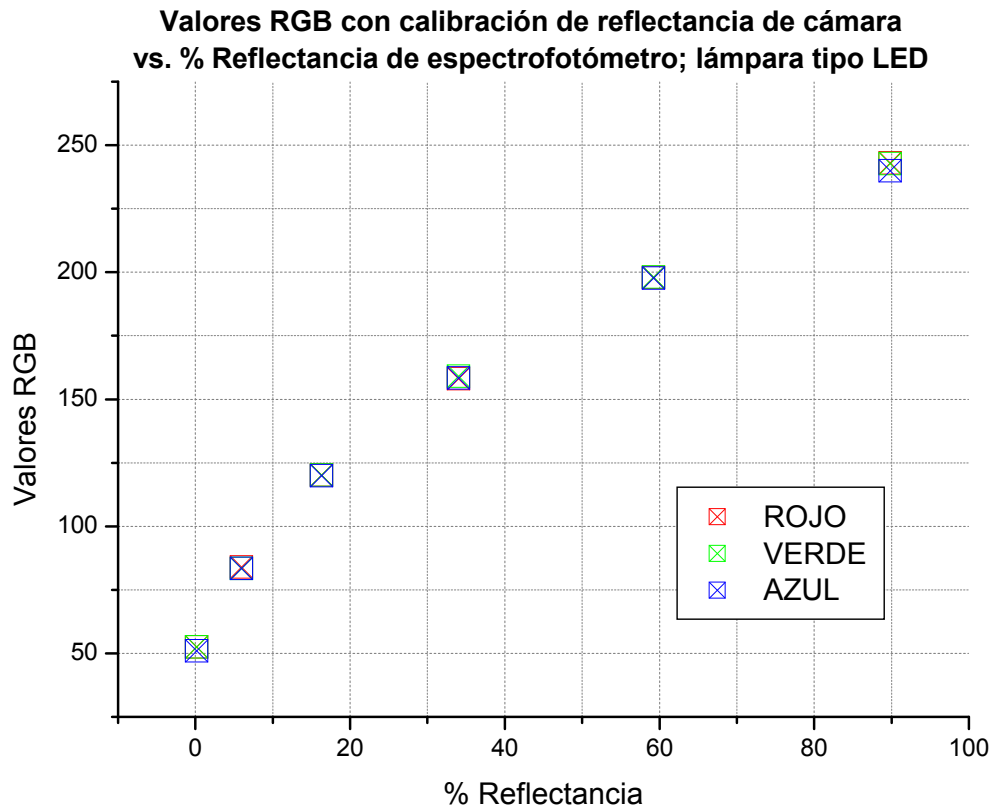


Figura 67. Valores RGB con calibración de reflectancia de cámara vs. % Reflectancia de espectrofotómetro; lámpara tipo fluorescente.

Si bien, la cámara tipo industrial se encuentra en capacidad de entregar valores CIE $L^*a^*b^*$ éstos presentaron también una alta diferencia de color, dicho comportamiento, como se nota, fue mejorado con la caracterización ejecutada. Los valores CIE $L^*a^*b^*$ entregados por la cámara dieron las siguientes diferencias de color (en promedio):

Tipo de iluminación	Calibración de reflectancias	$\overline{\Delta L^*}$	$\overline{\Delta a^*}$	$\overline{\Delta b^*}$	$\overline{\Delta E}$
Fluorescente	✓	22,33	14,83	19,90	37,31
		19,03	36,84	16,62	47,14
LED	✓	21,35	14,27	17,80	34,75
		2,82	18,08	18,23	28,11

Tabla 7. Resultados del colorímetro y valores CIE L*a*b* entregados directamente por la cámara industrial

En las imágenes entregadas por la cámara se nota el efecto de la calibración de reflectancias y balance de blancos, la predominancia de los colores verdes en la lámpara tipo LED y amarillos en la fluorescente y la baja intensidad de la lámpara tipo LED comparada con la fluorescente; la imágenes corresponden a la muestra blanca (color 19) de la carta de color:

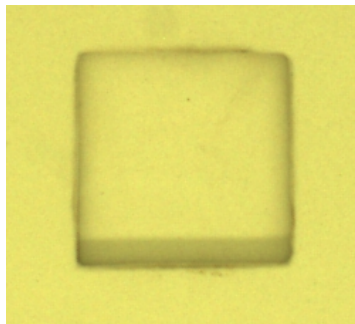


Figura 68. Color 19 de la carta de color sin calibración de reflectancias y sin balance manual de blancos, lámpara tipo fluorescente.



