



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Redeterminación Experimental de los Valores del
Observador Colorimétrico Estándar para un
Campo Visual de 2°

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

PRESENTADA POR:

Carlos Bruno Rodríguez Martínez

DIRECTORA: Dra. Jazmín Carranza Gallardo

REVISORES: Dra. Andrea Luisa Aburto Espina

Dr. Manuel Campos García

Dr. Maximino Avendaño Alejo

Mtra. Alicia Zarzoza Pérez



México, Cd. Mx. 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	iv
1. Marco Teórico	1
1.1. Teoría de la visión	1
1.1.1. Espectro visible	1
1.1.2. Ojo humano	2
1.1.3. Propiedades fotométricas del ojo humano	8
1.2. Trinomio de color	10
1.3. Teoría Tricromática	12
1.3.1. Introducción	12
1.3.2. Observador estándar	16
2. Desarrollo experimental	31
2.1. Monocromador	31
2.1.1. Rejillas de difracción	32
2.1.2. Monocromador experimental	39
2.1.3. Ajuste del monocromador	41
2.2. Mezclador RGB	49
2.2.1. Mezclador RGB experimental	55
2.3. Selección del observador	59
3. Medición de los valores triestímulo	63
3.1. Arreglo experimental final	63
3.2. Realización del experimento	67
3.2.1. Visión general	67
3.2.2. Procedimiento de medición	67
4. Resultados experimentales	72
4.1. Descripción de la muestra	72
4.2. Métodos de ajuste de datos propuestos	74

4.3. Método de los factores espectrales	75
4.3.1. Igualación del blanco de la fuente	75
4.4. Resultados de la igualación por el Método de Factores	77
4.5. Resultados por el método de la fuente equienergética	79
4.6. Comparación entre el método de factores y el de fuente equienergética . .	81
4.6.1. Comparación en funciones de igualación de color	81
4.6.2. Comparación en Coordenadas Cromáticas	82
Discusión	84
Introducción	84
Comparación entre los dos métodos propuestos	84
Efecto de los primarios utilizados	86
Influencia de los Observadores	87
Transformación de primarios	88
Resultados de J. Guild y W. Wright	90
Comparación de resultados con los trabajos de J. Guild y W. Wright	91
Comparación de resultados con la CIE	93
Conclusiones	99
Apéndice A	102
A.1	102
A.2	103
A.3	104
A.4	105
Referencias	106

Se estudió la teoría tricromática, enfocándose en el experimento del observador estándar realizado en 1931 por Guild y Wright [1]

Respecto a la realización del proyecto, se implementaron un mezclador tricromático, con primarios rojo, verde y azul (RGB) y un monocromador en el espectro visible con un ancho de banda de 10nm para hacer el experimento del observador estándar colorimétrico con un campo visual de 2 grados.

El mezclador RGB, emite 3 haces de luz en regiones del espectro electromagnético específicas, es decir, el conjunto de estímulos primarios, con esto se obtuvo la igualación de colores cuasimonocromáticos desde 410nm hasta 690nm como mezclas tricromáticas. Se realizó la igualación de estímulos para cada 10nm.

Para la muestra de evaluadores, se incluyeron observadores visualmente sanos respecto a los criterios de inclusión y exclusión descritos en el trabajo. La muestra se restringe a la población latinoamericana y se realizó para un total de 15 observadores.

El monocromador y el mezclador RGB se montaron en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) ubicado en Puebla, de manera que todos los evaluadores realizaron el experimento en dichas instalaciones. La colección de datos se toma de forma manual, la transformación de los datos en términos de corriente y voltaje a luminancia se explica al interior del texto.

Se implementaron 2 métodos para la igualación de color, el método de los factores espectrales y el método de la fuente equienergética, donde las igualaciones de los estímulos de color se realizaron para 13 y 15 observadores respectivamente.

Los resultados obtenidos se compararon con los obtenidos por Guild y Wright, posteriormente con el conjunto de datos estandarizado por la Comisión Internacional de l'Eclairage (CIE) [1]. Se discuten las diferencias entre los datos aquí obtenidos y los reportados en la literatura. Las principales diferencias se obtuvieron en el intervalo rojo del espectro, entre 600nm y 690nm.

1.1. Teoría de la visión

1.1.1. Espectro visible

La visión es un proceso complejo que requiere principalmente de un estímulo, un detector y un sistema de componentes neurales que se encargue de procesar e interpretar la información que proviene de los receptores del detector [2]. En términos específicos el estímulo será un haz de fotones que corresponden al intervalo del espectro visible. Este pequeño intervalo de todo el espectro electromagnético es el único que puede estimular al ojo humano. En la Figura 1.1. podemos ver el espectro electromagnético especificando el intervalo visible, el cual se encuentra entre los 400nm y los 700nm. Cabe mencionar, que este intervalo puede variar si la intensidad del emisor cambia, es decir, si aumentamos la intensidad de la fuente en uso, será posible llegar a observar el espectro visible desde los 380nm hasta los 780nm [3]. Estas ondas son de interés porque estimulan al detector (retina) y este crea el sentido de la visión, toda la radiación fuera de este intervalo no es de interés para mediciones de luz visible.

La característica física de cada radiación es su frecuencia de vibración ν , tomando en cuenta que la velocidad en el vacío c es la misma para toda la radiación del espectro, se tiene, inversamente proporcional a la frecuencia, la longitud de onda λ [4]. Dicha relación se expresa como

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Para entender qué es la luz, resaltamos dos características sobre su naturaleza [4]

- i) La luz es una forma de energía radiada como una vibración armónica con una frecuencia entre 3.85×10^{14} y 7.89×10^{14} por segundo.

- ii) La energía es radiada en la forma de una muy grande cantidad de unidades elementales de energía, conocidos como fotones, donde su energía es proporcional a la frecuencia de la radiación.

Cada fotón tiene una energía $E = h\nu$ donde $h = 6.626 \times 10^{-34} J.s$ es la constante de Planck [5] y se necesita una cantidad extremadamente grande para estimular el ojo humano. En colorimetría la luz suele ser vista físicamente como varios paquetes de energía radiados por segundo a diferentes frecuencias en el espectro visible propagadas como vibraciones transversales a muy alta velocidad [4].

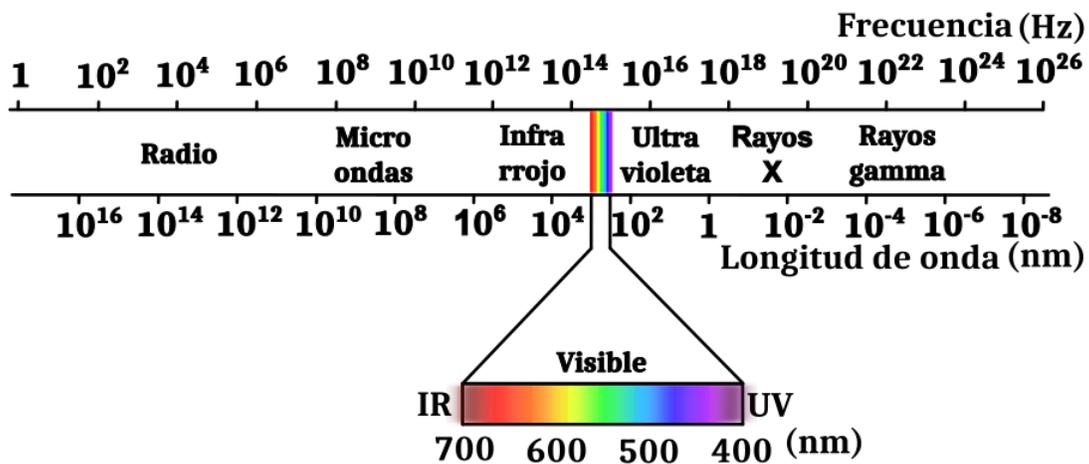


Figura 1.1: Espectro electromagnético. Los límites del espectro visible pueden cambiar dependiendo de la intensidad y del observador [6]

Del intervalo visible, generalmente se crean divisiones para diferenciar las bandas de colores, donde las 3 más importantes son la azul entre (400 - 500)nm, la verde entre (500 - 600)nm y la roja (600-700)nm, aunque no son precisas son la base de la teoría de la visión que se estudiará más adelante.

1.1.2. Ojo humano

El ojo humano es un órgano complejo que permite al observador obtener conocimiento del medio, siempre que las condiciones lo permitan, como no encontrarse en oscuridad total. Para que el detector sea estimulado se requiere una mínima cantidad de energía radiante en alguna longitud de onda del espectro visible. Esta energía puede provenir de un haz de luz emitido por una fuente o por medio de la reflexión o transmisión de luz por un objeto y debido a la sensibilidad del ojo a este tipo de radiación es que existe la visión.

El ojo además de detectar la luz, puede sensar la dirección por la cual proviene la luz, así como diferenciar entre varias intensidades, creando contraste y una percepción espacial. Igualmente, detectar detalles finos mientras enfoca, detectar movimiento y tener la habilidad de percibir la profundidad. Se tiene entonces un sistema adaptativo con diferentes habilidades, donde la más importante en este estudio es la percepción de color.

El sistema óptico del ojo consta de varias partes, cada una de ellas con una función específica. Básicamente, la detección de luz depende de un haz que debe atravesar por la cornea que involucra cerca del 73 % de la refracción total del sistema, ser enfocado por el lente cristalino y ser proyectado en la retina, en donde se formará la imagen, impulsos nerviosos se generan y viajan al cerebro, finalmente el cerebro procesa la información. En la Figura 1.2 se muestra un esquema donde se encuentran las etapas básicas del proceso de visión.

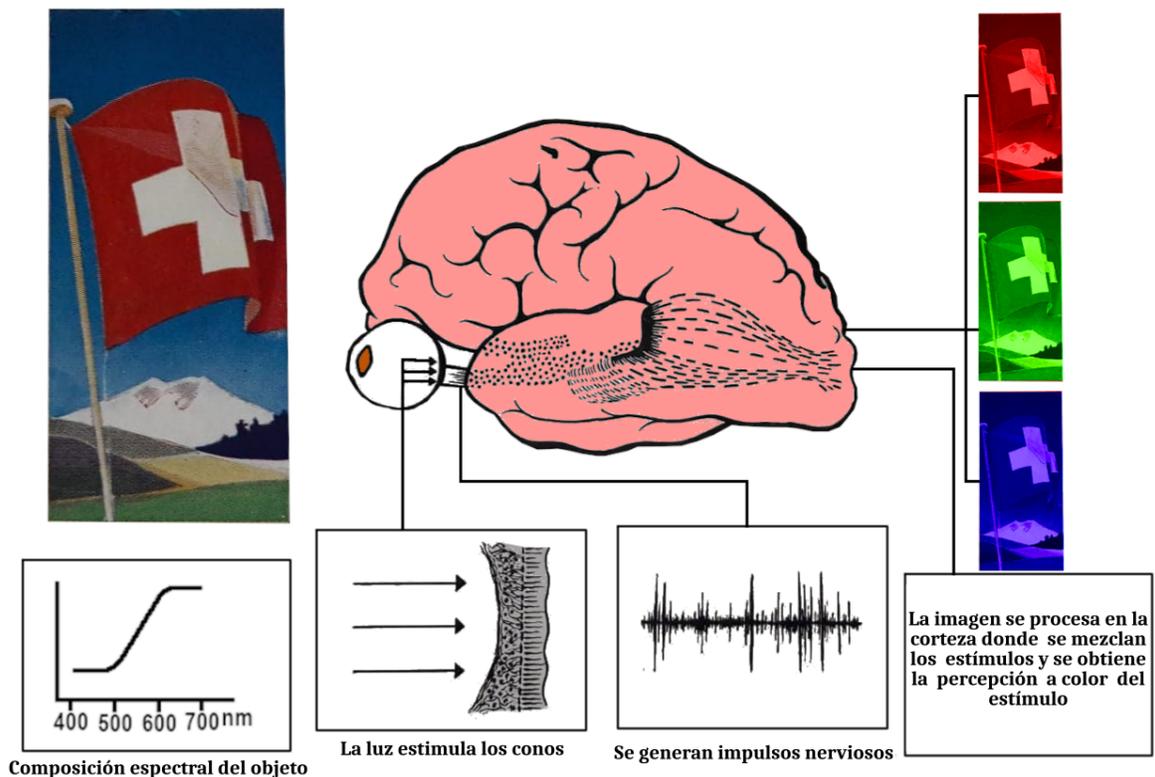


Figura 1.2: Etapas en el proceso de la visión modificado de [7]

La Figura 1.3, muestra la anatomía del ojo humano, podemos observar que la imagen se forma en el fondo del ojo. Es necesario notar que en la retina se encuentran las células fotosensibles que son las principales causantes de la visión.

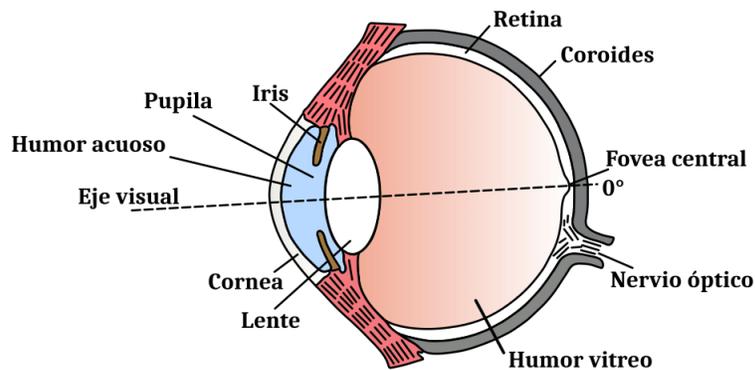


Figura 1.3: Anatomía del ojo humano modificado de [6]

Como se dijo anteriormente, cada parte del ojo es esencial en este proceso, por eso se resume brevemente la función de algunas de ellas [3].

- i) **Córnea:** Es un tejido transparente sin vasos sanguíneos compuesto por varias capas, tiene un diámetro de 12mm un grosor de 0.6mm en el centro y un índice de refracción de 1.376. La cornea protege al ojo del agua, moléculas grandes o de sustancias tóxicas [8].
- ii) **Íris:** Es un diafragma que se contrae o expande para modular la entrada de luz al ojo, los músculos del iris responden a la intensidad de luz. El diámetro mínimo es cercano a los 2mm y el máximo cercano a 8mm .
- iii) **Pupila:** Es una apertura circular que cambia de tamaño dependiendo de la acción del iris.
- iv) **Lente cristalino:** Es una estructura transparente en capas, similar a una cebolla, que da detalles finos y se encarga de enfocar cambiando su forma apropiadamente, esto hace que la imagen se vuelva más nítida. Cerca del centro el índice de refracción es 1.41 y en los extremos es 1.38.
- v) **Músculo ciliar:** Son fibras conectadas a la periferia del lente cristalino, estas se contraen o relajan para cambiar la curvatura del cristalino, donde su forma más plana reduce la refracción de los rayos.
- vi) **Humor vítreo:** Es una sustancia transparente con índice de refracción 1.336, similar al agua.
- vii) **Retina:** Es la capa del fondo del ojo, formada por diferentes células que son sensibles a la luz, conos y bastones, esto quiere decir que esta zona es la encargada de detectar la luz, que posteriormente se convierte en señales neuronales las cuales son transmitidas por el nervio óptico al cerebro donde se la imagen eventualmente se forma [8]. Dada la importancia de la retina, se estudia con detalle más adelante.

vii) **Nervio óptico:** Ligadas a las células fotorreceptoras de la retina, se encuentran otras células que forman el nervio, amocrina, bipolar y horizontal, que transmiten el impulso al nervio óptico y que posteriormente llevan la información al cerebro.

La retina es un tejido con varias capas con un grosor de $180\mu m$ en la fovea y entre 200 a $400\mu m$ fuera de la fovea. La retina contiene dos tipos de células fotorreceptoras llamadas por su forma como conos y bastones [8]

- 1) **Bastones:** Estas células sólo cuentan con un fotopigmento llamado rodopsina. Su función principal se centra en discriminar la intensidad de la luz sin hacer contribución sustancial a la visión cromática. Es decir, el funcionamiento de los bastones permite discernir entre los diferentes grados de luminosidad.
- 2) **Conos:** Los conos cuentan con tres diferentes tipos de fotopigmentos pertenecientes a las opsinas; cianolabe, clorolabe y eritrolabe para el “azul”, “verde” y “rojo”, respectivamente. Otra manera de llamarlos es short(S), medium(M) y large(L), esta nomenclatura implica que cada cono individualmente, provee información de color en función de la longitud de onda que lo excita más [9].

La sensibilidad de los fotorreceptores en los dos tipos de células depende de proteínas llamadas opsinas, específicamente de la secuencia de los aminoácidos que las componen. Una variación pequeña de las secuencias puede alterar a qué longitud de onda es más sensible la proteína. Por ejemplo, la diferencia entre los fotopigmentos “M” y “L” son dos secuencias de aproximadamente 350 aminoácidos [10]

Hay otra diferencia entre estas dos células, a baja intensidad de luz, las células que son estimuladas son los bastones, provocado que a baja intensidad no exista visión cromática. En cambio, en alta intensidad los conos son estimulados provocando que se pueda percibir el color. Como se mencionó anteriormente, cada fotopigmento tiene diferente sensibilidad a las diferentes longitudes de onda. En la Figura 1.4, se pueden observar las curvas de absorbancia de los fotopigmentos del ojo humano, cada uno muestra una diferente respuesta a cada estímulo monocromático, donde los picos de absorción máxima se sitúan en $\lambda = 419nm$ para el fotopigmento azul, en $\lambda = 531nm$ para el verde y $\lambda = 559nm$ para el rojo.

La visión tricromática depende del funcionamiento correcto de cada uno de ellos y la percepción de cualquier banda del espectro visible es producto de la interpretación de la información de los tres diferentes fotopigmentos.

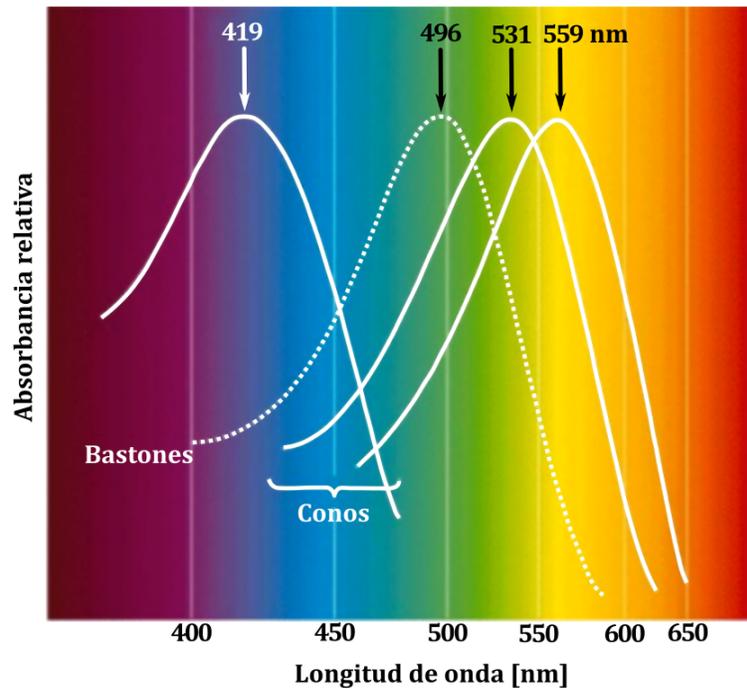


Figura 1.4: Curvas de absorción de los fotopigmentos de las células cono y bastones del ojo humano [9]

La diferencia en tamaño de las dos células es parte fundamental en la sensibilidad de cada una. En la Figura 1.5, se muestra una comparación entre los conos y los bastones, siendo los últimos más largos, esto implica que la luz es absorbida primero por ellos, respaldando que los conos requieren mayor intensidad.



Figura 1.5: Conos y bastones vistos con un microscopio electrónico de barrido [11]

Cerca del centro de la retina se encuentra una pequeña concavidad, con un diámetro entre los 2.5 y los 3 mm, llamada mácula. Esta zona se compone por más del doble de

conos que de bastones y en el centro de la mácula, encontramos una pequeña región llamada fovea central, la cuál se caracteriza por no tener bastones y tener una alta densidad de conos. Dado que la fovea provee la información más detallada del estímulo externo, el ojo tiene que moverse para concentrar la luz en esta región [14].

Se estima que en esta región se encuentran entre cien mil y ciento cincuenta mil conos y el número de conexiones al cerebro es mayor que en cualquier otra región, se cree que estas características son las responsables de una mayor sensibilidad en la fovea de un estímulo externo [1].

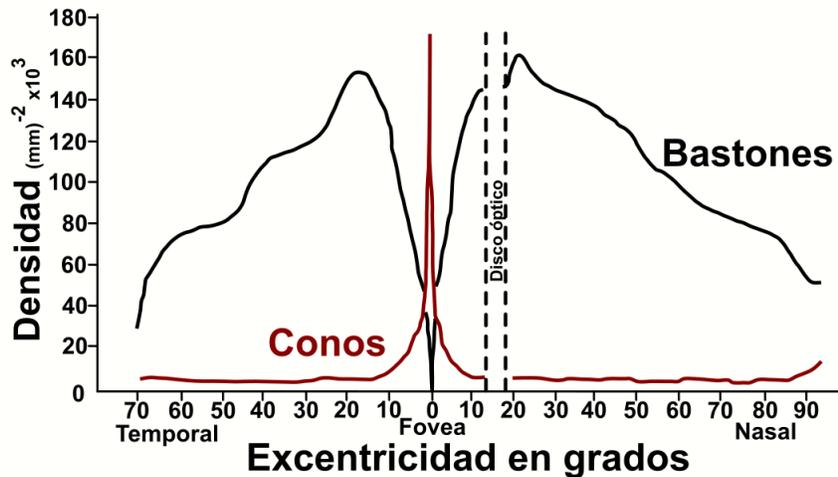


Figura 1.6: Distribución de conos y bastones en la retina del ojo humano [12]

En la Figura 1.6, vemos la distribución de los conos en la retina, se puede observar que la densidad de conos encuentra su máximo centrado en la fovea. Este hecho, nos lleva a concluir que la visión de color se centra en esta pequeña región y que la contribución de las otras zonas de la retina es mínima.

En la visión de color, la habilidad de poder distinguir luces de diferente composición espectral, independientemente de la intensidad, depende en la comparación de las señales de los fotopigmentos. La presencia de los tres diferentes fotopigmentos de los conos determina la visión tricromática [10]. Se le llama dicromática cuando sólo se cuenta con dos de estos fotopigmentos y monocromática cuando sólo se cuenta con uno de ellos.

Un estímulo de color arbitrario puede ser descrito mediante tres propiedades o atributos llamados hue, chroma y luminosidad, propuestas por H. Munsell [15]. Para entender estos conceptos se puede pensar en fichas con diferente color cada una, donde se pide ordenarlas respecto a las propiedades enunciadas. Supóngase que se separan las fichas que se consideran que pertenecen al color rojo sin importar otra propiedad, entonces se dice que las fichas son de Hue rojo, es decir, el hue es el atributo por el cual

podemos diferenciar un color rojo de un verde o de un amarillo. La luminosidad es el atributo que permite clasificar si un color es oscuro o no, en este caso, las fichas con poca luminosidad tienden a parecerse al negro. Finalmente, el chroma es el atributo que permite ordenar las fichas de color respecto a su parecido a un color neutro, donde los colores neutros no tienen hue definido, esto es las fichas de color grises, que van del negro al blanco.

1.1.3. Propiedades fotométricas del ojo humano

La radiometría se encarga de la medición de la radiación en términos de unidades físicas de energía o potencia, la característica que distingue a la fotometría de la radiometría es que toma en cuenta cómo la radiación estimula el ojo humano y produce una sensación de visión, derivado de ello se tiene que la radiación que estudia es puramente la correspondiente al espectro electromagnético visible.

En general, la sensibilidad o respuesta de un fotodetector se determina dividiendo la salida del fotodetector entre la entrada de energía radiante. Como el ojo es un detector, este término es aplicable y se deduce que la salida es la respuesta a la luminosidad. Una alta sensibilidad implica una respuesta muy alta en relación a la entrada de radiación y si está en función de la longitud de onda se le denomina sensibilidad espectral [4].

La respuesta espectral de un fotorreceptor depende de la longitud de onda y al ser estimulado genera una corriente eléctrica que puede ser cuantificada. En el caso del ojo humano, la respuesta no puede ser medida físicamente, esto puede llevar a problemas de precisión. La manera de obtener la sensibilidad espectral del ojo es a partir de la igualación de estímulos, estos deben igualarse en luminosidad por el observador. Se tiene una luz de referencia con energía radiante Φ_e y una luz de prueba con energía radiante Φ_v , ambas con diferentes longitudes de onda, cambiando la luminosidad de la luz de prueba se debe obtener la misma luminosidad que en la luz de referencia. Esto se expresa como

$$\Phi_v = K\Phi_e \quad (1.2)$$

donde K es la medida de luminosidad por energía radiante, es decir, la sensibilidad espectral del ojo. Este valor es dependiente de la longitud de onda.

El valor máximo de $K(\lambda)$ es llamado K_m y la razón entre estos valores da lugar a la función de eficiencia luminosa $V(\lambda)$, es decir,

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda) \quad (1.3)$$

Esto puede ser más complicado de lo que parece, el ojo humano no sólo funciona como un detector. El postulado básico de la fotometría es que cualquier estímulo visual fijo en una parte, y otro estímulo visual arbitrario sin importar su distribución espectral puede igualar en luminosidad al primer estímulo. Entonces este proceso de igualación involucra igualar puramente la luminosidad aún en presencia de otras cualidades como

el hue y la cromaticidad, el ignorar estas características lo vuelve impreciso.

En caso de involucrar solamente a los conos se le llama igualación fotópica y la función $V(\lambda)$ describe la respuesta de los conos a la luminosidad, si se involucran solamente los bastones se llama igualación escotópica y la función respectiva es $V'(\lambda)$. En caso de que se involucren ambos tipos de células, se le llama igualación mesópica.

Existen tres métodos para realizar las igualaciones de luminosidad [4]

- i) **Comparación directa:** En este se tiene un estímulo de prueba λ_1 que se deberá igualar con un estímulo λ_2 , aunque sea un método sencillo para hacerse, resulta en una precisión baja, ya que no es fácil determinar la intensidad entre dos estímulos de diferente hue.
- ii) **Por pasos:** Este método es similar al anterior, a diferencia que ahora los estímulos se eligen cercanos, es decir, λ_1 y λ_2 tienen una longitud de onda similar, entonces la respuesta de λ_2 se puede determinar, así se elige un λ_3 y se compara con λ_2 , esto se repite hasta el final del espectro.
- iii) **Flicker:** Este método consiste en introducir alternadamente dos longitudes de onda λ_1 y λ_2 , al aumentar la frecuencia se produce un parpadeo y en una frecuencia determinada el color de las dos longitudes de onda se mezcla. Por ejemplo, si λ_1 es un rojo y λ_2 es verde, entonces a dicha frecuencia los colores se mezclarán y se verá una mezcla homogénea amarilla. Sin embargo, esto pasa cuando la intensidad de ambos es la misma, en caso contrario, aunque el color se mezcle el parpadeo se mantiene.

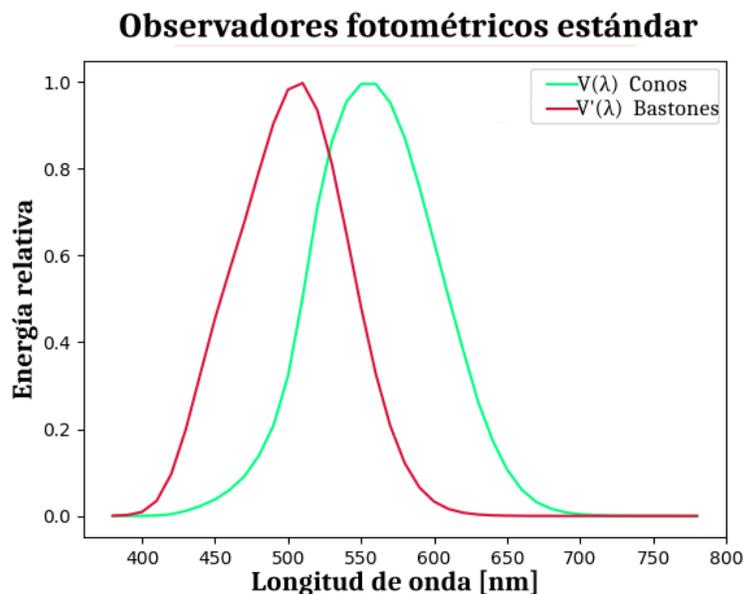


Figura 1.7: Funciones de eficiencia luminosa para el observador fotópico y escotópico aceptados por la CIE

En 1924 la CIE estableció el observador fotópico estándar como la función de eficiencia luminosa espectral $V(\lambda)$ para la visión fotópica, y en 1951 estableció el observador escotópico estándar como la función $V'(\lambda)$ [1]. Ambas funciones se muestran en la Figura 1.7.

1.2. Trinomio de color

Para percibir el color de un objeto tenemos que iluminarlo con la parte visible del espectro electromagnético, de modo que parte de la energía por él reflejada llegue al ojo humano donde se encuentran las células detectoras de la luz (fotorreceptores).

En el fondo del ojo humano esta detección es realizada por células como con 3 fotopigmentos que específicamente detectan las longitudes de onda largas (el rojo), longitudes de onda intermedias (el verde) y longitudes de onda cortas (el azul). Es decir, todo estímulo luminoso es detectado como un trinomio visual, es decir, que se detecta en 3 diferentes canales. Es por esta naturaleza fisiológica de detección en tres canales que se proponen 3 primarios (R, G, B), tres atributos, tres variables, tres coordenadas cromáticas para especificar un color.

El algoritmo propuesto por la colorimetría para calcular estos números, es la ecuación de valores triestímulo (nótese el nombre) la cual proporciona la triada de números (X, Y, Z) asociada al color de un objeto que se calcula por la ecuación (1.4)

$$\begin{aligned} X &= k \sum \rho(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta(\lambda) \\ Y &= k \sum \rho(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta(\lambda) \\ Z &= k \sum \rho(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta(\lambda) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Donde $\rho(\lambda)$ es el espectro reflejado¹ por el objeto, $S(\lambda)$ es el contenido espectral de la fuente que lo ilumina y $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$ son las funciones que caracterizan las propiedades de detección de cada canal del observador [1]. Estas funciones son conocidas como los Valores Triestímulo del Observador Estándar y aunque la detección del color depende de cada individuo la colorimetría tuvo que establecer un estándar para representar y cuantificar al observador. Esta cuantificación se encuentra ya dentro del campo de la psicofísica.

Es importante señalar algunas peculiaridades de las ecuaciones (1.4) para el cálculo de los valores triestímulo de un objeto.

- i) Son ecuaciones discretas, la sumatoria es a lo largo del espectro visible pero el ancho de banda $\Delta\lambda$ es tabulado de 10 en 10 nanómetros, debido a que el límite de

¹De igual manera puede trabajarse en transmisión si el objeto es translúcido o transparente

resolución del ojo para efectivamente resolver entre un color espectral y su vecino es de al menos 10nm a lo largo de todo el espectro visible.

- ii) Como puede verse, para obtener los valores triestímulo se están considerando las propiedades de reflexión del objeto $\rho(\lambda)$, las de emisión de la fuente que lo está iluminando $S(\lambda)$ y las de detección del observador humano $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$.

La determinación del Observador Estándar Colorimétrico es la propuesta experimental para cuantificar las curvas de respuesta del observador humano a través de las funciones $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$, y el algoritmo que se propuso para esta cuantificación es simple. Si todo estímulo de color es detectado por 3 canales de detección (R, G, B) , entonces cualquier color se puede lograr mezclando 3 fuentes primarias en cantidades adecuadas de luz (R, G, B) .

Pensemos en que los estímulos de color son cada una de las bandas del espectro visible de una fuente de luz blanca². Si toda banda de este espectro es detectada por tres canales, entonces cualquier banda del espectro puede ser generada por la mezcla en cantidades adecuadas de 3 fuentes de luz primarias, una roja, una verde y una azul. De este modo cada banda del espectro podrá ser definida por 3 números, la cantidad de energía requerida de cada primario para sintetizarla, a estos tres números se les llama los valores triestímulo (de cada banda).

El experimento del Observador Estándar consiste entonces en un monocromador y un mezclador RGB. Con el monocromador se debe obtener la descomposición espectral de la fuente de luz blanca de manera que se le presenten banda por banda a un observador humano al cual se le pide que utilice la mezcla de las 3 fuentes primarias hasta que logre igualar una a una cada banda del espectro de la fuente.

El experimento original del Observador Estándar se realizó desde principios del siglo XX por dos coloristas ingleses de manera independiente, W. D. Wright (1928-1929) y J. Guild (1930) y sus resultados son reportados a la colorimetría por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas en francés) como el Observador Colorimétrico Estándar 1931 para un campo visual de 2°³ [1].

El objetivo de esta tesis fue repetir el experimento del Observador Estándar por diferentes razones.

- i) Realizar el experimento con observadores latinos, incluyendo hombres y mujeres y haciendo el tamaño de muestra mayor a la de los experimentos originales.
- ii) Utilizar un monocromador con rejilla de difracción (Guild y Wright utilizaron prismas y filtros de gelatina en sus dispositivos experimentales).

²Cada una de ancho de banda de 10nm

³El campo visual de 2° depende del tamaño angular (en el fondo del ojo) de los estímulos luminosos utilizados en el experimento

- iii) Sintetizar una fuente equienergética para llevar a cabo el experimento. Los experimentos de Guild y Wright requerían una fuente de luz blanca equienergética (para hacer el experimento independiente de la fuente), con la cual ellos no contaron, sino que utilizaron factores de ajuste respecto a una fuente blanca igualada.
- iv) Realizar el experimento por los dos métodos y comparar los resultados obtenidos por utilizar una fuente equienergética y una fuente de referencia con factores de ajuste respecto a ella.
- v) Porque se han reportado discrepancias entre lo observado y el estándar publicado por la CIE [13]

La redeterminación de los valores triestímulo es esencial para la colorimetría, los valores triestímulo son la base de la cuantificación del color y sin la existencia de estos datos no sería posible medir el color, por lo tanto, la reproducibilidad del color estaría comprometida. Desde el punto de vista de la industria, el control de calidad del color sería inexistente o se realizaría de manera imprecisa. Aunque la colorimetría sea una rama muy apegada a la industria, el color es parte del día a día de la sociedad. Así como los colores se producen más sofisticadamente, los consumidores exigen mejor reproducibilidad del color [6].

El que existan discrepancias entre lo observado y lo publicado también es una señal de necesidad de revisar los estándares, pues si la base de la cuantificación del color está construida bajo datos incorrectos o imprecisos, la medición en general estaría operando bajo un error que se va propagando en cada transformación y en cada avance de la colorimetría. En este trabajo se encuentran comportamientos aún más inesperados que se deben estudiar más profundamente con la esperanza de que los resultados pudiesen influir para la mejoría de la colorimetría.

1.3. Teoría Tricromática

1.3.1. Introducción

Antes se mencionó que la manera en que se percibe el color es por la estimulación de los conos rojo, verde y azul. De este modo cualquier estímulo de color Q se puede expresar como combinación lineal de los estímulos R , G y B donde a estos estímulos se les denomina estímulos primarios [16]. Un estímulo primario se puede escoger si cada uno de ellos no puede ser igualado al mezclar 2 de los otros estímulos primarios. Es decir, para un estímulo primario no hay una combinación tal que otros 2 estímulos primarios lo igualen. Así la relación buscada es

$$Q = RR + GG + BB \quad (1.5)$$

donde R , G y B son valores que indican la luminosidad que un observador requiere para igualar el estímulo de color Q en términos de cada estímulo primario. A la triada

de coeficientes (R, G, B) se les denomina valores triestímulo.

Partiendo de esta primera definición, se puede ver que dos estímulos de color Q_1 y Q_2 se perciben como iguales si

$$Q_1 = Q_2$$

esto es que estimulen de manera equivalente a cada uno de rojo, verde y azul.

La selección de los estímulos primarios **R**, **G** y **B** no es del todo arbitraria. La finalidad de los estímulos primarios es intentar conseguir igualar todos los colores del espectro visible al mezclarlos modificando la luminosidad de cada uno, sin embargo, no se han encontrado un conjunto de primarios absolutos [16]. Si se tomarán, por ejemplo, un conjunto de estímulos que contengan como hue dominante, azul, amarillo y rojo, es posible determinar un estímulo de color Q tal que se pueda igualar con la combinación lineal de estos. Entonces, la justificación proviene al encontrar que los estímulos R, G y B generan mayor cantidad de colores, puntualmente, ningún conjunto de primarios puede generar todos los colores, por tanto, la existencia de estímulos primarios absolutos se descarta [16]. Para lidiar con este problema se requiere la introducción de coeficientes r, g y b tal que alguno de ellos sea negativo. Este resultado en el experimento del observador estándar se discutirá más adelante.

A continuación, se enuncian las leyes tricromáticas o principios de Grassman [1]

Principios de Grassman

Dos estímulos Q_1 y Q_2 , con diferente composición espectral pueden ser percibidos visualmente como idénticos. En este caso, se dice que los estímulos son metámeros, lo cual se representa como $Q_1 \equiv Q_2$ [26]. De aquí se puede enunciar lo siguiente

i) *Ley de simetría:*

Si un estímulo Q_1 coincide con un estímulo Q_2 , entonces el estímulo Q_2 coincide con Q_1

$$\text{Si } Q_1 = Q_2 \Rightarrow Q_2 = Q_1$$

ii) *Ley transitiva:*

Si Q_1 coincide con Q_2 y Q_2 coincide con Q_3 , entonces Q_1 coincide con Q_3

$$\text{Si } Q_1 = Q_2 \text{ y } Q_2 = Q_3 \Rightarrow Q_1 = Q_3$$

iii) *Ley de proporcionalidad:*

Si Q_1 coincide con Q_2 , entonces al multiplicar ambos por una constante α tal que $\alpha > 0$, ambos nuevos estímulos coinciden

$$\text{Si } Q_1 = Q_2 \Rightarrow \alpha Q_1 = \alpha Q_2$$

iv) *Ley aditiva:*

Sean Q_1, Q_2, Q_3 y Q_4 estímulos de color, donde Q_1 coincide con Q_2 y Q_3 coincide con Q_4 , entonces la suma de Q_1 con Q_3 coincide con la suma de Q_2 con Q_4

$$\text{Si } Q_1 = Q_2 \text{ y } Q_3 = Q_4 \Rightarrow Q_1 + Q_3 = Q_2 + Q_4$$

Ahora supongáse que Q_1 y Q_2 son dos estímulos de color diferentes, específicamente

$$Q_1 = R_1\mathbf{R} + G_1\mathbf{G} + B_1\mathbf{B} \quad (1.6)$$

$$Q_2 = R_2\mathbf{R} + G_2\mathbf{G} + B_2\mathbf{B} \quad (1.7)$$

que al sumarlos se obtiene un nuevo estímulo de color Q_3 tal que

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = (R_1 + R_2)\mathbf{R} + (G_1 + G_2)\mathbf{G} + (B_1 + B_2)\mathbf{B} \quad (1.8)$$

Descartando a los observadores que no tienen una visión tricromática sana, es oportuno enunciar dos consideraciones importantes a la hora de igualar el color. La primera es tomar en cuenta las condiciones de observación, es decir, la igualación de un estímulo de color puede cambiar si se altera el campo de visión del observador; la segunda dice que la percepción del color de dos estímulos igualados puede verse afectada por una exposición previa a la luz, en particular si el estímulo es muy luminoso [1].

Retomando la ecuación (1.5), tenemos que un estímulo de color Q está representado por los estímulos primarios, pero no definido de manera unívoca.

Dados los valores triestímulos R , G y B calculados con un conjunto de primarios \mathbf{R} , \mathbf{G} y \mathbf{B} , un nuevo conjunto de valores triestímulos basados en otro conjunto de primarios \mathbf{R}' , \mathbf{G}' y \mathbf{B}' está dado como [17]

$$\begin{aligned} \mathbf{R}' &= R_{\mathbf{R}}\mathbf{R} + G_{\mathbf{R}}\mathbf{G} + B_{\mathbf{R}}\mathbf{B} \\ \mathbf{G}' &= R_{\mathbf{G}}\mathbf{R} + G_{\mathbf{G}}\mathbf{G} + B_{\mathbf{G}}\mathbf{B} \\ \mathbf{B}' &= R_{\mathbf{B}}\mathbf{R} + G_{\mathbf{B}}\mathbf{G} + B_{\mathbf{B}}\mathbf{B} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Como se dijo anteriormente, el principio sobre el cual se fundamenta la teoría tricromática es que los colores de cualquier hue y cromaticidad pueden ser producidos al mezclar un conjunto de primarios en ciertas proporciones dentro de una región acotada. Cada uno de estos colores se puede representar como un punto en la región delimitada.