Figura 69. Color 19 de la carta de color con calibración de reflectancias y balance manual de blancos, lámpara tipo fluorescente.

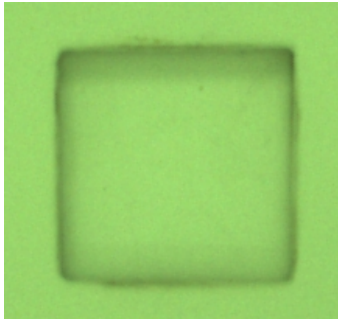


Figura 70. Color 19 de la carta de color sin calibración de reflectancias y sin balance manual de blancos, lámpara tipo LED

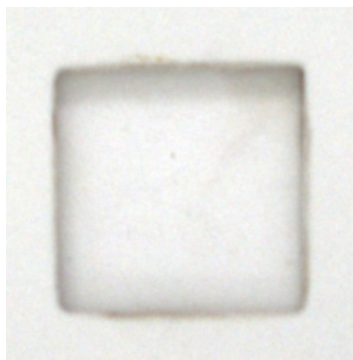


Figura 71. Color 19 de la carta de color con calibración de reflectancias y balance manual de blancos, lámpara tipo LED

Para aquellas muestras en las cuales se empleó la fuente de luz tipo fluorescente y no se empleó la calibración de reflectancias de la cámara, en general, se encontró que el color que más error presentó fue el 12 ó *orange yellow*, el cual, en especial en su coordenada cromática b^* presentó mayor error, con un valor de b^* que tiende mucho hacia el amarillo, alejándose del azul, lo cual no concuerda con su valor teórico; dicho color tiene una coordenada cromática b^* teórica de 67.857, y, con el colorímetro dio un valor de 79.14; dicha tendencia hacia el amarillo se debe, además de ser un color naranja, también a que éste color tiene muy poca reflectancia hacia el azul, a lo cual, si se añade que la pintura absorbe la componentes de longitudes de onda bajas de la fuente de luz, y que ésta a su vez sólo tiene una componente fuerte hacia los 450nm, se explica porqué la diferencia Δb^* es tan alta, donde: $\Delta b^*=17.38$, $\Delta a^*=5.59$, $\Delta L^*=0.06$. En contraste, las

muestras que menor diferencia de color presentaron fueron los colores 5 y 3 correspondientes a los azules *blue flower* y *blue sky* respectivamente. Dichos colores presentan una alta reflectancia hacia longitudes de onda bajas, por lo cual factores como la absorbancia del recubrimiento del domo hacia estas longitudes de onda, y las bajas componentes de las mismas en la fuente de luz no afectan considerablemente en la diferencia de color total de éstas muestras, donde: $\Delta L^*=3.65$, $\Delta a^*=0.4$ y $\Delta b^*=0.6$, para el color blue sky; y $\Delta L^*=3.28$, $\Delta a^*=0.56$ y $\Delta b^*=0.31$; por lo cual, se llega a que éstas muestras gracias a su alta reflectancia hacia las bajas longitudes de onda, *aprovechan* la pobre componente en los 450nm de la fuente de luz. A continuación se muestran las curvas de reflectancia obtenidas con: a. Espectrofotómetro con domo del colorímetro y b. Con un espectrofotómetro que contaba con las fuentes de luz y recubrimientos aptos (espectrofotómetro referencia de TINTAS & TINTAS mencionado anteriormente).