En la Figura 1.8, se muestra el lugar geométrico de los colores espectrales puros. Una propiedad fundamental es que cualquier mezcla de dos constituyentes generará un color que se representa dentro de la línea recta que une a los constituyentes y su posición dentro de la línea dependerá de las proporciones de estos. Se sigue por corolario que para tres constituyentes, todos los colores que sean consecuencia de la mezcla se representan en el interior del triángulo que se forma por las líneas rectas entre cada par de constituyentes. Aún más, si se toman n constituyentes, se tiene que todos los colores generados en la mezcla estarán dentro del polígono generado por las rectas de cada par de constituyentes. Dada la naturaleza del ojo humano, se toman sólo tres primarios que corresponden a las aristas del triángulo de color. La curva que envuelve al triángulo corresponde al espacio de color y corresponde a todas las sensaciones de color del espectro, su forma y localización depende del conjunto de primarios que se utilicen, pero

es invariante a transformaciones puramente matemáticas.

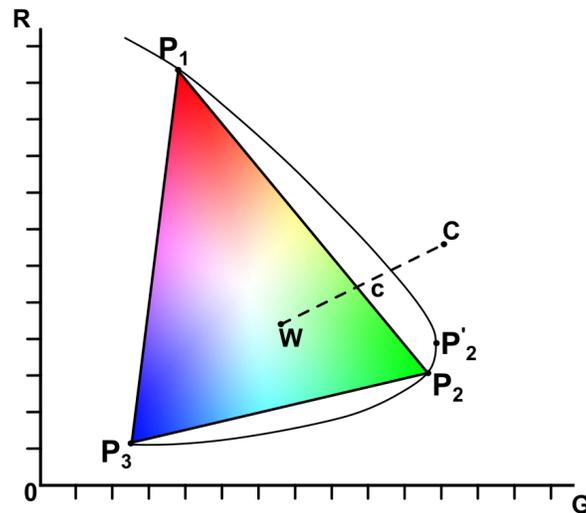


Figura 1.8: Triángulo de color y colores espectrales, los colores posibles se encuentran dentro del triángulo con los primarios en los vértices. [18]

En la práctica, no se ha encontrado un instrumento (colorímetro), tal que se puedan igualar todos los colores posibles, para entender las limitaciones experimentales, se puede suponer que se tienen 3 primarios muy cromáticos P_1, P_2, P_3 , pero como se puede notar en la Figura 1.8, las regiones exteriores al triángulo de color no pueden ser igualadas, tal como el estímulo de color C , de hecho el color más cromático que se puede producir con el mismo hue es c , al combinar solamente P_1 y P_2 , cualquier nueva mezcla que involucre a P_3 sólo incrementará la diferencia. Los lados del triángulo representan los colores más cromáticos que se pueden obtener por la mezcla de 2 primarios, lo que significa que siempre que exista una mezcla, el color resultante tendrá menos saturación y por ende se explica por qué los colores fuera del triángulo no se pueden igualar [18].

Si ahora se cambia uno de los primarios con tal de obtener colores más cercanos al espectro, por ejemplo, sea P'_2 un nuevo primario que sustituye a P_2 , entonces los colores generados al mezclar P_1 y P'_2 son más cercanos en saturación a la curva en la región derecha, pero la línea constituida entre P_3 y P'_2 se aleja de la curva en la región inferior, de la misma manera si se sustituye otro primario, por lo que la selección óptima de los primarios no es clara. Sin embargo, se exige como condición que la selección de P_1, P_2 y P_3 cumpla la condición de estímulo primario y que además se pueda generar el blanco W , para poder producir colores de cualquier hue [18].

1.3.2. Observador estándar

Experimento del Observador Estándar de 1931

Desarrollado principalmente por el trabajo de John Guild y William David Wright, cada uno de manera individual, llegando a la conclusión de tomar los estímulos primarios de Guild y los resultados a publicar como el promedio de los datos entre ambos experimentos [19]. El objetivo principal del experimento es brindar las herramientas necesarias para la cuantificación del color, encontrando la relación entre los estímulos de color y la detección tricromática del ojo humano. El resultado del experimento implica la obtención de la cantidad de energía requerida por cada cono rojo, verde y azul para poder igualar un estímulo de color arbitrario “Q”.

En orden cronológico, Guild comenzó, aproximadamente en 1929, a realizar el experimento del observador estándar con un campo visual de 2° , donde utilizó un colorímetro espectral diseñado por él y construido por Adam Hilger, las principales características de este colorímetro son el uso de bandas espectrales con una fuente incandescente, la obtención de los primarios con filtros de gelatina, el control de la intensidad de cada primario por medio de perillas giratorias graduadas que permiten un cálculo preciso y el campo de visión subtiende un ángulo de 2° en el fondo del ojo [20].

Wright utilizó un colorímetro utilizando primarios espectrales, es decir, los estímulos primarios que utilizó provienen de la descomposición de una fuente de luz blanca, la atenuación de la energía en esta determinación se obtuvo utilizando placas de vidrio con tinta neutra, es decir, que no tienen tendencia a absorber alguna longitud de onda en particular. Los estímulos primarios corresponden a las longitudes de onda $650nm$, $530nm$ y $460nm$ [17].

El experimento consiste en mostrar un estímulo de color, por ejemplo, el correspondiente a $380nm$ con un ancho de banda de $10nm$, el observador entonces modifica las intensidades de los primarios⁴ hasta igualar el estímulo mostrado, los valores de la intensidad requerida en cada primario son los valores triestímulo. Este procedimiento se repite para $390nm$, $400nm$, . . . , $780nm$.

Como se mencionó anteriormente, la falta de un conjunto de primarios absoluto generó dificultades para la medición de ciertas regiones del espectro visible. Ambos investigadores, requirieron el uso de coeficientes negativos en al menos uno de los estímulos primarios para lograr la igualación de color.

Dadas las condiciones para generar los estímulos primarios por ambos investigadores, se advierte que existe diferencia en la selección de los mismos. Aún bajo este hecho, la transformación de los valores triestímulo a partir de estímulos primarios a otro conjunto de estímulos primarios está dada por la transformación (1.9)

⁴En el experimento hecho para este trabajo el cambio de intensidad se realiza moviendo el voltaje de la fuente de poder.

La publicación de la CIE de 1931 que a partir de los trabajos de Guild y Wright convirtió sus resultados en el estándar de los valores triestímulo, obtuvo uno de los resultados más importantes en la ciencia del color. Experimentos posteriores, incluyendo los experimentos de Stiles, Burch y Speranskaya, que la CIE en 1964 volvieron un estándar para un campo visual de 10° , se basa en el trabajo de Guild y Wright. A continuación, se estudian a detalle los trabajos de ambos investigadores de manera independiente.

Experimento de W. D. Wright (1929)

En esta sección se detalla el trabajo por Wright revisando principalmente su trabajo publicado en “*A Re-determination of the Trichromatic Coefficients of the Spectral Colours, Wright [21]*” y en “*A tricromatic Colorimeter with Spectral Primaries. [22]*”

Como se ha mencionado antes, Wright representa un estímulo de color como

$$Q = RR + GG + BB \quad (1.10)$$

normalizando al tomar $R + G + B = 1$

Una propiedad que se sigue de la tercera ley de Grassman, la ley de proporcionalidad, es que si se tiene un estímulo de color Q_1 igualado con estímulos primarios y coeficientes R_1 , G_1 y B_1 , al aumentar proporcionalmente los coeficientes se obtiene el mismo color Q_1 simplemente con mayor luminosidad.

Cuando se cumple la condición $R + G + B = 1$, entonces se dice que la cantidad de color corresponde a una unidad tricromática (1 T).

Suponga que se igualó un estímulo Q_1 y Q_2 con sus respectivos factores, encontrando en ambos 1T. Si se mezclan estos colores, se encuentra un nuevo color Q_3 con 2T.

Wright propone algunas consideraciones teóricas, donde resalta que para igualar el blanco⁵, se requiere la misma proporción de los estímulos primarios. Es decir,

$$W = \frac{1}{3}\mathbf{R} + \frac{1}{3}\mathbf{G} + \frac{1}{3}\mathbf{B} \quad (1.11)$$

Experimentalmente, se nota que igualar el blanco espectral requiere diferentes cantidades de los primarios espectrales.

Para determinar las unidades de los primarios se iguala el blanco en función de la mezcla de los primarios del colorímetro, con esto, entonces se corrigen las lecturas dadas por el instrumento al multiplicar por factores tal que para esta igualación el valor de

⁵El blanco que se iguala corresponde al blanco de la fuente que se utiliza para generar el espectro visible.

los 3 primarios sea igual. Como ejemplo, se supone una igualación al blanco por un colorímetro que es controlado por la variación de las aperturas angulares tal que la lectura de los primarios corresponde a

$$\begin{aligned}R &= 30^\circ \\G &= 15^\circ \\B &= 60^\circ\end{aligned}$$

Entonces, para que los estímulos se igualen se debe aplicar un factor de 4 para el verde y un factor de 2 para el rojo. Luego, de la misma manera, se supone que si para un estímulo de color Q se obtienen las lecturas $R = 40^\circ$, $G = 10^\circ$ y $B = 20^\circ$, entonces con los factores aplicados, la lectura se transforma en $R = 80^\circ$, $G = 40^\circ$ y $B = 20^\circ$. Como la suma de los coeficientes es 140, al normalizar, se obtiene que los coeficientes tricromáticos para el estímulo de color arbitrario Q es

$$Q = 0.571\mathbf{R} + 0.286\mathbf{G} + 0.143\mathbf{B} \quad (1.12)$$

Para todas las lecturas que se realizan se aplican los factores correspondientes a la igualación con el blanco, el conjunto de factores depende del observador que haya hecho la igualación. El utilizar estos factores en cada medición compensa la diferencia entre la potencia radiante de los primarios, así como las diferencias entre la sensibilidad del ojo humano de cada observador.

Suponiendo que dos observadores encuentran un blanco w_1 y w_2 respectivamente, ver 1.9. tal que sus lecturas para los valores triestímulo se basen en la igualación de dicho blanco, se tendrán entonces dos lugares geométricos. Sin embargo, las posiciones relativas en el triángulo de color se mantienen, encontrando el mismo locus espectral en ambos casos. Este resultado apoya nuevamente el procedimiento de Wright de utilizar factores adecuados para las lecturas de los valores triestímulo. Wright explica que cambios en la igualación del blanco se pueden deber al pigmento amarillo del ojo, llamado “Macula Lutea”. Hasta ese momento, el pigmento no se había estudiado de manera aislada, por lo que no se reportó detalle sobre este en los resultados.

También de la Fig. 1.9. se puede observar que la característica del diagrama cromático de tener una forma parecida a una herradura se debe a los coeficientes negativos. Específicamente, la prominencia ⁶ de la izquierda del eje “verde” se debe a los colores espectrales que para su igualación requirieron una cantidad negativa de rojo (estímulo primario). La prominencia que sobresale de la hipotenusa se debe a los colores espectrales que para su igualación requirieron una cantidad negativa de azul (estímulo primario).

Para hacer las mediciones de los coeficientes espectrales, Wright creó un instrumento especial llamado “colorímetro”, este instrumento se describe a partir de Fig. 1.10 donde el plano del instrumento y la elevación se muestran.

⁶“bulge” referenciado así en (Wright,1929) [21]

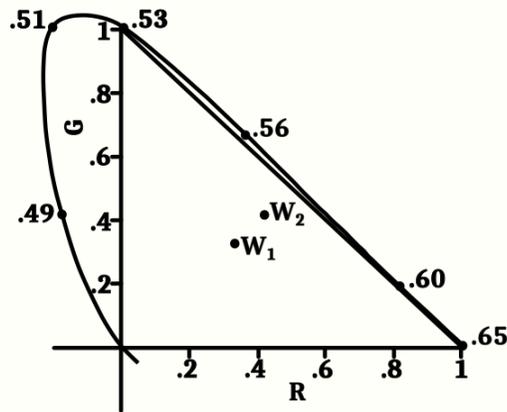


Figura 1.9: 2 diferentes blancos encontrados por los observadores en el diagrama cromático.

- S: Ranura de entrada
- C: Lente colimador
- A: Prisma
- D: Prisma en ángulo recto
- T_1 : Lente objetivo

El funcionamiento de este instrumento comienza arriba de S, donde se tiene la fuente de luz, se enfoca en la apertura de colimación y se colima en C. En D el haz se separa, donde la mitad del haz atraviesa los prismas A. Después de pasar por los prismas, la mitad superior del haz pasa por T_1 formando un espectro en W_1 , la mitad inferior del rayo se refleja con un ángulo de 90° por el prisma R_1 y se enfoca en T_2 , produciendo un segundo espectro en W_2 .

En W_1 se encuentran dos prismas que reflejan el haz, estos prismas corresponden al color de prueba $T.C.$ y al color de desaturación $D.C.$, pasa por el objetivo T_1 y abajo de R_1 y arriba de R_2 para luego pasar por los dos prismas A. En W_2 también se encuentran 3 prismas de 180° que reflejan las 3 porciones del espectro que se eligen como los primarios, estos pasan por el objetivo T_2 y son reflejados por el prisma de 90° R_2 estos pasan por los prismas A de 60° . Los rayos reflejados de W_1 y W_2 ya mencionados, se reflejan en D atravesando el prisma P.

El prisma P consiste en 2 prismas juntos con una mitad de la superficie de contacto metalizada, en Fig. 1.10, se muestra como mn . Esto hace que ambos rayos se mantengan paralelos, creando un campo bipartito separados por una línea, el tamaño del haz se modula en K que corresponde a una apertura rectangular. En E el ojo del observador puede observar el campo de visión enfocado por el objetivo O.

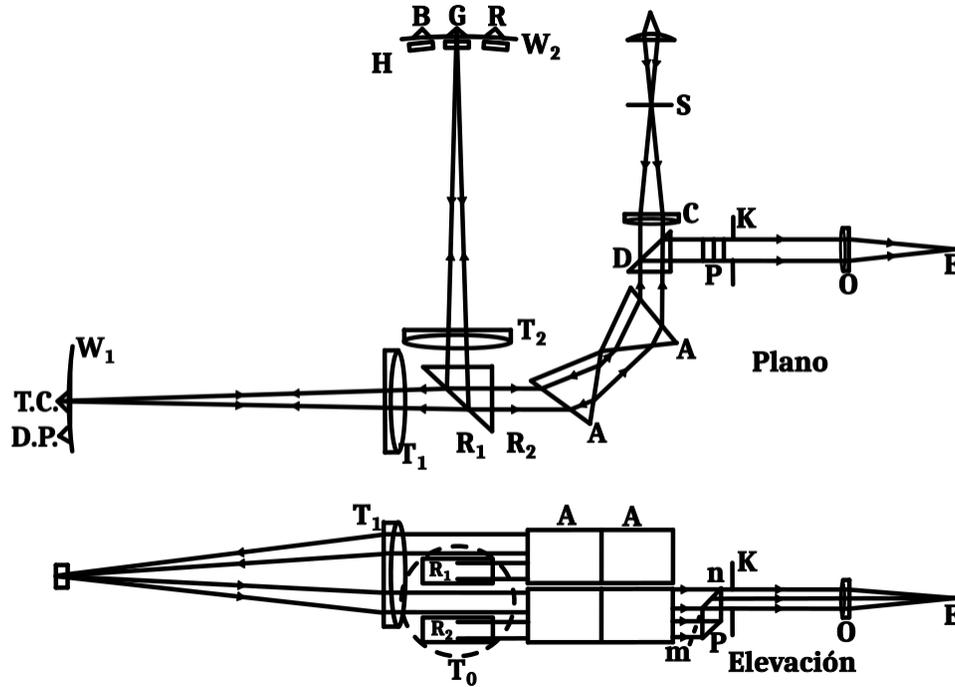


Figura 1.10: Plano original del colorímetro creado por Wright para obtener los valores triestímulo.

Los primarios que se utilizan para igualar tienen una longitud de onda dominante en $650nm$, $530nm$ y $460nm$ donde los anchos de banda son $6nm$, $3.5nm$ y $1.6nm$ respectivamente.

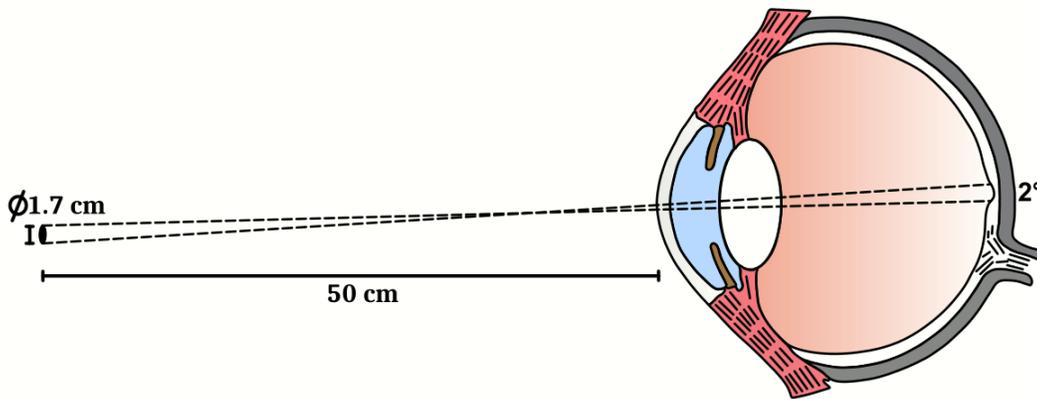


Figura 1.11: Condiciones para sostener un campo visual de 2°

La proyección se realizó con 2 rectángulos iguales sosteniendo 2° en el ojo, acorde a Guild [1]. Esto se puede observar en la figura 1.11, aquí se observa que la imagen se

proyecta en la fovea ⁷.

La fuente utilizada fue una lámpara de 1000 Watts estandarizada por el Laboratorio Nacional de Física ⁸ generó un blanco que tiene una distribución similar a un cuerpo negro radiando a 5000K. En la Figura 1.12, se muestra la distribución correspondiente a la fuente NPL-White.

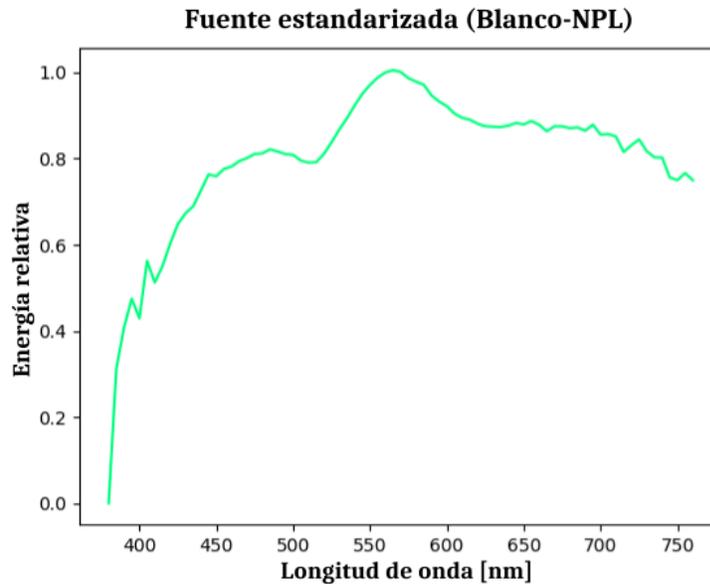


Figura 1.12: Distribución espectral de la fuente estandarizada NPL-white

Los resultados que obtuvo Wright en 1929 ya normalizados se pueden ver en la Tabla 1.1. Para una muestra de 10 observadores, las curvas correspondientes sobrepuestas generan una curva con la misma forma. Por lo que se puede entonces encontrar una curva promedio de los coeficientes tricromáticos, ahora conocidos como valores triestímulo.

⁷Esto sólo es una representación esquemática del fenómeno.

⁸National Physics Laboratory white

Coeficientes Tricromáticos			
Longitud de onda [λ]	R (650nm)	G (530nm)	B (460nm)
410	.051	-0.047	0.996
430	0.045	-0.043	0.998
450	0.021	-0.024	1.003
460	0	0	1.000
470	-0.031	0.057	0.974
480	-0.094	0.182	0.912
490	-0.170	0.0420	0.750
500	-0.233	0.772	0.461
510	-0.207	1.0002	0.205
520	-0.111	1.049	0.062
530	0	1.000	0
540	0.123	0.901	-0.024
550	0.232	0.797	-0.029
560	0.354	0.676	-0.030
570	0.480	0.543	-0.023
580	0.604	0.414	-0.018
590	0.720	0.290	-0.010
600	0.811	0.196	-0.007
610	0.881	0.124	-0.005
620	0.929	0.075	-0.004
630	0.966	0.037	-0.003
640	0.988	0.014	-0.002
650	1.000	0	0
680	1.011	-0.011	-
700	1.015	-0.015	-

Tabla 1.1: Coeficientes espectrales encontrados en el experimento del observador estándar de 1931 por Wright [21]

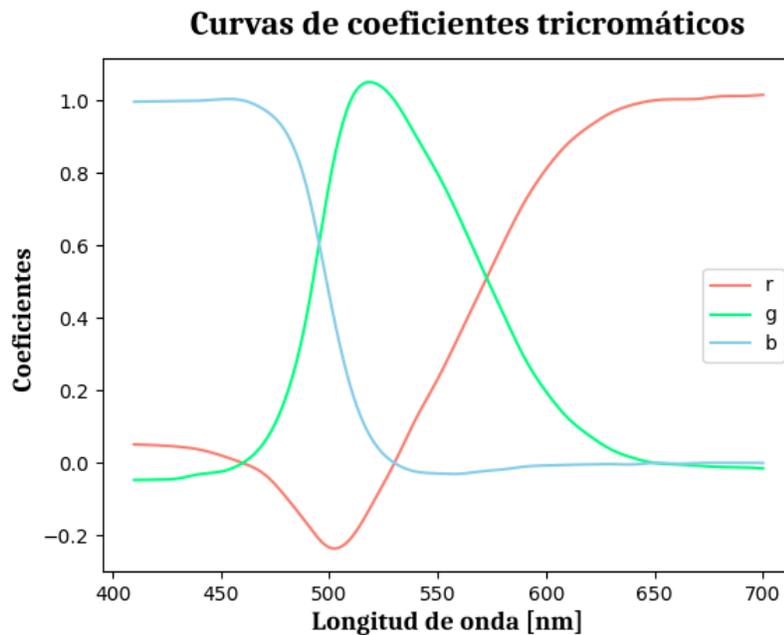


Figura 1.13: Curvas de los coeficientes espectrales

Los resultados numéricos se muestran en la Figura 1.1. Estos coeficientes triestímulo se publicaron como el promedio de los 10 observadores [21].

A partir de la serie de datos se obtuvieron, las curvas correspondientes a los coeficientes encontrados al realizar el experimento del observador. Como se puede ver, la tabla tiene valores faltantes, $\lambda = 420, 440, 660, 670, 690nm$. Sin embargo, se considera necesario mostrar los resultados publicados por Wright, por lo que se interpolaron los valores faltantes usando splines cúbicos [23] y se graficó la curva promedio con la finalidad de poder mostrar el resultado final.

En la Figura 1.15 se puede observar que los coeficientes toman valores negativos y que para el estímulo primario rojo se tienen los valores más negativos.

Wright hace una serie de conclusiones que son importantes de resaltar.

- i) Un estudio más amplio sobre el pigmento macular es necesario, se sospecha que dicho pigmento puede causar cambios en la percepción del hue.
- ii) Las curvas espectrales coinciden con los resultados publicados por König & Abney.
- iii) Se requiere información y datos sobre la luminosidad relativa de un ojo “normal” estandarizado.
- iv) Se requieren determinaciones sobre sensibilidad. Para la saturación cuando se encuentra el Hue constante y viceversa.

Experimento de J. Guild

Aquí se revisará el trabajo de Guild que se estudia en *The Colorimetric Properties of the Spectrum*, Guild [20].

La motivación de Guild es obtener la propiedad colorimétrica del ojo humano, se sabe que dos conjuntos de datos describen el comportamiento del ojo humano en cuanto a eficiencia luminosa y en color, esto en función de la longitud de onda, para radiación monocromática a lo largo del espectro visible. La primera de las funciones corresponde a la luminosidad relativa del espectro visible, y la segunda una curva que muestre el comportamiento del sistema tricromático y muestre el locus del triángulo de color.

La curva de luminosidad de la que habla Guild es la misma curva de eficiencia luminosa $V(\lambda)$ aceptada en 1924 por la C.I.E., esta función, la cual se discutió previamente en (1.3), muestra las propiedades fotométricas del ojo humano. En cuanto a la función que describe las propiedades colorimétricas del ojo, poco se ha logrado en cuanto a precisión. Estudios previos, realizados por diferentes investigadores, entre los que destacan König y Abney [20], son criticados por falta de precisión y por escaso de 7 observadores. Los datos no se publicaron para usos generales debido a que el grupo no era representativo para aproximar correctamente el comportamiento normal del ojo humano.

Wright usando un método y aparato propio, realiza el experimento del observador estándar con 10 observadores y obtiene los coeficientes tricromáticos que coinciden con los obtenidos por los 7 observadores en el Laboratorio Nacional de Física (N.P.L.), ubicado en Reino Unido. Aún siendo un grupo igualmente pequeño, al coincidir con los resultados anteriores, se complementa, obteniéndose una mejor aproximación del ojo normal. Esto se publica en 1929, antecedendo el trabajo de Guild.

Para realizar el experimento, Guild diseñó un colorímetro y que luego fue construido por Adam Hilger. Este colorímetro tiene dos objetivos, dividir el campo de visión tal que, en el lado de igualación (match side) se puedan agregar los tres estímulos primarios del instrumento en cantidades variables; en el lado de prueba (test side) la posibilidad de agregar un color de manera que desature el estímulo de prueba cuando este no se pueda igualar.

El instrumento puede ser descrito a partir de la Figura ???. El diagrama o plano del instrumento corresponde a la mitad izquierda del diagrama y el acercamiento de la parte frontal del instrumento se muestra en la parte derecha

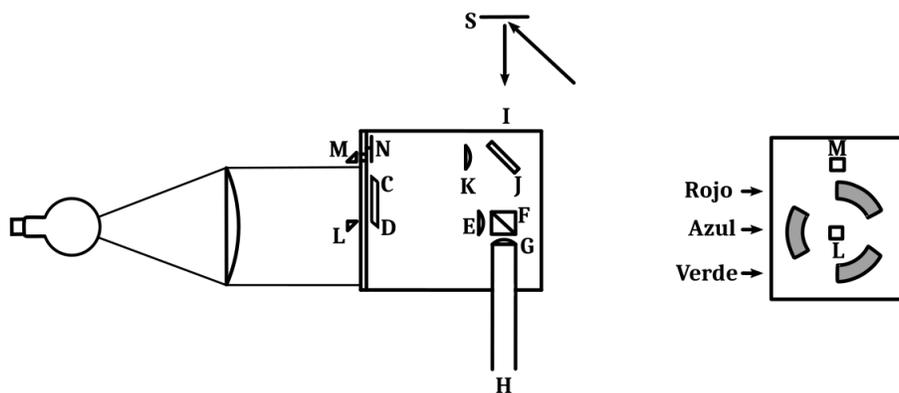


Figura 1.14: Diagrama del colorímetro diseñado por Guild [18]

La fuente fue una "Fullolite lamp" de 100 watts hecha por Messrs Edison Swan Electric Co. Esta lámpara tiene la propiedad de hacer luz difusa, por lo que se considera un haz uniforme en todas direcciones, esta lámpara se sitúa detrás de una lente convergente de 15 cm de diámetro y distancia focal de aproximadamente 30 cm. En la lente se forma un haz circular que se considera colimado y que ilumina la zona central que se muestra a la derecha del diagrama, esta zona tiene aperturas de 59° (sombra) por donde puede atravesar la luz, en cada apertura se encuentra también un filtro de gelatina rojo, verde y azul, respectivamente.

Dentro de la caja, se encuentra un prisma CD , el cual puede rotar sobre el eje DE , La sección C al rotar puede estar en cualquiera de las aperturas, cuando pasa esto, la luz

en C se refleja internamente y sale por D en dirección E . E es un lente que mantiene enfocado la apertura circular de CD . F es un prisma fotométrico que provee el campo de visión. G es un lente con foco en H . H es donde el observador puede ver el reflejo de la sección del campo de visión iluminado por la luz que entra por C , el observador ve entonces los colores rojo, verde y azul sucesivamente por la rotación, cuando la velocidad de rotación es alta los colores se pueden mezclar. Cada apertura tiene un obturador modulable, tal que la duración de cada color puede aumentarse o disminuirse, creando así mezcla de diferentes colores. El color de prueba entra por la apertura I que cubre la mitad del campo de visión en F .

Para desaturar el color de prueba, la luz de la fuente se refleja a 45° por los prismas que se encuentran en L y M , por donde pasa por una apertura, seguido por un filtro regulador de gelatina negra, este pasa por el lente colimador K y se refleja en J hacia el prisma fotométrico en F . Cabe resaltar que para desaturar el color de prueba, se pueden agregar filtros de color entre los prismas L y M .

Para medir los valores triestímulo se utiliza una escala grabada con una escala de $.5^\circ$ que corresponde a la apertura en la placa frontal de la caja.

Como el ojo se sitúa a 25 cm del campo de visión, se subtende un ángulo de 2° , este se justifica por estar centrado en la mácula y por tener una dimensión similar al campo de visión que se utiliza para medir el brillo con el método de Flicker.

Bajo las consideraciones mencionadas antes sobre la selección de los primarios para el instrumento, se eligieron $B = 440nm$, $G = 530nm$ un verde tal que minimice los valores negativos causados por las regiones fuera del triángulo, $R = 630nm$ el cuál era indistinguible del estímulo monocromático de esa misma longitud de onda.

En el momento de las igualaciones, en caso de no poder igualar el color de prueba con los tres primarios, se puede agregar un filtro primario en S a manera de desaturar el estímulo de prueba, en otro caso, cuando la luz en S es muy intensa, se puede alejar la fuente o poner un filtro sin color. De la misma manera, si la luz de S es muy tenue, las mediciones de los valores triestímulo serán imprecisas, se monta un filtro sin color entre la fuente y L .

El experimento se desarrolla con un supervisor, con experiencia en el uso del instrumento, que se encarga de ajustar las longitudes de onda deseadas, regula la intensidad de la luz y determina si es necesario repetir las pruebas en caso de discernir. El observador por su parte debe realizar igualaciones aproximadamente cada $10nm$, reposando la vista después de cada una, así como debe realizar 4 o 5 igualaciones del blanco con tal de que se puedan determinar los factores de los primarios.

Para la muestra de 7 observadores, los resultados del experimento se pueden observar en la superposición de curvas de la Fig. 1.15, estas curvas fueron interpoladas para

1nm de diferencia entre cada longitud de onda.

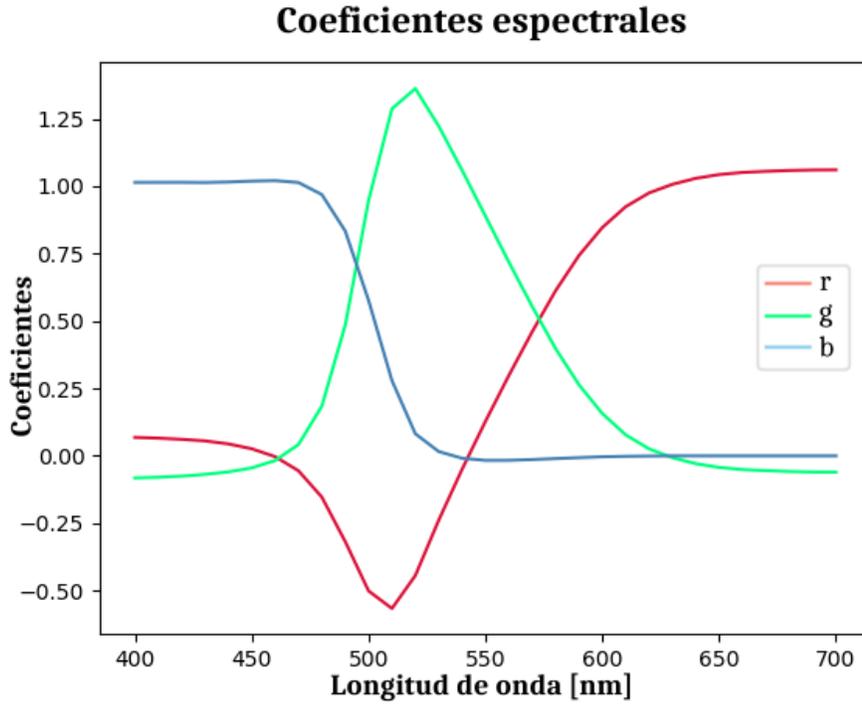


Figura 1.15: Coeficientes tricromáticos encontrados por la muestra de 7 observadores [20]

La CIE usualmente utiliza valores positivos para presentar los coeficientes espectrales, la transformación correspondiente está dada por el siguiente conjunto de ecuaciones, que relaciona el sistema 1931(R,G,B) y el sistema 1931(X,Y,Z).

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{0.49000r + 0.31000g + 0.20000b}{0.66697r + 1.13240g + 1.20063b} \\
 y &= \frac{0.17697r + 0.81240g + 0.011063b}{0.66697r + 1.13240g + 1.20063b} \\
 z &= \frac{0.00000r + 0.01000g + 0.99000b}{0.66697r + 1.13240g + 1.20063b}
 \end{aligned}
 \tag{1.13}$$

De las coordenadas cromáticas x, y, z se pueden encontrar los valores triestímulo X, Y, Z

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{x}{y}V \\
 Y &= V \\
 Z &= \frac{z}{y}V
 \end{aligned}
 \tag{1.14}$$

Donde V es la luminosidad del estímulo calculada de acuerdo a la función de eficiencia luminosa $V(\lambda)$ [1]. La transformación junto con la luminosidad relativa de los primarios genera un conjunto de coeficientes todos positivos, en la Figura 1.16, se observan las funciones de igualación de color dadas por las transformaciones siguientes

$$\begin{aligned}
 \bar{x}(\lambda) &= \frac{x(\lambda)}{y(\lambda)}V(\lambda) \\
 \bar{y}(\lambda) &= V(\lambda) \\
 \bar{z}(\lambda) &= \frac{z(\lambda)}{y(\lambda)}V(\lambda)
 \end{aligned}
 \tag{1.15}$$

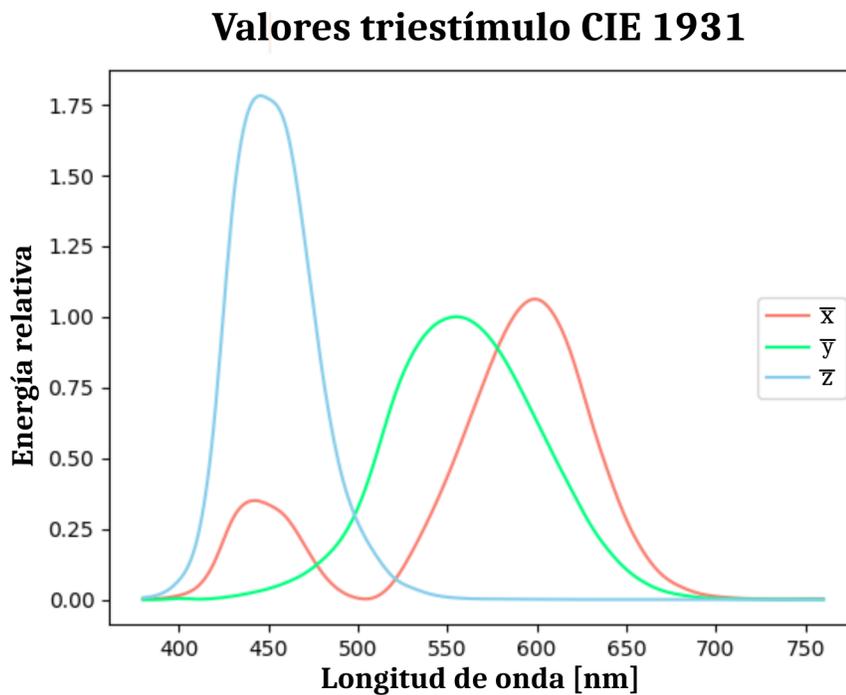


Figura 1.16: Valores triestímulo en función de primarios imaginarios X, Y y Z

Experimento del Observador Estándar de 1964

Primeramente desarrollado por Stiles y Burch, posteriormente por Speranskaya, debido a la preocupación de que el experimento de 1931 no hubiese dado resultados tan válidos como se había creído [1]. Entre las principales razones, el tamaño de la muestra era pequeña y la posibilidad de aplicar la igualación de color con campos visuales mayores, orientado principalmente a la industria de control de producción [1].

Los conjuntos de valores triestímulo de Stiles, Burch y Speranskaya fueron corregidos por la CIE para reducir la intrusión de los bastones en las igualaciones de los estímulos de color. Posteriormente, CIE transformó los conjuntos de datos en función de nuevos primarios $R = 645.2nm$, $G = 526.3nm$ y $B = 444.4nm$ [7].

Los valores triestímulo reportados por la CIE para un campo de visión de 10° se muestran en la Figura 1.17.

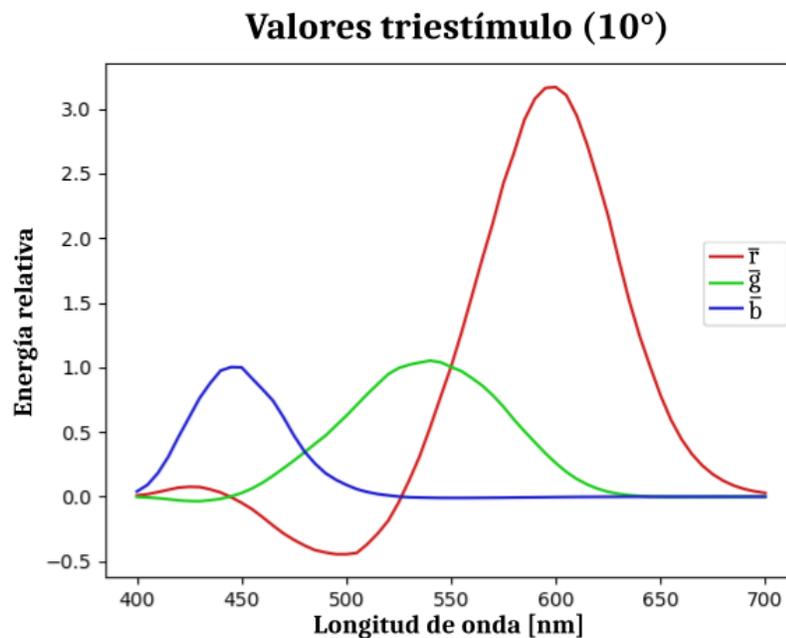


Figura 1.17: Valores triestímulo

En la Figura 1.18 se pueden observar las coordenadas cromáticas, bajo la transformación

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{\bar{r}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} \\
 g &= \frac{\bar{g}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} \\
 b &= \frac{\bar{b}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

donde \bar{r} , \bar{g} y \bar{b} son las funciones de igualación de color que provienen de los valores triestímulo al cambiar de un conjunto de datos a una función.