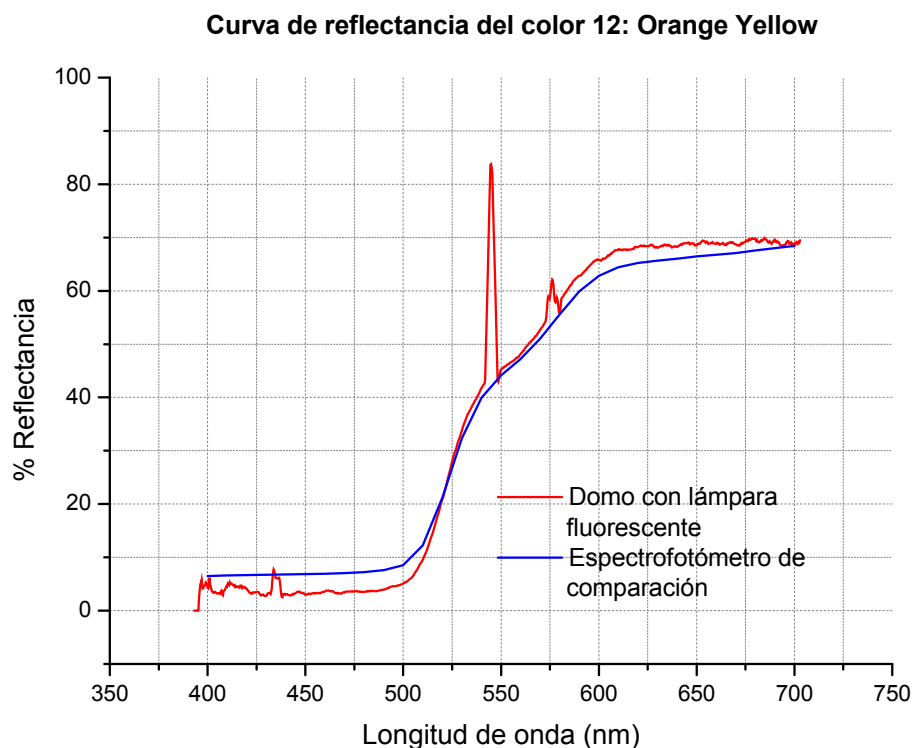


Figura 72. Curva de reflectancia del color 12: Orange Yellow, espectrofotómetro de comparación: Laboratorio TINTAS & TINTAS.

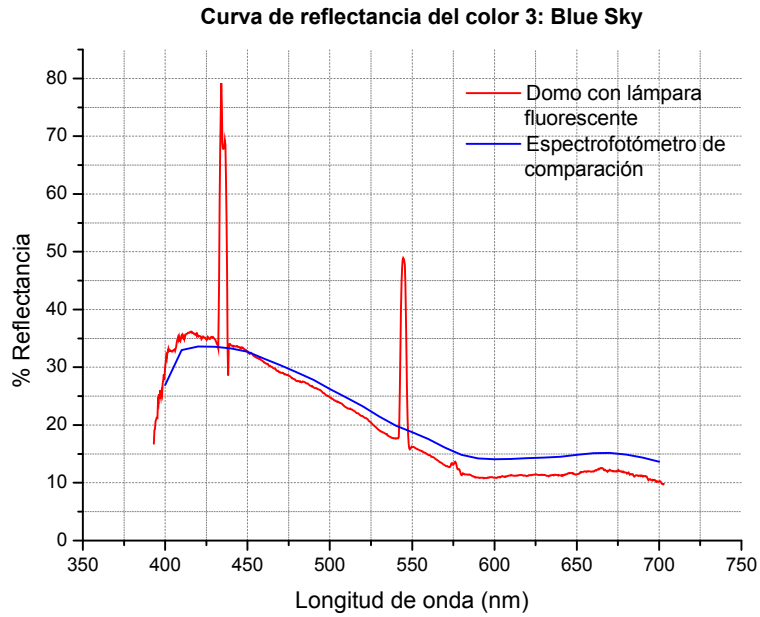


Figura 73. Curva de reflectancia del color 3: Blue Sky, espectrofotómetro de comparación: Laboratorio TINTAS & TINTAS.

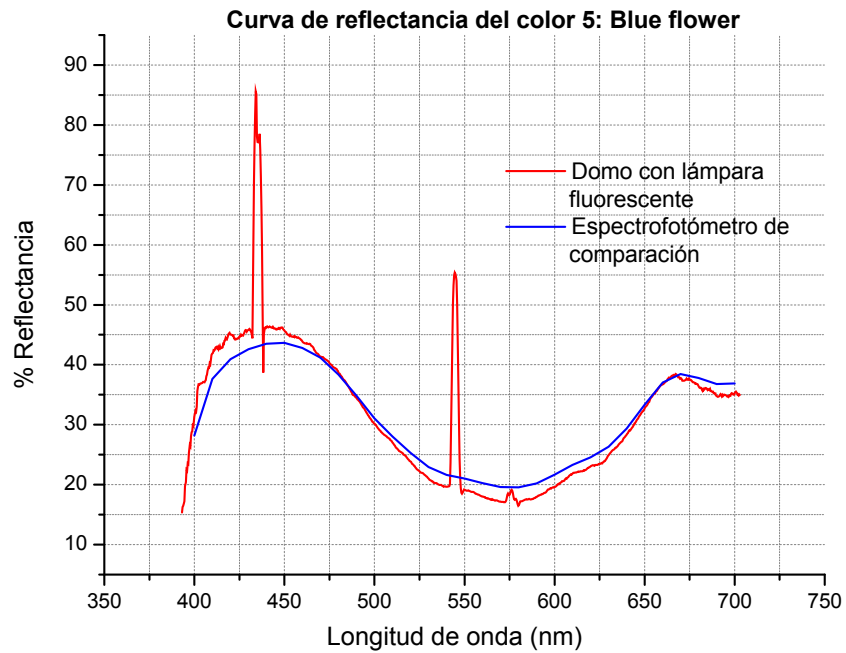


Figura 74. Curva de reflectancia del color 5: Blue Flower, espectrofotómetro de comparación: Laboratorio TINTAS & TINTAS.