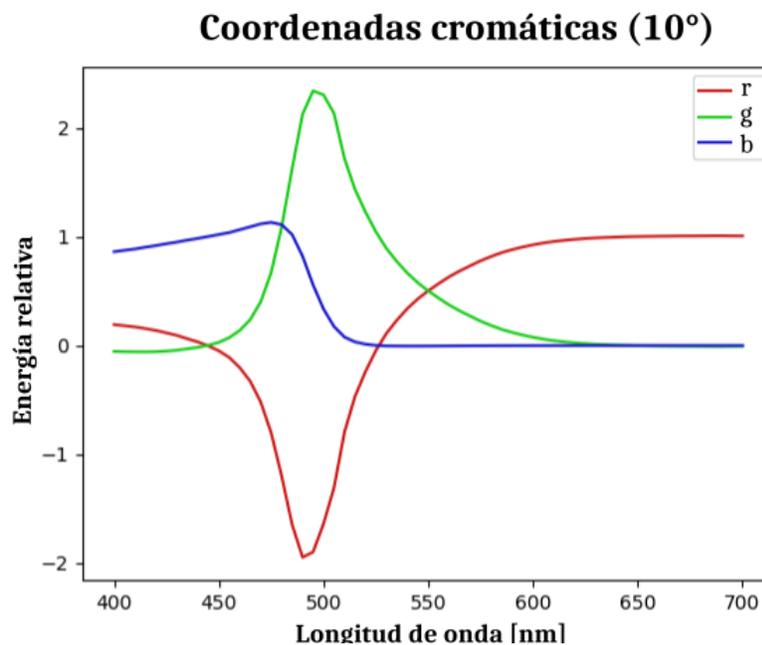


Figura 1.18: Valores triestímulo

Debido a que se encontró que los valores triestímulo no tienen perfecta coincidencia al ampliar el campo visual a 10°, la CIE decidió estandarizar este nuevo conjunto en el observador estándar de 1964. Siendo este diferente al observador estándar de 1931. Sin embargo, se estableció mantener los dos conjuntos de datos siendo uno no más importante que el otro, sino que dependiendo de las necesidades se favorecería uno ante otro. Finalmente, CIE transformó sus valores triestímulo RGB al conjunto de valores triestímulo XYZ, ver Figura 1.19

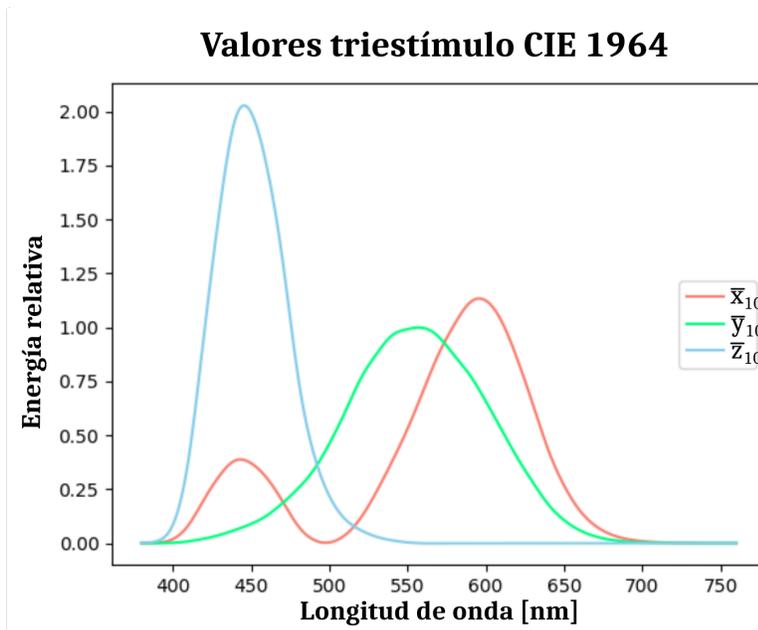


Figura 1.19: Valores triestímulo para un campo visual de 10° en función de los primarios imaginarios X, Y y Z

En la Figura 1.20 se pueden notar las diferencias entre los valores triestímulo del observador estándar de 1931 y 1964 respecto al sistema XYZ impuesto por la CIE.

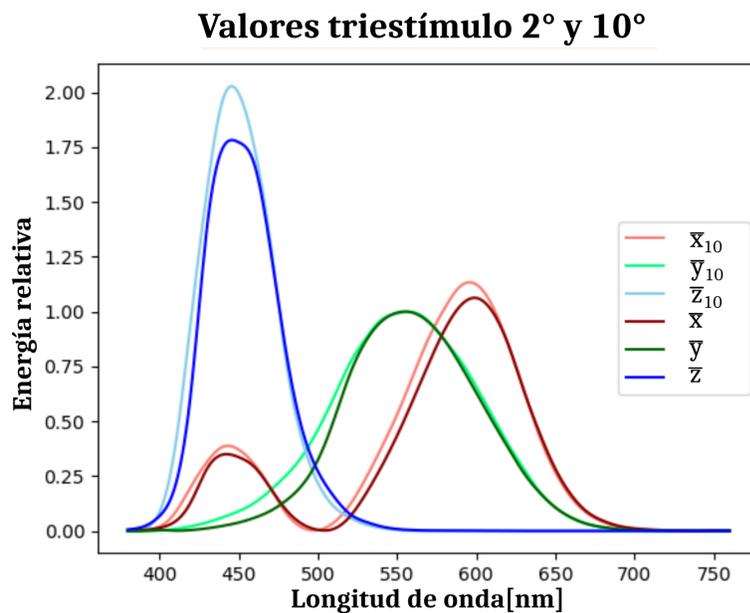


Figura 1.20: Comparación de los valores triestímulo para un campo visual de 2° y 10°

2.1. Monocromador

Un monocromador es un aparato diseñado para dispersar el flujo radiante incidente en su espectro del cual cualquier banda de longitudes de onda pueden aislarse con una apertura [21], en palabras más simples, se utiliza para separar las diferentes longitudes de onda del que está compuesto un haz de luz.

Existen varios tipos de monocromadores, donde el diseño más simple requiere un prisma o rejilla de difracción, lentes y aperturas de entrada y de salida.

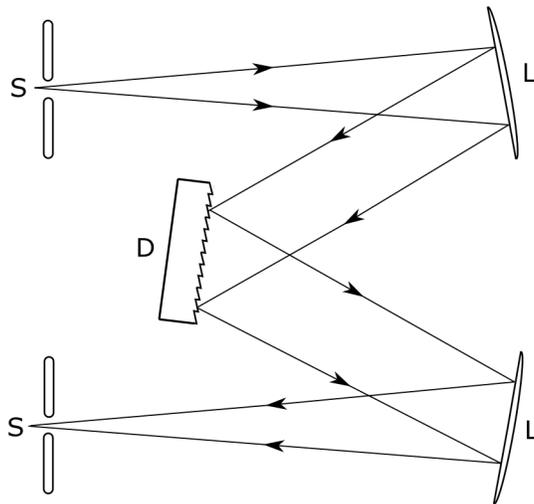


Figura 2.1: Diseño básico de un monocromador del tipo Czerny-Turner

Un tipo de diseño básico para un monocromador es Czerny-Turner, ver Figura 2.1, el cuál utiliza una rejilla de difracción de reflexión “*D*” en lugar de un prisma, mientras que las lentes se sustituyen por espejos colimadores “*L*”, las aperturas de entrada y salida

son “S”. Este tipo de monocromador es de interés por el uso de la rejilla de difracción, la cuál es más eficiente que los prismas y mantiene una dispersión casi lineal.

Para entender el funcionamiento de un monocromador es necesario analizar el sistema de dispersión.

2.1.1. Rejillas de difracción

Como se dijo anteriormente, la parte más importante de un monocromador es el elemento dispersor, generalmente un prisma. Aunque actualmente los prismas son usualmente reemplazados por rejillas de difracción. En la Figura 2.2, se muestra un prisma de base b que funge como dispersor.

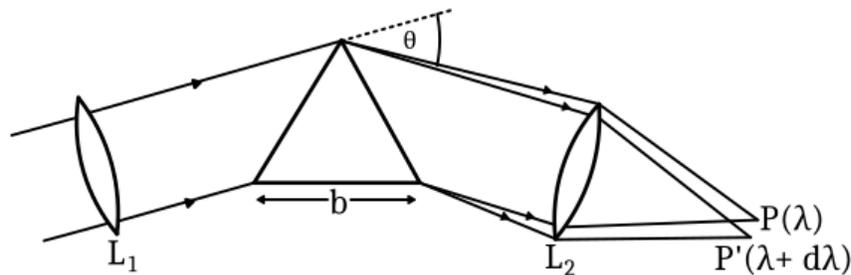


Figura 2.2: Funcionamiento de un prisma como elemento dispersivo [24]

Por el lado izquierdo, luz blanca pasa por la lente $L1$, el prisma dispersa y resuelve la radiación y finalmente la luz dispersada pasa por el lente $L2$ que enfoca el haz hacia un detector [24]. El poder de resolución R se calcula como

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} \quad (2.1)$$

donde la longitud de onda λ y $\lambda + d\lambda$ se tienen que observar separadas, entonces $d\lambda$ es la resolución. En el caso de un prisma se requiere el índice de refracción n y la distancia de la base b . Por lo que la expresión resulta

$$R = b \frac{dn}{d\lambda} \quad (2.2)$$

Partiendo del comportamiento de un prisma, se puede definir una rejilla de difracción como un elemento que consiste en un arreglo periódico de elementos difractivos, ya sean aperturas u obstáculos y que tiene la característica de producir alteraciones en la fase, amplitud o ambas de una onda emergente [14]. La característica principal de una rejilla de difracción es que puede separar diferentes longitudes de onda de la luz usando la estructura repetitiva y que causa interferencia de las ondas transmitidas o reflejadas, según el tipo de rejilla.

La ecuación general de la rejilla de difracción establece que dado un espaciado b entre líneas, defleca la luz a un ángulo discreto θ_m dependiente del orden de difracción m y

de la longitud de onda λ . Cuando el ángulo de incidencia es $\theta_i = 0$ la ecuación está dada por

$$b \sin(\theta_m) = m\lambda \quad (2.3)$$

En el caso de una rejilla de transmisión la estructura repetitiva se puede pensar como una serie de ranuras delgadas en un material. En general, las rejillas de transmisión son materiales transparentes que se graban o rayan finamente manteniendo líneas paralelas. Este tipo de arreglo periódico provoca que la luz se disperse. En la Figura 2.3, se esquematiza el comportamiento de una rejilla de transmisión.

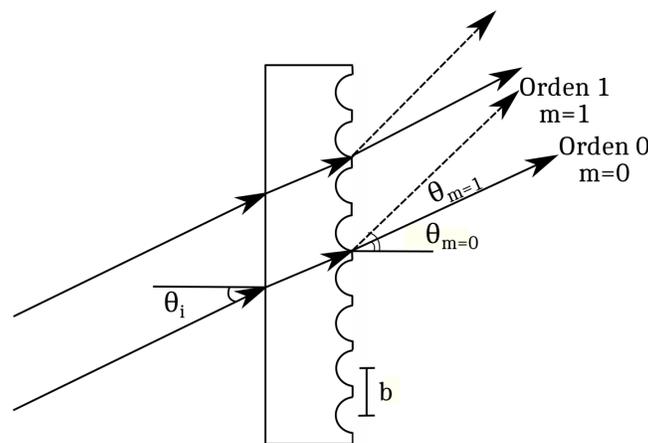


Figura 2.3: Funcionamiento de una rejilla de transmisión.

En esta rejilla, se tiene una separación b entre cada línea. La luz incide con un ángulo θ_i sobre la rejilla medido respecto a la normal de la superficie, el orden m sale de la rejilla a un ángulo θ_m respecto a la normal. En este caso, la ecuación de la rejilla está dada por

$$b(\sin(\theta_m) - \sin(\theta_i)) = m\lambda \quad (2.4)$$

donde θ_i y θ_m son positivos si el haz incidente y el haz difractado se encuentran en direcciones opuestas a la normal de la superficie de la rejilla. Se nota que el orden cero $m = 0$ ocurre cuando $\theta_m = -\theta_i$, entonces toda la luz de todas las longitudes de onda aparece en el máximo del orden cero de difracción. Para ordenes más grandes se producen líneas espectrales a los lados del orden cero dependiendo si m es positivo o negativo. En la Figura 2.4, se muestran diferentes ordenes de difracción para una rejilla de reflexión [3].

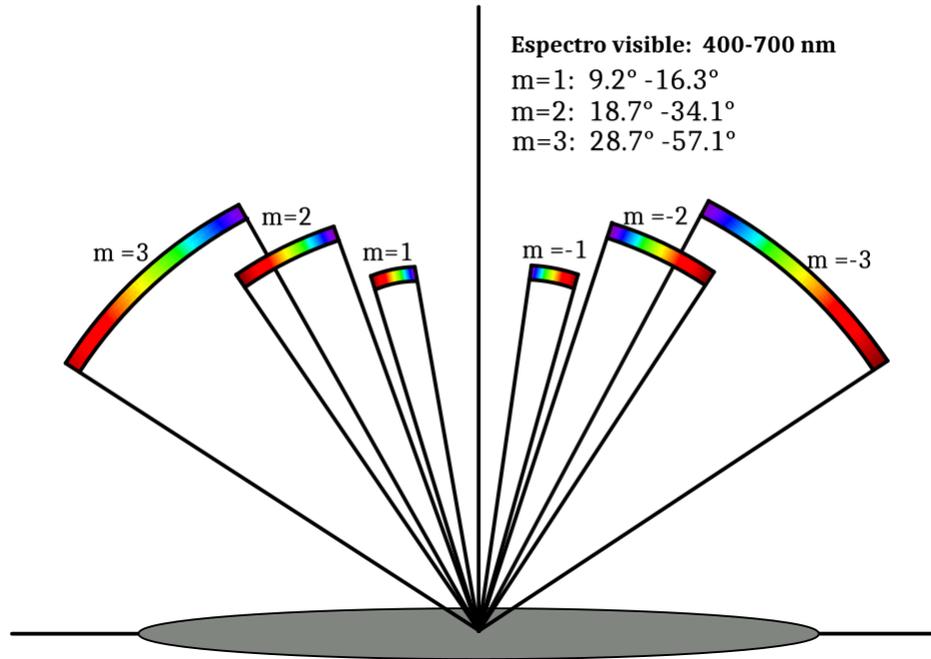


Figura 2.4: Dispersión angular para 3 órdenes de difracción en el espectro visible para una rejilla de 400 líneas por mm, asumiendo incidencia normal, el intervalo final rojo del espectro es mayormente dispersado en cada orden [3]

El rango de longitudes de onda que no se traslapan, en un orden particular se llama rango espectral libre F . El traslape ocurre cuando en la ecuación de la rejilla se tiene que el producto $b \sin(\theta_m)$ es igual a alguna combinación de $m\lambda$. Por ejemplo, para una posición λ en el primer orden se puede encontrar una línea espectral correspondiente a $\frac{\lambda}{2}$ en el segundo orden. El rango espectral libre en el orden m se puede determinar bajo el siguiente argumento. Si λ_1 es la longitud de onda más corta detectable en la luz incidente, entonces la mayor longitud de onda que no se traslapa λ_2 del orden m es coincidente con el principio del espectro nuevamente en el siguiente mayor orden $m + 1$, matemáticamente

$$m\lambda_2 = (m + 1)\lambda_1 \quad (2.5)$$

Finalmente, el rango espectral libre para el orden m está dado por

$$F = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1}{m} \quad (2.6)$$

Para el primer orden $m = 1$ tomando como λ_1 la longitud de onda más corta que se puede tener en una rejilla de difracción se tiene

$$F_1 = \frac{400}{1}$$

Esto quiere decir que se tiene un rango espectral libre de $400nm$, por lo que el intervalo sin traslape es $(400 - 800)nm$ para el primer orden, para órdenes sucesivos este intervalo se reduce considerablemente.

Para el caso de una rejilla de reflexión, la luz que incide es reflejada por el recubrimiento metálico que suelen tener este tipo de rejillas. Esta luz se refleja a diferentes ángulos dependiendo, al igual que en el caso de transmisión, de la longitud de onda y el orden de difracción.

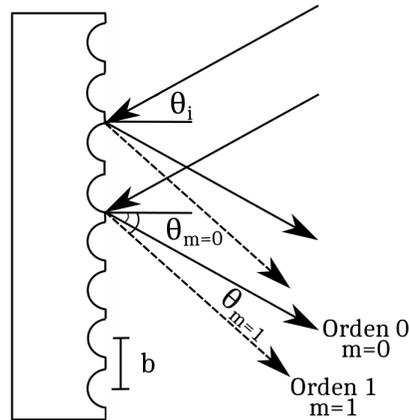


Figura 2.5: Rejilla de reflexión mostrando los primeros 2 órdenes de difracción.

En la Figura 2.5, se muestra un ejemplo de una rejilla de reflexión. La ecuación de la rejilla se modifica sutilmente para este caso, resultando

$$b(\sin(\theta_m) + \sin(\theta_i)) = m\lambda \quad (2.7)$$

Donde θ_i es positivo y θ_m es negativo si el rayo incidente y el difractado están opuestos respecto a la normal de la superficie del material. Si se toma la condición $\theta_i = \theta_m$, entonces la única solución de (2.7) es $m = 0$ que es independiente de la longitud de onda y del espaciado de la rejilla. Bajo esta condición se tiene que no se puede obtener información dependiente de λ y la luz se refleja sin dispersarse.

Entre las rejillas de reflexión, la rejilla “echelle” está diseñada para producir la máxima eficiencia en un orden específico de difracción. La eficiencia absoluta de una rejilla en un intervalo de longitudes de onda o en un orden, es la razón de la energía de la luz difractada entre la energía de la luz incidente en el mismo intervalo de longitudes de onda. Incrementar el número de líneas en una rejilla, por ejemplo, aumenta el rendimiento de la energía luminosa. El orden cero $m = 0$ en donde no hay dispersión, representa un desperdicio de energía, esto reduce la eficiencia de la rejilla. Este orden contiene el más intenso máximo de interferencia, entonces se da forma a cada línea “blazing” de manera que el máximo de difracción se desplace a otro orden [3]. Esta técnica consiste en que las líneas tengan un máximo en un extremo y un mínimo en el otro de manera que se forme un arreglo similar a una escalera, la Figura 2.6 muestra el acabado de esta técnica.

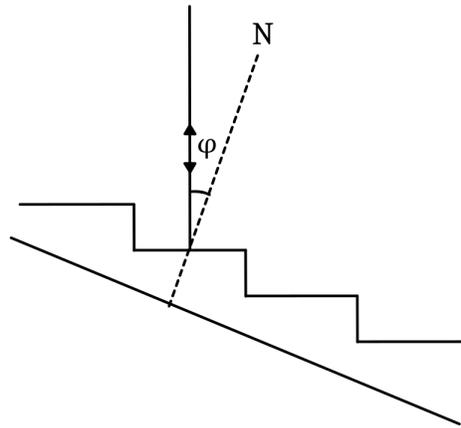


Figura 2.6: Estructura de la rejilla tipo echelle. El ángulo ϕ es llamado “blazed angle” [24]

La reflexión tendrá la máxima eficiencia cuando el ángulo incidente y de difracción sostengan un ángulo ϕ respecto a la normal, este ángulo se llama “blazed angle”.

En la Figura 2.7, se compara una rejilla de reflexión sin la técnica “blazing” y la rejilla tipo echelle. Se tiene que en la rejilla de reflexión el máximo central de difracción $\beta = 0$ coincide con el orden cero $m = 0$, es decir, el máximo se encuentra en el ángulo especular, en el caso de la rejilla tipo echelle $\beta = 0$ se desplaza por el efecto de la forma de las líneas.

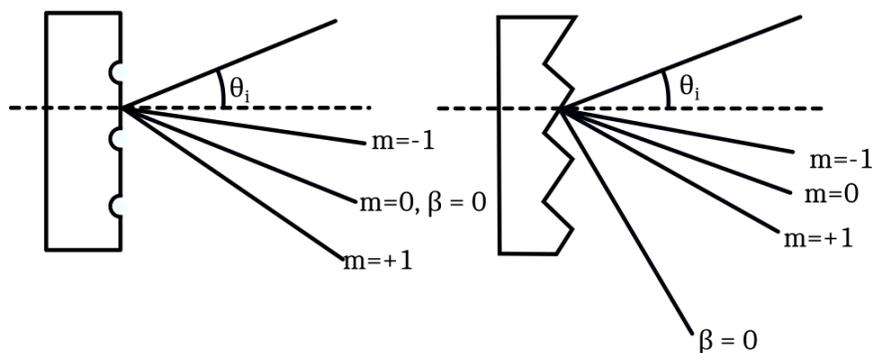


Figura 2.7: Comparación de la posición del máximo central de difracción en dos rejillas donde a la derecha se encuentra la rejilla tipo echelle [3]

Se nota que sin alterar la separación de las líneas se favorece ahora que el máximo principal se encuentre a un ángulo $|m| > 0$

Con esto podemos decir que la rejilla de reflexión tipo echelle tiene características similares a las rejillas de reflexión anteriores, pues su ángulo de incidencia θ_i , y el ángulo de difracción θ_m se miden respecto a la normal a la superficie. Sin embargo, el ángulo especular se mide respecto al ángulo ϕ .

La obtención de la ecuación de la rejilla para este tipo de configuración se obtiene de la siguiente manera. Considere una rejilla como la mostrada en la Figura 2.8.

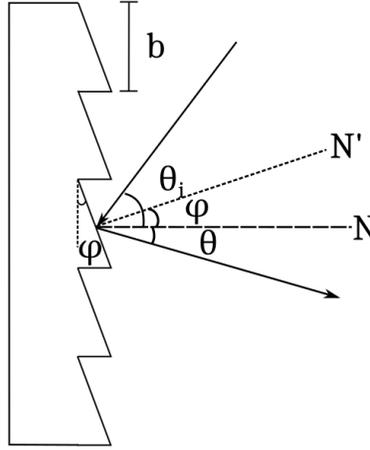


Figura 2.8: Relación entre el blaze angle con los ángulos de incidencia y difracción.

Se tiene que θ_i es el ángulo de incidencia a la rejilla y que θ es el ángulo difractado, ambos respecto a la normal al plano de la rejilla N . La normal a la superficie de la ranura N' forma un ángulo ϕ respecto a N . Se pide entonces que el haz difractado satisfaga la condición de reflejo especular respecto a la cara de la ranura y la condición para el máximo principal en el orden m , donde $\theta = \theta_m$.

Para satisfacer la primera condición se necesita que el ángulo de incidencia coincida con el ángulo de difracción respecto a N' . Siguiendo la Figura 2.8, se nota que la relación que satisface es

$$\theta_i - \phi = \phi + \theta_m \quad (2.8)$$

despejando ϕ se tiene

$$\phi = \frac{\theta_i - \theta_m}{2} \quad (2.9)$$

Luego se pide que se satisfaga la ecuación de la rejilla (2.7), y de la primera condición se tiene

$$m\lambda = b(\text{sen}(\theta_i) + \text{sen}(2\phi - \theta_i)) \quad (2.10)$$

Existen dos casos especiales para la ecuación (2.10). En la configuración "Litrow" se tiene que el haz incidente pasa cerca de N' , tal que $\phi = \theta_m$, y $\theta_m = \theta_i$. Por lo que la ecuación de la rejilla resulta

$$m\lambda = 2b \text{sen}(\phi) \quad (2.11)$$

En la otra configuración, el haz de luz incide sobre la normal N , esto implica que $\theta_i = 0$ y $\phi = -\frac{\theta_m}{2}$. Por lo que para incidencia normal se tiene

$$m\lambda = b \operatorname{sen}(2\phi) \quad (2.12)$$

Dispersión de una rejilla de difracción

En la Figura 2.4 se puede notar que a mayor orden, la intensidad de la rejilla decae mientras las líneas espectrales quedan mejor separadas. La dispersión angular \mathcal{D} describe esta propiedad, donde se define

$$\mathcal{D} = \frac{d\theta_m}{d\lambda}$$

Como θ_m depende de λ , por lo que usando la ecuación de la rejilla (2.7), se tiene

$$\mathcal{D} = \frac{m}{b \cos(\theta_m)} \quad (2.13)$$

Resolución de una rejilla de difracción

Incrementar la dispersión o la propagación de las líneas espectrales no hace que, por sí mismo, las longitudes de onda contiguas aparezcan más distintivamente, a menos que los picos de emisión sean suficientemente delgados o nítidos [3]. La resolución de una rejilla implica poder crear distintos picos para longitudes de onda muy cercanas en un orden particular. El poder de resolución \mathcal{R} se define como

$$\mathcal{R} = \frac{\lambda}{(\Delta\lambda)_{min}} \quad (2.14)$$

donde $\Delta\lambda_{min}$ es el intervalo mínimo de longitudes de onda donde se cumple el criterio de Rayleigh.

El criterio de Rayleigh establece que 2 patrones de difracción se pueden resolver si el máximo de uno coincide con el mínimo del otro, teniendo así una manera de distinguir patrones como diferentes. La Figura 2.9 muestra 2 patrones que se pueden resolver por el criterio de Rayleigh, aunque este criterio no es el más eficiente es muy utilizado como parámetro.

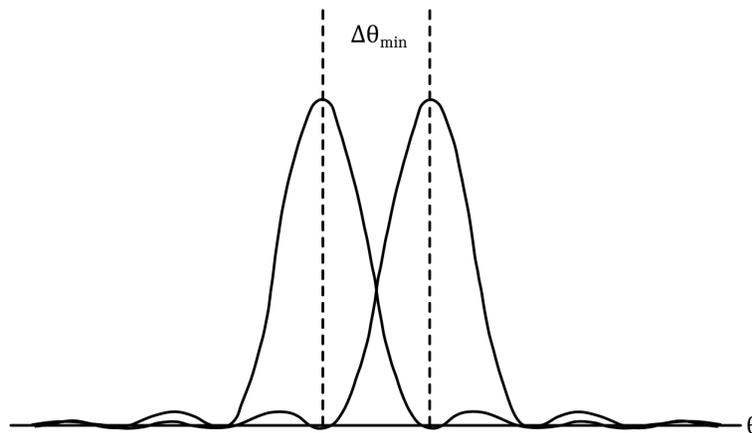


Figura 2.9: Dos patrones de difracción que cumplen el criterio de Rayleigh [3]

En función de la rejilla de difracción el poder de resolución es

$$\mathcal{R} = mN \quad (2.15)$$

con m el orden de difracción y N el número de líneas por mm en la rejilla.

2.1.2. Monocromador experimental

Ahora que se revisó el funcionamiento de las rejillas de difracción, se muestra el monocromador experimental que se implementó para este trabajo. La descripción del aparato se puede hacer mediante la Figura 2.10.

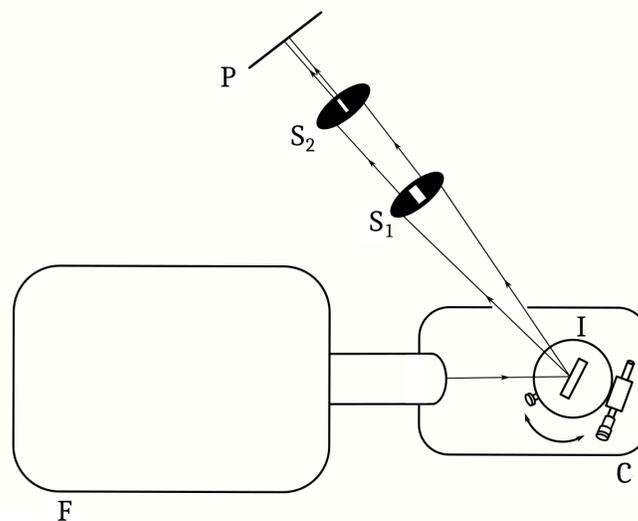


Figura 2.10: Diagrama del monocromador que se contruyó para este trabajo.

En F se tiene un proyector que funge como fuente de luz de la cual se obtiene la descomposición del espectro, el haz de la fuente se pseudocolima y se dirige hacia I , donde I es un dispositivo diseñado y contruido para rotar una rejilla de difracción con precisión, el haz dispersado en I sale de C , la cual es una caja diseñada para evitar que luz blanca no deseada contamine el espectro generado por la rejilla en I . S_1 es una apertura rectangular y S_2 es una ranura (slit), la cual está pensada para tener la apertura y la distancia a la rejilla de modo que se seleccione aproximadamente un ancho de banda de $10nm$. En Figura 2.11 se muestra I a detalle.

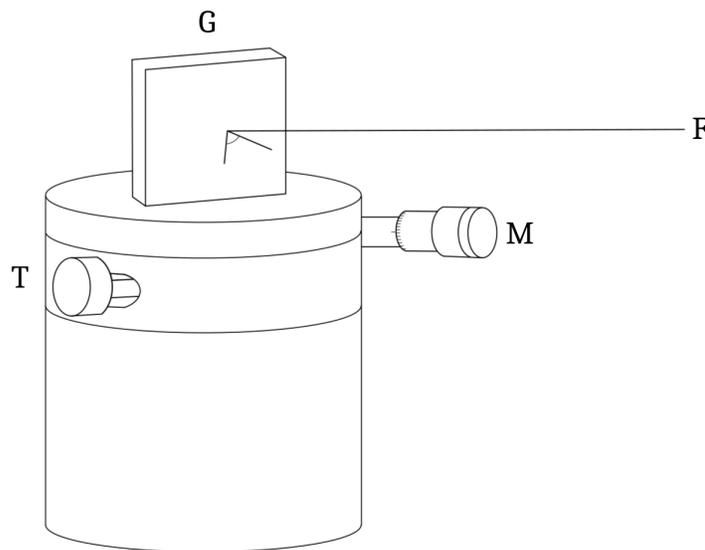


Figura 2.11: Montura de la rejilla de difracción y sistema de rotación.

Esta parte del diseño es crucial para seleccionar correctamente la longitud de onda, al elegir un intervalo de $10nm$, se tiene un estímulo de color prácticamente monocromático que es el estímulo a igualar en el experimento. Este mecanismo consta de 3 partes, sin tomar en cuenta la base que da la altura necesaria para alinearse con la fuente F . La primera es la rejilla de difracción G que está fija a la montura, M es un tornillo micrométrico que impulsa un mecanismo interno el cual permite rotar la rejilla que está sujeta a la placa superior. Finalmente, T es un tornillo que libera la placa superior, permitiendo rotarla a libertad para ajustar el ángulo de incidencia y la posición dónde se proyecta el espectro, cabe mencionar que este tornillo se utiliza para un ajuste previo al experimento y se fija al comenzar el mismo y no debe ser movido a lo largo de las mediciones.

La rejilla de difracción que se utiliza es una rejilla holográfica de reflexión, tiene 1200 líneas por milímetro, sus dimensiones son $30 \times 30 \times 9.5mm$ con recubrimiento de oro.

2.1.3. Ajuste del monocromador

El ajuste del monocromador para un espectro de luz blanca se realizó experimentalmente y requirió 4 etapas. La primera que consiste en conocer la rotación exacta de la rejilla para seleccionar una determinada longitud de onda. La segunda consiste en caracterizar la montura, determinando la relación entre el ángulo y la rotación del tornillo micrométrico. La tercera consiste en determinar una posición fija que sirva como punto de referencia, es decir, conocer al menos la posición de una longitud de onda para poder determinar la posición de cualquier otra longitud de onda, así como los límites del intervalo del espectro con el que se trabaja. Por último, se requiere un ancho de banda cercano a $10nm$, esto implica que el haz proyectado se vea homogéneo, condición que es prioritaria para facilitar la igualdad de los estímulos.

Caraterización de la rejilla de difracción

Para abordar el primer problema a resolver, se utilizó un tubo de descarga de hidrógeno el cual funcionó como fuente de un espectroscopio para caracterizar la rejilla final. En Figura 2.12, se muestra la rejilla montada en el aparato. *A* corresponde al tubo espectral y la fuente que lo alimenta, *B* a la rejilla de difracción a caracterizar y *C* es el espectroscopio completo. Se utilizó un espectroscopio porque tiene una escala angular con tornillo micrométrico que permite medir las posiciones angulares hasta con dos cifras decimales.

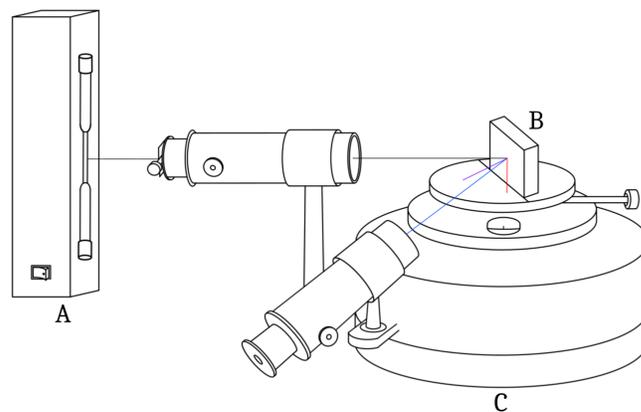


Figura 2.12: Diagrama de uso de un espectroscopio para caracterizar la rejilla.

El tubo de descarga se eligió de manera que tuviera la mínima cantidad de líneas espectrales y fuera sencillo determinar qué líneas corresponden a las que se observan en el aparato. Las líneas intensas que se pueden ver en tubo de gas de hidrógeno son tres,

en el intervalo violeta ($434nm$), azul ($486nm$) y rojo ($656nm$), respectivamente como se puede ver en la Tabla 2.1.

Intensidad	Longitud de onda [nm]
5	383.5
6	388.9
8	387.0
15	410.2
30	434.0
60	486.1
180	656.3
5	954.6

Tabla 2.1: Líneas espectrales del hidrógeno [25]

Para la rejilla de difracción holográfica de 1200 l/mm se predice teóricamente con la ecuación de la rejilla (2.3), lo siguiente.

Para un ángulo de incidencia $\theta_i = 0^\circ$, y las 3 longitudes de onda del hidrógeno ($\lambda = 434nm$, $486nm$ y $656nm$) se tiene

Partiendo de (2.3)

$$m\lambda = b(\text{sen}(\theta_m))$$

Despejando el ángulo θ_m para el orden $m = 1$, línea violeta

$$\lambda = 434nm$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\lambda}{b} \right)$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{434nm}{833.33nm} \right)$$

$$\theta_m = 31.38^\circ$$

Análogamente para la línea azul

$$\lambda = 486nm$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{486nm}{833.33nm} \right)$$

$$\theta_m = 35.67^\circ$$

y para la línea roja

$$\lambda = 656nm$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{656nm}{833.33nm} \right)$$

$$\theta_m = 51.92^\circ$$

Donde las líneas azul y roja se comprobaron experimentalmente, obteniéndose para la línea azul $\lambda = 486nm$ un ángulo de difracción $\theta_m = (35.5 \pm .25)^\circ$ y para la línea roja $\lambda = 656nm$ un ángulo $\theta_m = (52 \pm 0.25)^\circ$. De modo que se tiene una correspondencia entre lo teórico y lo medido con el espectroscopio.

Así también para un ángulo de incidencia de $\theta_i = 45^\circ$, el cuál es uno de los ángulos al cual se encuentra la rejilla de difracción en el monocromador experimental, trabajando con el orden $m = -1$ se predice teóricamente lo siguiente

Para la línea violeta

$$\lambda = 434nm$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\lambda}{b} + \text{sen}(\theta_i) \right)$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{434nm}{833.33nm} + \text{sen}(45^\circ) \right)$$

$$\theta_m = 10.73^\circ$$

Análogamente para la línea azul

$$\lambda = 486nm$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{486nm}{833.33nm} + \text{sen}(45^\circ) \right)$$

$$\theta_m = 7.12^\circ$$

y para la línea roja

$$\lambda = 656nm$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{656nm}{833.33nm} + \text{sen}(45^\circ) \right)$$

$$\theta_m = -4.59^\circ$$

Experimentalmente, se tienen para $\lambda = 434nm$ $\theta_m = (11 \pm 0.25)^\circ$, $\lambda = 486nm$ $\theta_m = (7 \pm 0.25)^\circ$, $\lambda = 656nm$ $\theta_m = (-4.5 \pm 0.25)^\circ$, obteniéndose un gran acuerdo

entre lo predicho teóricamente con lo obtenido experimentalmente, por lo que lo que la rejilla queda caracterizada.

Calibración del desplazamiento del tornillo micrométrico

El segundo problema se resolvió como sigue. La rejilla caracterizada se fijó ahora en la montura del monocromador, en esa posición se encontró que alcanza una rotación entre $\theta_i = 46.5^\circ$ hasta $\theta_i = 36.5^\circ$, dado el barrido máximo del tornillo micrométrico. Debe notarse que en el monocromador construido se tiene únicamente una resolución de 1° en la escala goniométrica. Haciendo uso de 2 láseres de λ conocida, se predice teóricamente que para una longitud de onda $\lambda_1 = 632.8nm$ y $\lambda_2 = 543.5nm$ para el orden $m = 1$ e incidencia normal $\theta_i = 0^\circ$, el ángulo de difracción resultante es $\theta_m = 49.32^\circ$ para el rojo y 40.71° para el verde. Y utilizando ángulos de θ_i dentro del intervalo posible de medición de la montura, se determinó la rotación necesaria para cambiar la longitud de onda en un intervalo de $10nm$ sobre este intervalo.

Se montaron y alinearon 2 láseres uniphase de baja potencia, emitiendo uno en la longitud de onda de $\lambda = 632.8nm$ y otro en la de $\lambda = 543.5nm$. Se utilizó un divisor de haz que permitiera hacer incidir los dos haces en la misma posición para no perder la alineación, como se muestra en la Figura 2.13. Donde R corresponde al láser rojo, G el láser verde, B es el divisor de haz, M la montura de precisión con la rejilla de difracción P centrada y finalmente una rendija de salida fija O . Esto permite conocer simultáneamente los ángulos difractados de cada haz y determinar la rotación de la rejilla en función de la longitud de onda y las líneas del tornillo micrométrico.

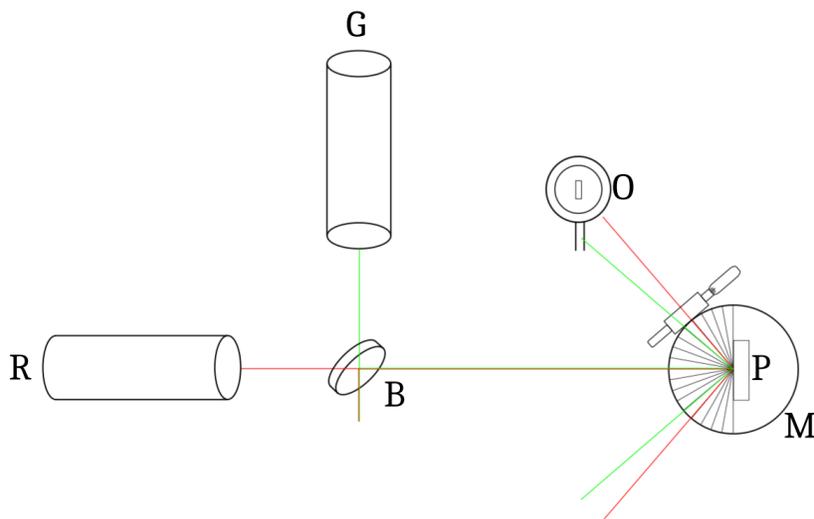


Figura 2.13: Calibración del barrido en el tornillo micrométrico utilizando dos láseres de longitudes de onda conocidas

Experimentalmente se obtuvo para $\lambda_1 = 632.8nm$ un ángulo $\theta_m = (49 \pm 0.5)^\circ$, mien-

tras que para $\lambda_2 = 543.5nm$ un ángulo $\theta_m = (41 \pm 0.5)^\circ$

Para determinar la relación entre ángulo y el giro del tornillo micrométrico, de manera de establecer el número de líneas para cambiar de longitud de onda en $10nm$ se sigue el siguiente procedimiento.

Se debe rotar la rejilla con el tornillo micrométrico de manera que se proyecte el haz del láser rojo sobre el centro de la rendija O. Esto sucede cuando el ángulo de incidencia sobre la rejillas es de $(39.5)^\circ$ como se muestra en la Figura 2.14. Teóricamente utilizando la ecuación de la rejilla (2.7), tiene que el haz rojo con $\lambda_1 = 632.8nm$ incida en la rejilla a un ángulo $\theta_i = 43.5^\circ$ se difracte a $\theta_m = -4^\circ$. Esto significa que el láser se dirija justo al centro de la rendija. Una vez centrado, se rota el tornillo micrométrico de manera que el haz verde $\lambda_2 = 543.5nm$ incida en la rendija, donde teóricamente se tiene un ángulo de incidencia $\theta_i = (39.5)^\circ$ se difracte a $\theta_m = -.05^\circ$.

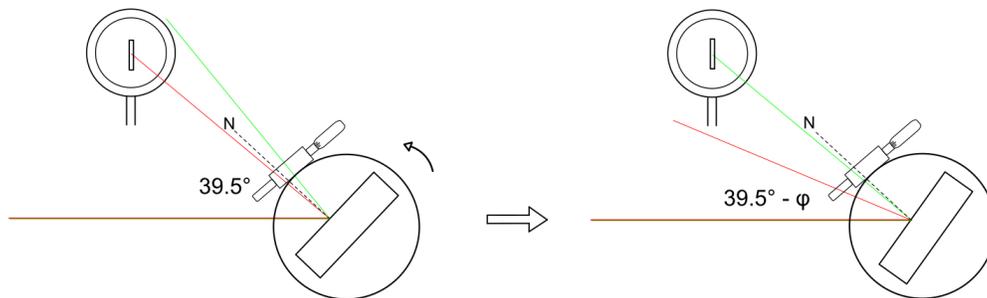


Figura 2.14: La rejilla de difracción se rota de manera que los haces apunten a la rendija.