Al revisarse las mismas muestras evaluadas con una fuente tipo LED y la cámara sin calibración de reflectancias, se encuentra que, la muestra 8 ó *purplish blue*, tiene la diferencia de color más alta además, se encuentra que su valor b^* contiene mucho más azul que las 11 muestras restantes, así, si se tiene una fuente de luz la cual en sus longitudes de onda bajas tiene una componente casi nula y el recubrimiento absorbe dicha componente, se tendrá, como se observa en la gráfica, ruido ó un valor nulo, razones por las cuales se encuentra que ésta muestra tiene una diferencia de color significativa. En la curva de reflectancia de éste color se nota la baja reflectancia en comparación con el otro espectrofotómetro y hacia las longitudes de onda bajas señales correspondientes a valores nulos e incoherentes, ocasionados por razones ya presentadas.

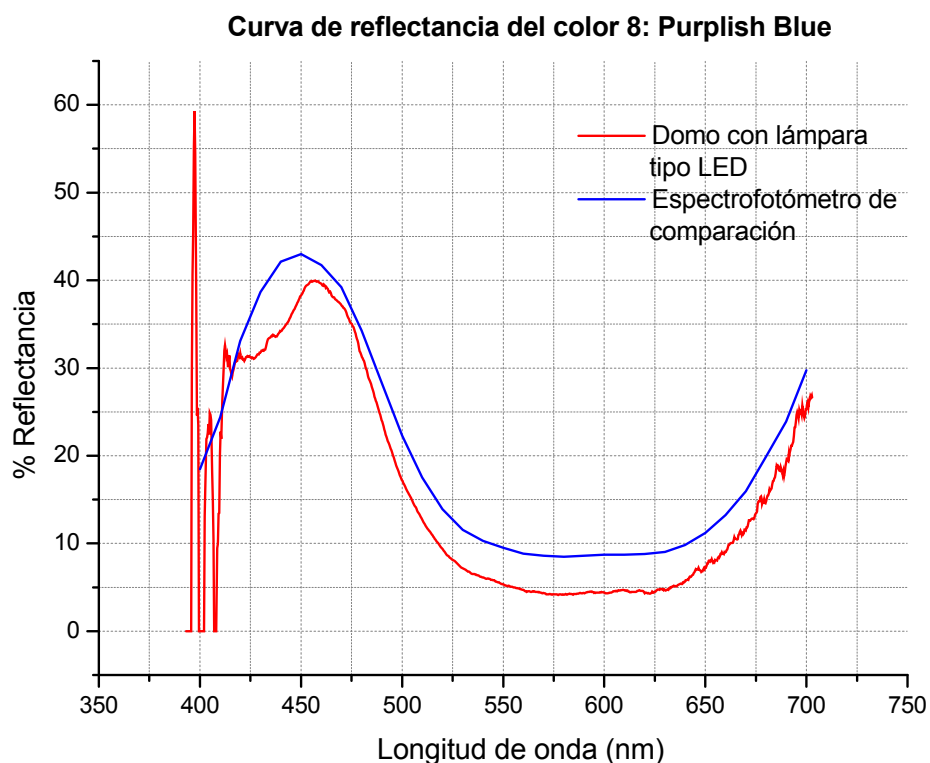


Figura 75. Curva de reflectancia del color 8: Purplish Blue, espectrofotómetro de comparación: Laboratorio TINTAS & TINTAS.