Experimentalmente, el tornillo micrométrico se gira $(320 \pm .5)$ líneas, representado como el ángulo φ en la Figura 2.14, para cambiar la proyección del haz rojo al verde, además, se tienen los siguientes resultados

λ	θ_i	θ_m	Líneas
$543.5nm$	$(40 \pm .5)^\circ$	$(0 \pm .5)^\circ$	320
$632.8nm$	$(44 \pm .5)^\circ$	$(-4 \pm .5)^\circ$	0

La ecuación de la rejilla se verifica con ambos métodos. Ahora, con la ayuda de esta información se puede determinar el tamaño de paso en función de las líneas. Haciendo un ajuste lineal, donde se reescribe la longitud de onda λ como x y las líneas del tornillo como y , se tiene

$$(y - y_1) = \left(\frac{0 - 320}{632.8 - 543.5} \right) (x - x_1) \quad (2.16)$$

$$(y - 320) = \left(\frac{-320}{89.2999} \right) (x - 543.5) \quad (2.17)$$

$$y = (-3.5834x + 1947.5945) + 320 \quad (2.18)$$

$$y = -3.5834x + 2267.5945 \quad (2.19)$$

Utilizando este resultado, se puede calcular para cualquier longitud de onda el recorrido del tornillo micrométrico. Tomando una longitud de onda que difiera en $10nm$ como $\lambda = 622.8nm$, se obtiene

$$y = -3.5834(622.8) + 2267.5945$$

$$y = 35.8529$$

Por lo tanto, se pueden obtener las posiciones de todas las longitudes de onda para cada $10nm$ a partir de alguna conocida, rotando 35.85 líneas el tornillo micrométrico.

Ajuste de la longitud de onda

Para resolver el tercer punto, se debe encontrar una longitud de onda y su posición en la montura. El procedimiento consiste en medir la energía relativa de dos filtros dicroicos conocidos, donde las curvas de transmitancia de ellos se intersectan en alguna longitud de onda, para realizar la medición se utilizó un radiómetro Thorlabs PMD100 con un sensor de photodiodo sc120. Las gráficas de estos filtros se presentarán en la sección “2.2 Mezclador RGB”.

Se sabe que las curvas de transmitancia de estos filtros se cruzan en $590nm$. A partir de esto se hace un barrido rápido, es decir, seleccionamos λ desde los $410nm$ hasta $690nm$ de modo que se mida la energía transmitida por estos filtros, esto se puede apreciar en la Figura 2.15. Donde I es la montura de precisión, F el filtro rojo o verde, dependiendo cuál se mida en el momento, D es el detector que se encuentra centrado o alineado con la ranura S_2 . Primero se midió el espectro para un filtro y después para el otro.

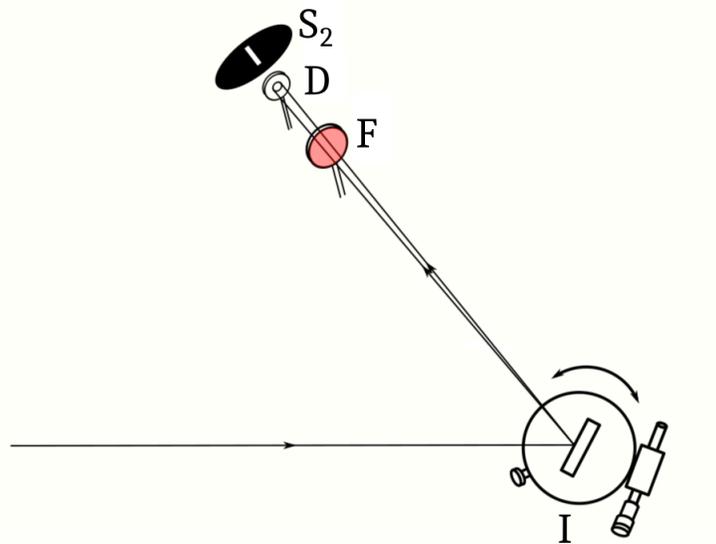


Figura 2.15: Medición experimental de la curva de transmitancia del filtro rojo

El resultado de las mediciones, Figura 2.16, nos muestra en qué línea del tornillo micrométrico se encuentra la intersección de $\lambda = 590nm$.

Curvas de transmitancia

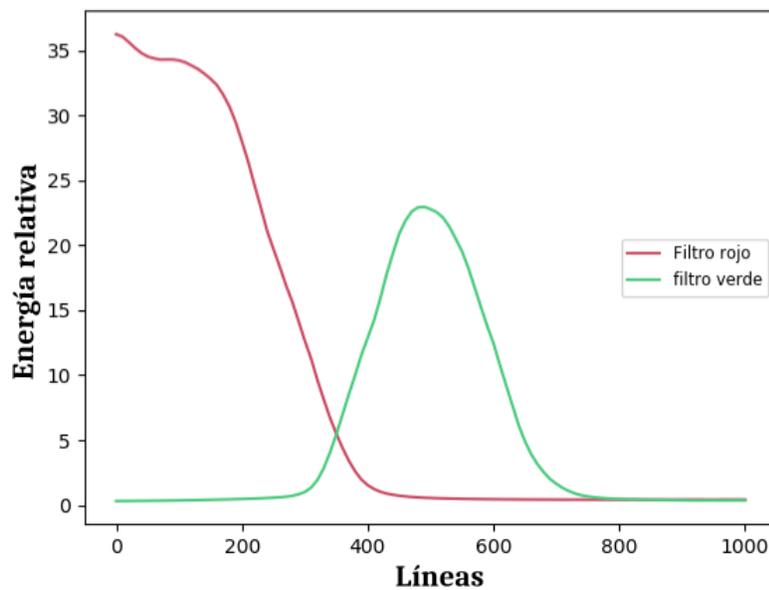


Figura 2.16: Curvas de transmitancia experimentales de los filtros dicróicos R y G

Repitiendo las mediciones en el intervalo de la intersección, se obtuvo el promedio de las curvas, donde se encuentra que dicha intersección $\lambda = 590nm$ se encuentra en la línea 355 ± 1 del tornillo micrométrico. Las curvas de las repeticiones se promediaron para obtener este resultado, en Figura 2.17, se muestran un acercamiento de las curvas en la vecindad de la intersección.

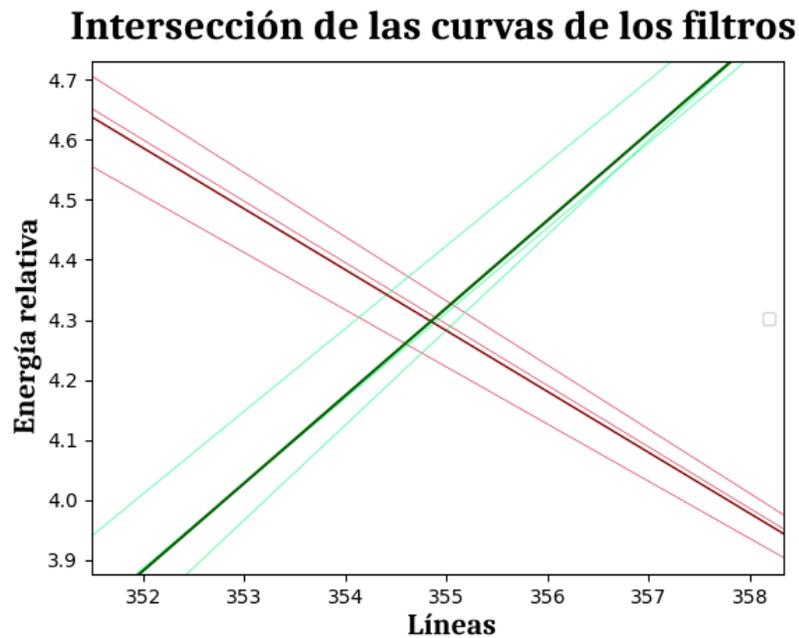


Figura 2.17: Intersección de las curvas de transmitancia de los filtros dicróicos R Y G, la curva oscura corresponde al promedio de las curvas claras para cada filtro

Selección del Ancho de Banda

Finalmente, se requiere determinar el ancho de la rendija de salida para restringir a un ancho de banda a $10nm$ que se requiere en el experimento. En la Figura 2.18, se muestra la distancia buscada como x . Se tiene que la distancia entre la rejilla de difracción y la rendija de salida r es de $(56 \pm 0.5)cm$, por lo que falta determinar el ángulo θ para poder calcular x .

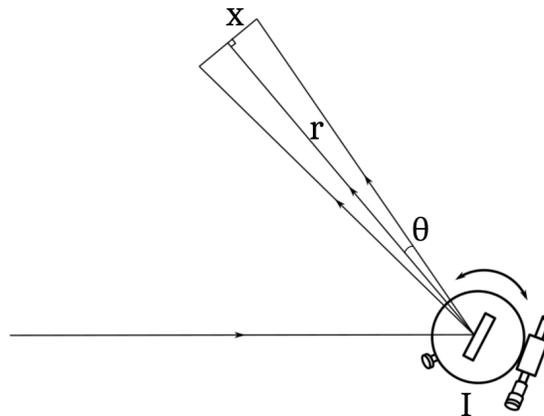


Figura 2.18: Determinación del ancho de la rendija de salida del monocromador experimental

Para resolver esto, se utiliza nuevamente la ecuación de la rejilla (2.5). Se toma una longitud de onda conocida y un ángulo de incidencia θ_i conocido, tal que el ángulo difractado θ_m se proyecte justo en el centro del detector. Por ejemplo, si tiene un haz incidente $\theta_i = 44^\circ$ y se toma $\lambda = 644.26nm$, entonces el haz difractado toma el ángulo $\theta_m = -4.5^\circ$. Esto es

$$\begin{aligned}\theta_m &= \text{sen}^{-1} \left(\text{sen}(\theta_i) + \frac{\lambda}{b} \right) \\ \theta_m &= \text{sen}^{-1} \left(\text{sen}(44) + \frac{644.26}{833.33} \right) \\ \theta_m &= -4.5^\circ\end{aligned}$$

Análogamente, para una longitud de onda que esté a 5 nanómetros de $\lambda = 644.26nm$. Sea entonces, $\lambda = 639.26nm$ que incide al mismo ángulo $\theta_i = 44^\circ$, entonces $\theta_m = -4.154^\circ$. Tomando la diferencia de los ángulos de difracción se tiene que el ángulo $\theta = .346^\circ$. Luego para encontrar x , fácilmente

$$\begin{aligned}x &= r \tan(\theta) \\ x &= 56(\tan(.346)) \\ x &= .3381\end{aligned}$$

Dado que x es la mitad de la apertura, entonces el ancho de la ranura calculado es $a = (.676 \pm 0.006)cm$

Conclusión de la calibración

El tornillo micrométrico está graduado y permite una rotación de $(11 \pm 0.5)^\circ$, esto permite la proyección del intervalo $(410 - 690)nm$ que se encuentra dentro del intervalo del espectro visible. Dada la incapacidad de rotar más, no se pueden obtener los extremos deseados $400nm$ y $700nm$. Se tiene además que para proyectar cada $10nm$ de longitud de onda, que se seleccionan al rotar la rejilla de difracción se obtienen cada (35.95 ± 1) líneas del tornillo micrométrico, en el apéndice 1 se muestra una tabla con las longitudes de onda seleccionadas tomando en cuenta este paso. El punto de referencia para la rotación se establece en la línea 355 para la longitud de onda $590nm$ dado el método referido anteriormente. Se establece el ancho de la rendija de salida y experimentalmente se generó una rendija de $(0.676 \pm .006)cm$

2.2. Mezclador RGB

Para poder realizar una igualación de color es necesario contar con estímulos primarios y poder modificar la intensidad del haz que emiten. Un sistema óptico fue montado

para realizar dicha tarea, el cual se describe a detalle en esta sección.

El mezclador que se presenta se adaptó utilizando tres lámparas halógenas Osram modelo 64647 que operan con 24 volts, cuentan con una potencia de 150 watts y temperatura de color 2900 K, aproximadamente. Cada lámpara se alimenta con una fuente eléctrica DC POWER SUPPLY modelo *QW – MS305D*. Esta fuente permite atenuar y aumentar la energía de las lámparas incandescentes variando el voltaje entre 0 – 30 volts, con una precisión decimal, la corriente que soporta está entre 0 – 5 ampères. El equipo cuenta con una pantalla digital que muestra voltaje y amperaje, así como 2 perillas para regular cada medida, donde una de cada par corresponde a un cambio fino. Para encender las fuentes incandescentes, basta con fijar el amperaje al máximo y sólo regular el voltaje. En la Figura 2.19 se muestra el equipo con el display encendido.



Figura 2.19: Fuente de alimentación DC POWER SUPPLY modelo QW-MS305D.

En la Figura 2.20, se muestra el cambio relativo de energía luminosa de la fuente incandescente en función del voltaje, caracterizando el comportamiento de las lámparas halógenas. Aunque la variación de voltaje sea en una escala decimal, se observa que el cambio de intensidad de cada fuente es imperceptible para el ojo humano mientras la variación sea de 1 decima de volt, por lo que no se requiere mayor precisión de trabajo para los fines de esta investigación.

Energía relativa de la lámpara incandescente

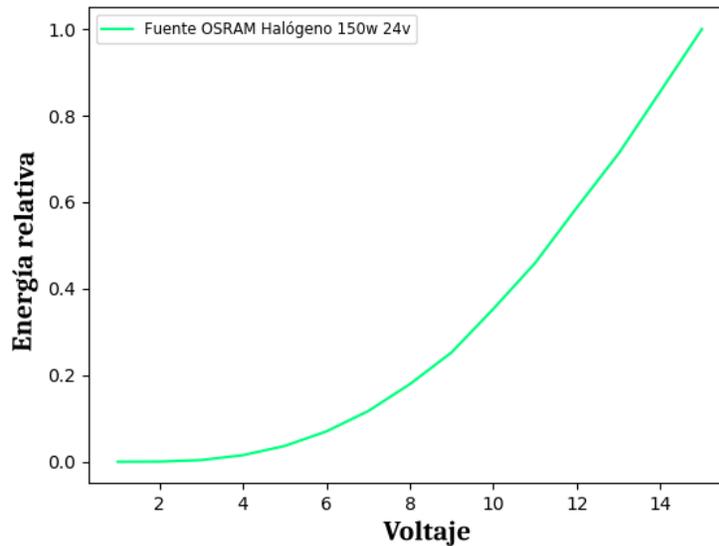


Figura 2.20: Energía relativa de la lámpara halógena en función del voltaje de entrada.

En cada fuente incandescente se adaptó un sistema óptico, cada sistema cuenta con la fuente, una lente y un filtro dicróico, con esto se crean 3 canales que corresponden a estímulos RGB. Para redireccionar el haz de cada sistema se utilizaron lentes esféricas, estos lentes son convergentes plano-convexos hechos con el material N-BK7, tienen una distancia focal $f = 200mm$ y un diámetro $\varnothing 50.8mm$.

La tercera parte del sistema consiste en un filtro dicróico de colores rojo, verde y azul. Estos se utilizan para generar los estímulos primarios necesarios para la igualación del estímulo de prueba. Los filtros juegan el papel más importante del mezclador, ellos se encargan de transmitir la longitud de onda requerida para la igualación, si bien no son puramente monocromáticos, la igualación del color es eficiente. Cada uno de los filtros se midió en términos de transmitancia para el intervalo en longitud de onda entre $190 - 900nm$. Las curvas muestran que la región donde permiten el paso de frecuencia corresponde a las bandas rojo, verde y azul teóricas, por lo que se justifica el uso de los mismos en este trabajo. Las curvas se muestran superpuestas en la Figura.2.21.

Como la colorimetría se restringe al intervalo del espectro visible, se muestran las curvas de transmitancia individualmente para este intervalo en la Figura. 2.22. Es importante ver que las curvas no tienen un máximo global claro, por lo que la longitud de onda dominante se toma como el promedio ponderado, esto se discute más adelante.

Curvas de transmitancias de filtros RGB

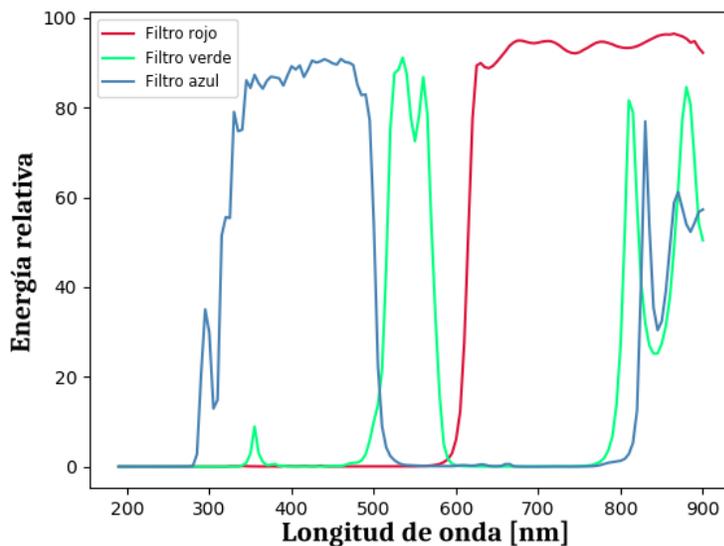


Figura 2.21: Curvas de transmitancia de filtros Dicroicos.

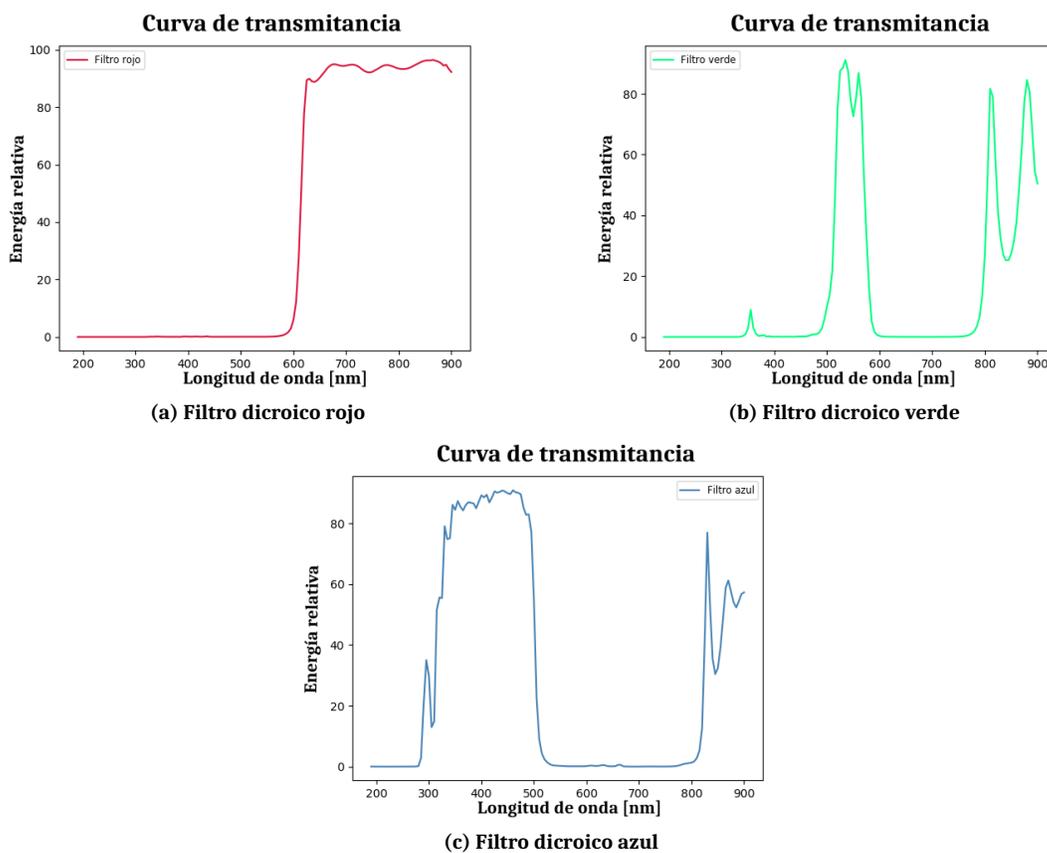


Figura 2.22: Se muestran las curvas de transmitancia de los 3 filtros en la región visible del espectro electromagnético.

Los canales convergen a una pantalla blanca donde los haces se combinan para generar la mezcla de los estímulos de color. Para cada uno, las lentes se montaron de manera que se tuviera la fuente divergente y que tuviera la particularidad de proyectar un haz de luz homogéneo, lo cual no se lograba satisfactoriamente al intentar colimar el haz.

En la Figura. 2.26, se puede ver el funcionamiento del mezclador RGB, donde S es la fuente, correspondiente a la lámpara halógena, L la lente convergente, F el filtro dicroico y P la pantalla donde se proyecta el haz, la cual se encuentra aproximadamente a 1 metro del sistema óptico. Cabe resaltar que en la pantalla se muestra un disco negro con una apertura circular, el motivo de esto es por la proyección de un haz de luz divergente, es decir, el haz se proyecta en la pantalla, pero al ser divergente, su diámetro es demasiado grande para los requerimientos del campo visual del experimento, utilizando un pigmento negro, eliminamos en su mayoría la luz fuera del diámetro efectivo, por lo que el observador se enfoca puramente en igualar el haz centrado en la región blanca.