Todas las muestras, tanto con fuente de luz tipo fluorescente como LED presentan una alta diferencia de color en Δb^* , más que en Δa^* y ΔL^* ; lo cual se justifica con la ya mencionada absorbancia del recubrimiento hacia longitudes de onda bajas y con la pobre componente hacia éstas longitudes de onda de ambas fuentes de luz; sin embargo, para el sistema con lámpara tipo LED se nota una diferencia de color mucho mayor que para el sistema con lámpara tipo fluorescente, lo cual se puede atribuir además del hecho que la lámpara tipo fluorescente tiene un espectro más amplio que el de la tipo LED, al hecho de que la intensidad de ésta es muy baja comparada con la fluorescente. A pesar de que la lámpara tipo fluorescente tiene un buen espectro, no es precisamente el buscado para emular un iluminante tipo D65 ya que presenta unos picos indeseados en algunas longitudes de onda y que se presentan también en las curvas de reflectancia de algunas muestras lo cual afecta la medida del color.

CONCLUSIONES

- Dentro de la caracterización de los elementos del colorímetro sin optimizar, se encuentra que, el sistema de iluminación con lámpara tipo LED blanca no tiene el espectro apropiado para el colorímetro; ya que tiene un espectro poco uniforme, que, en su mayoría se compone de longitudes de onda verdes y amarillas, sus componentes entre los 400nm y 450nm y desde los 630nm en adelante son muy bajas. Igualmente, el recubrimiento a base de Dióxido de Titanio (TiO_2), tampoco es el más apropiado, ya que tiene una alta absorbancia hacia los 400nm.
- Al evaluarse una iluminación tipo fluorescente de mejor espectro y más intensa que la iluminación tipo LED se encontró una mejoría en los valores CIE- $L^*a^*b^*$ calculados, sin embargo, éste tipo de sistema no se recomienda, ya que su espectro no es del todo uniforme, sin mencionar que su tiempo de vida es mucho menor a la iluminación tipo LED, se calientan más y su intensidad con el tiempo va disminuyendo, lo cual incurriría en constantes calibraciones del colorímetro.
- Para la adecuada optimización del colorímetro se presenta un diseño de lámpara a base de LEDs caracterizados en laboratorio con espectrofotómetro y emulados en un software de diseño: TRACEPRO, el cual arrojó una temperatura cercana a la de una lámpara tipo D65 ó luz día: 6500°K. Igualmente para evitar la absorbancia del recubrimiento hacia longitudes de onda bajas, se debe recubrir el interior del domo con una pintura a base de Sulfato de Bario BaSO_4 , la cual permite una absorbancia menor hacia longitudes de onda bajas comparada con una pintura común a base de Dióxido de Titanio TiO_2 ; asimismo, el dispositivo de captura ó cámara CCD a emplear deberá tener la opción de recolectar valores RGB lo más cercano a sus valores puros y con curvas de sensibilidad más uniformes.

- Con respecto al algoritmo implementado para la conversión de color del modelo RGB al modelo CIE-L*a*b*; se encuentra que éste aportó una mejoría en los datos calculados para los valores CIE-L*a*b* de las muestras evaluadas en comparación con los datos CIE-L*a*b* arrojados por la cámara tipo industrial.
- Se ejecutó la caracterización y optimización del diseño de un colorímetro que opera en el modelo CIE-L*a*b* por medio de una cámara CCD para ser aplicado en inspección de color en textiles.
- Finalmente, para la medición de color en textiles se deberán ejecutar mejoras ya mencionadas en el colorímetro y validar dichas mejoras con muestras de textiles en laboratorio, y de forma continua en planta.

BIBLIOGRAFÍA

1. DeCusatis C. Handbook of Applied Photometry. Optical Society of America, 1997.
2. Lee H.-C. Introduction to color imaging science. Cambridge University Press, 2005.
3. Bass M. Handbook of Optics, Vol. 1. McGraw-Hill Books, Sponsored by the Optical Society of America, 1995.
4. Shevell S. Science of color. Optical Society of America, 2003.
5. Sharma A. Understanding color management. Thomson Delmar Learning, 2004.
6. Sangwine S. and Horne R. Colour image processing handbook. Chapman & Hall, 1998.
7. Lozano D. El color y su medición. Editorial Américalée, 1978.
8. Caldeira R. Revista on-line Lumière, www.revistalumiere.com.br, Goniofotómetros y determinación del flujo luminoso, 2004.
9. Análisis de la tecnología de visión artificial aplicada al sector textil. AITEX: Instituto tecnológico textil, 2002.

10. Arcila W. Diseño y puesto en funcionamiento de un sistema de monitoreo en línea de color de acuerdo con estándares internacionales utilizando una cámara CCD industrial. Universidad de Antioquia, Wilmar Arcila 2009.
11. Westland S. and Ripamonti C. Computational colour science using matlab. Jhon Wiley & Sons, 2004.
12. Gonzales R. and Woods R. Digital Image Processing. Prentice-Hall, 2002.