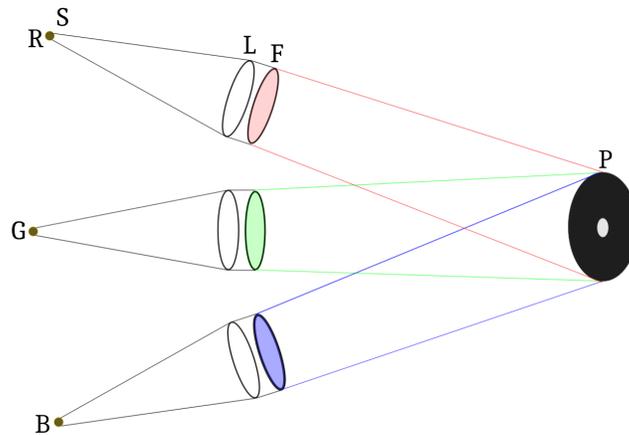


Figura 2.23: Diagrama mezclador RGB generando un estímulo de color a partir de los 3 estímulos primarios.

Una vez que los canales RGB estuvieron montados y funcionando, se procede a medir la energía que emite cada uno en función del voltaje, con esto se puede hacer una correlación entre energía luminosa del sistema y el voltaje. Así cuando se iguala un estímulo de color, se pueden conocer los coeficientes triestímulo a partir de la medición de la fuente de poder. Las curvas que representan esta relación se pueden apreciar en la Figura. 2.24.

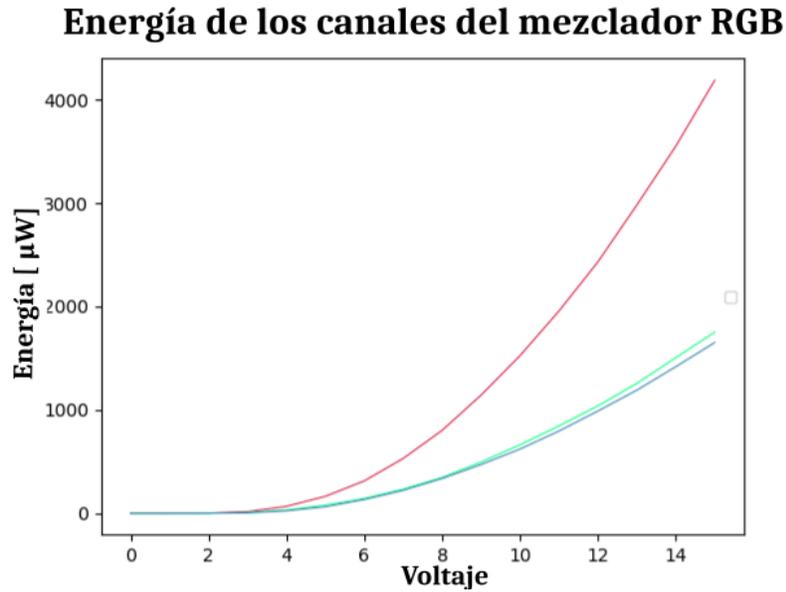


Figura 2.24: Energía emitida por cada canal en función del voltaje.

Si estas curvas se normalizan, se observa que el comportamiento es el mismo, es decir, las curvas son proporcionales en un factor medible, ver Figura 2.25. Dicho factor se debe añadir en cada igualación de manera que se compense la falta de energía de los primarios azul y verde. Esto es equivalente a los factores utilizados por Guild y Wright cuando el observador iguala el blanco de la fuente con base en que el blanco es el resultado de la mezcla de la misma cantidad de cada primario es decir, un tercio de la energía total por canal.

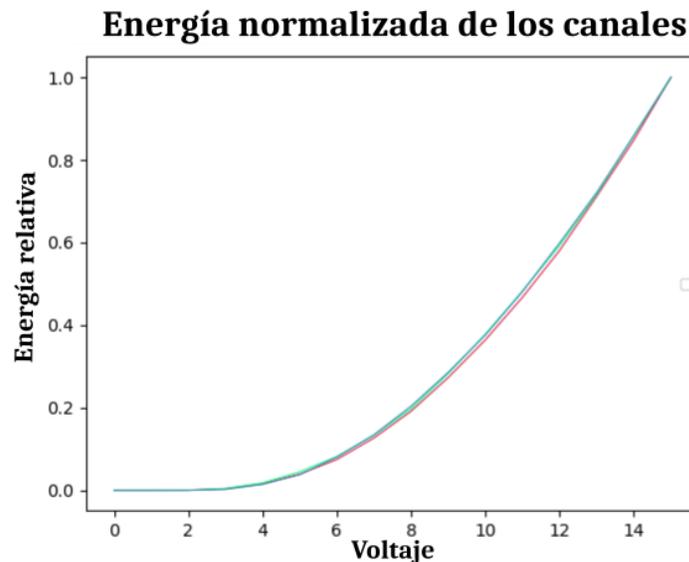


Figura 2.25: El aumento de energía en función del voltaje en los primarios, se nota que esta relación no depende del filtro utilizado

2.2.1. Mezclador RGB experimental

El diseño final del mezclador RGB se puede observar en Figura 2.26. Este mezclador involucra los 3 canales que se revisaron anteriormente, se añade una caja D la cual está hecha para evitar que la luz blanca no deseada contamine el campo de visión en G . Los canales convergen en G donde dependiendo de la intensidad de cada uno será el estímulo de color que generan.

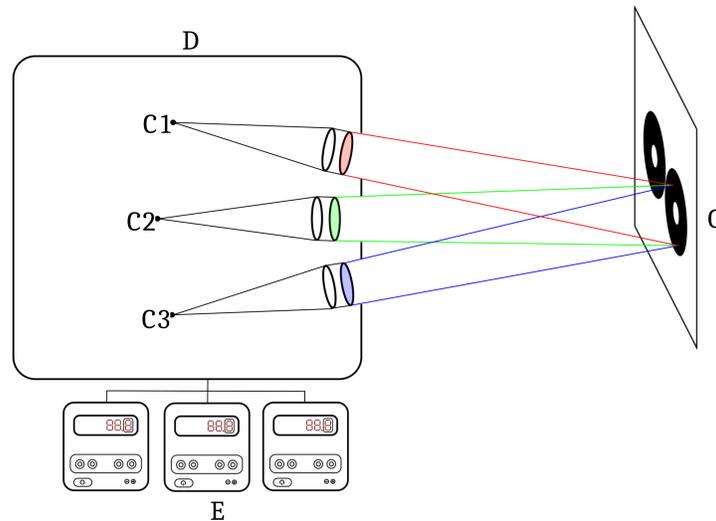


Figura 2.26: Diseño del mezclador RGB experimental

El mezclador RGB y el monocromador constituyen el diseño experimental final con el que se realiza el experimento del observador estándar. El método experimental se examina con detalle en la sección correspondiente.

Determinación de los primarios

Se conocen hasta ahora las curvas de transmitancia de los filtros dicróicos, por lo que falta determinar cuál es el ancho de banda y su longitud de onda dominante.

Para determinar la longitud de onda dominante se promedian los valores de las curvas de transmitancia, para esto se toma el intervalo $400nm$ a $700nm$. Si se asume la curva como un histograma de frecuencias para cada filtro, ver Figura 2.27, entonces la media corresponde a

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k f_i \lambda_i \quad (2.20)$$

En este caso λ_i corresponde al valor de la longitud de onda, f_i es la frecuencia o valor que toma la longitud de onda λ_i , k es el total de longitudes de onda a evaluar y n es la suma de todas las frecuencias.

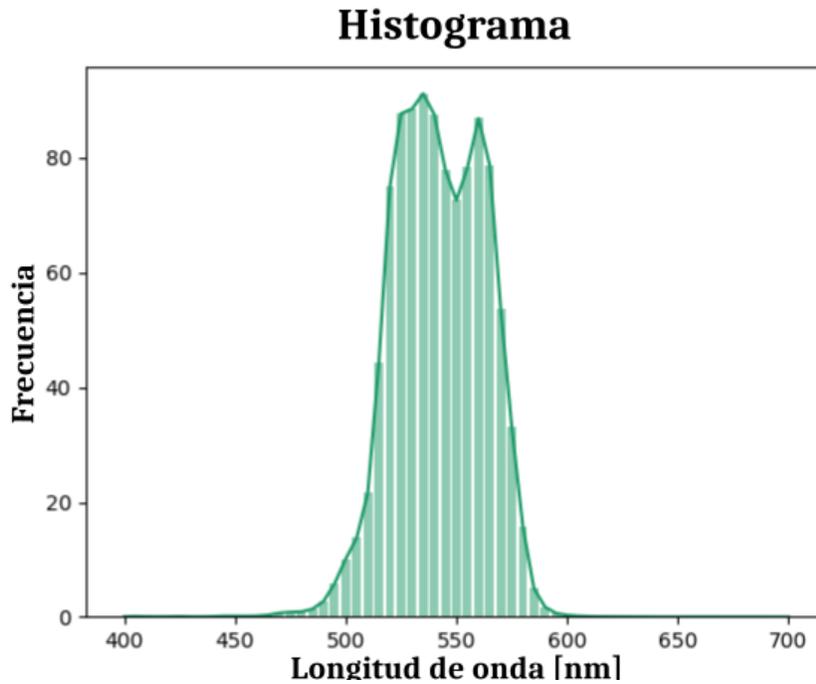


Figura 2.27: Curva de transmitancia vista como un histograma de frecuencias

Reduciendo el intervalo entre $400nm$ y $700nm$, entonces para cada primario se tiene

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_r &= \frac{1}{n}(r_0 400 + r_1 401 + \dots + r_{300} 700) \\ \bar{\lambda}_g &= \frac{1}{n}(g_0 400 + g_1 401 + \dots + g_{300} 700) \\ \bar{\lambda}_b &= \frac{1}{n}(b_0 400 + b_1 401 + \dots + b_{300} 700)\end{aligned}\tag{2.21}$$

Donde cada coeficiente corresponde al valor que toma el primario en la longitud de onda.

Por ejemplo, la energía del primario azul en $\lambda = 405nm$ es $88.51\mu W$, entonces el coeficiente correspondiente es $b_i = 88.51\mu W$, luego n es el valor de la suma de todos los valores de energía, i.e., $n = \sum_{i=0}^{300} b_i$. Sustituyendo los valores encontrados

$$\bar{\lambda}_b = \frac{1}{1863.80}(89.22 \times 400 + 88.51 \times 405 + \dots + 0.01 \times 700)$$

Calculando de esta manera para cada primario se obtiene,

Primario	λ [nm]
R	660
G	540
B	460

Tabla 2.2: Primarios del mezclador RGB

Por otra parte, se calcula el ancho de media altura normalizando la curva de transmitancia a 1, Figura 2.28.

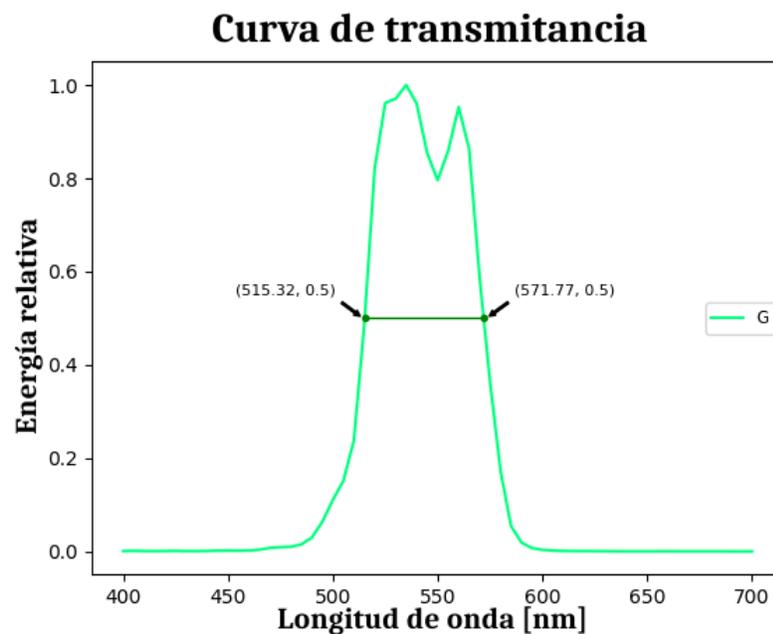


Figura 2.28: Ancho a media altura para la curva de transmitancia del filtro verde

Para cada curva buscamos la longitud de onda para la cual el valor de la energía es la mitad. En el caso del filtro verde, se encuentran dos longitudes de onda y se toma la distancia entre dichos valores y para los filtros rojo y azul, se toma el doble de la distancia entre la longitud de onda promedio y la longitud de onda cuya intensidad es la mitad del máximo.

Primario	λ_1 [nm]	λ_2 [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
R	614.11	—	101.68
G	515.32	571.77	56.45
B	—	501.20	86.54

Tabla 2.3: Valores correspondientes al ancho de pico medio para cada primario

Este procedimiento nos permite conocer la longitud de onda dominante para los primarios en función de las curvas de transmitancia de los filtros dicróicos, pero experimentalmente se observa que los primarios se identifican indistinguibles con diferentes

longitudes de onda proyectadas por el monocromador. Por ejemplo, el primario rojo es indistinguible de la longitud de onda $\lambda = 630nm$. Por esta razón, es conveniente redefinir los primarios de manera que dependan de la visión y sean más precisos respecto al hue que percibido por los observadores, esto sugiere involucrar la sensibilidad del ojo respecto a las longitudes de onda que transmite cada filtro. Por lo tanto, la solución requiere de la convolución de las curvas de transmitancia y la función de eficiencia luminosa $V(\lambda)$

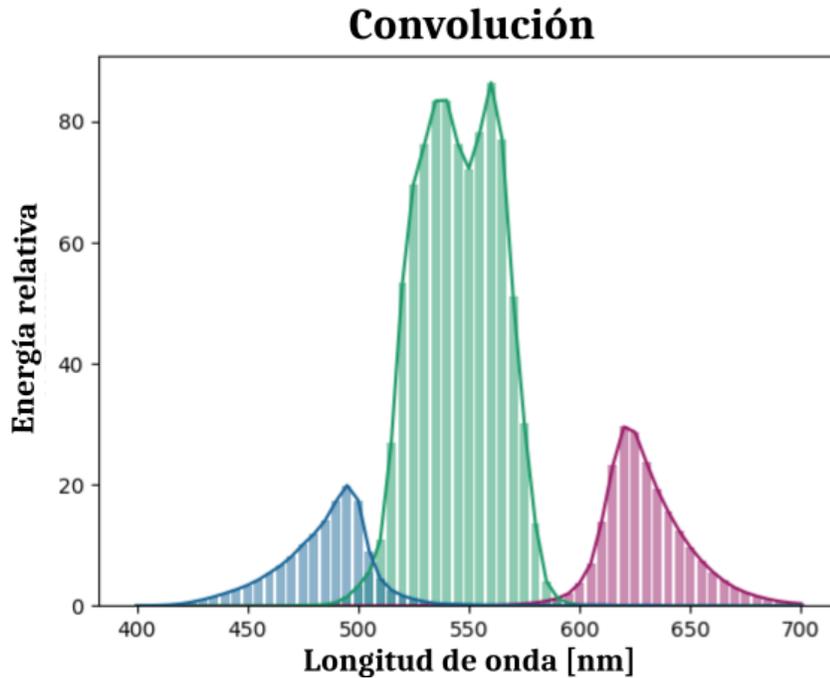


Figura 2.29: Convolución de las curvas de transmitancia de los filtros dicróicos y las función $V(\lambda)$

La Figura 2.29 muestra las curvas resultantes de la convolución entre las curvas de transmitancia y la curva de eficiencia luminosa. Repitiendo el procedimiento anterior, se encuentra la media de las curvas y se definen los nuevos primarios. Estos resultados tienen una mejor correspondencia entre los primarios observados experimentalmente por lo que los primarios finales que se consideraron en este trabajo está dados en la Tabla 2.4

Primario	λ [nm]
R	629.79
G	545.10
B	485.87

Tabla 2.4: Primarios del monocromador experimental

2.3. Selección del observador

La muestra que se utilizará para el experimento será de 10 individuos, esto es aproximadamente la cantidad de observadores que se requirieron en el experimento por Wright antes de su publicación en 1931. A pesar, de no ser una muestra grande, es representativa pues cada observador debe realizar la prueba no sólo una vez, mostrando que los resultados que se generan son consistentes y el error en cada prueba por el mismo observador no es considerable. Por otra parte, el obtener los mismos resultados que en experimentos anteriores realizados por distintos instrumentos en diferentes condiciones da autoridad para justificar el tamaño de la muestra.

Criterios de selección

El experimento se realiza con el objetivo de obtener los valores triestímulo en una población latina. Esta población no participó en los experimentos que se han llevado a cabo, como justificación se quiere mostrar que los valores triestímulo de la población latina corresponde a la mismos que ahora se encuentran estandarizados. Por otra parte, el encontrar los mismos valores que en el experimento del observador estándar de 2° mostraría que la población en cualquier lugar comparte la misma visión de color y que los resultados son válidos en cualquier lugar y aún cuando el experimento se realiza en diferentes condiciones y con diferentes métodos.

Además de la población latina se buscan personas de ambos sexos con una visión cromática sana (ver criterios de exclusión), el rango de edades no tiene restricción, sin embargo, el enfoque del estudio orilla a seleccionar población entre los 18 y 60 años de edad aproximadamente, priorizando observadores jóvenes con la finalidad de tener un ojo joven que no tenga cambios sustanciales o deterioros a causa de la edad. Se permite también la participación de quienes tengan o no algún tipo de entrenamiento relacionado al color o que hayan participado en algún experimento similar.

Criterios de exclusión

Los criterios de exclusión son rígidos, la intención es tener una población aleatoria que comparta una visión sana en un criterio amplio. A continuación, se dictan dichos criterios, poniendo esencial atención en la prueba de discriminación.

Para seleccionar los observadores, es necesario especificar las características que se requieren para la realización del experimento. Entre estas características, se encuentran la restricción de población para que sólo realicen la prueba personas latinas y que no tengan cataratas diagnosticadas.

La edad de los participantes debe quedar entre los límites impuestos para evitar fallos en la precisión, como sería lagrimeo por fatiga en una jornada de trabajo larga, algún

tipo de opacidad de la cornea a causa de la edad, cansancio en la prueba que afecte el estado de ánimo, pérdida de paciencia, postura, etc.

Una primera prueba de exclusión para determinar si un observador tiene deficiencia en la discriminación de color es el test Ishihara [7], esta prueba elimina a dicromatas y a sujetos con alguna anomalía severa de percepción de color. Aún así, los participantes deben realizar una prueba más completa que se describe posteriormente.

Lo que se considera como el criterio determinante es la prueba de discriminación de color, conocida como “Hue Test”, esta prueba es necesaria para determinar si una persona puede o no discriminar entre dos estímulos de color cercanos en hue.

Hue test.

La prueba consiste en ordenar cápsulas plásticas que vienen en 4 series de 21 o 22 fichas cada una, como se muestra en la Figura 2.30., para ordenarlas, cada una de las series se le entrega al sujeto a evaluar donde se ponen todas las fichas en desorden excepto la primera y la última de la serie. Estas fichas son la referencia para que se pueda generar la transición de un Hue a otro siguiendo una gradación continua y quien realiza la prueba tiene 3 minutos para completar cada serie.

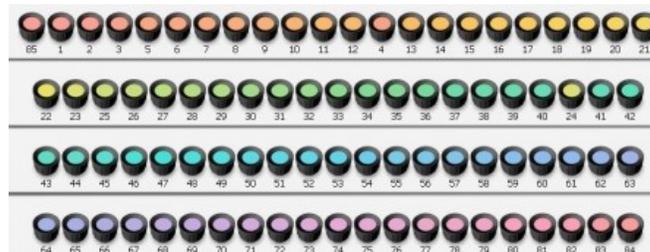


Figura 2.30: Series plásticas del Hue Test utilizados para evaluar la capacidad de discriminación de color.

Las fichas recorren un arcoiris (llendo del extremo rojo al violeta) y todas están dentro de un nivel de luminosidad y cromaticidad intermedio. El principal atributo que cambia entre ellas es su posición angular en el círculo cromático, esto es el ángulo de hue, ver Figura 2.31. El resultado de la prueba se determina capturando el orden que el observador da a cada conjunto de fichas con un software que arroja como resultado el número de errores que se cometieron en el acomodo.

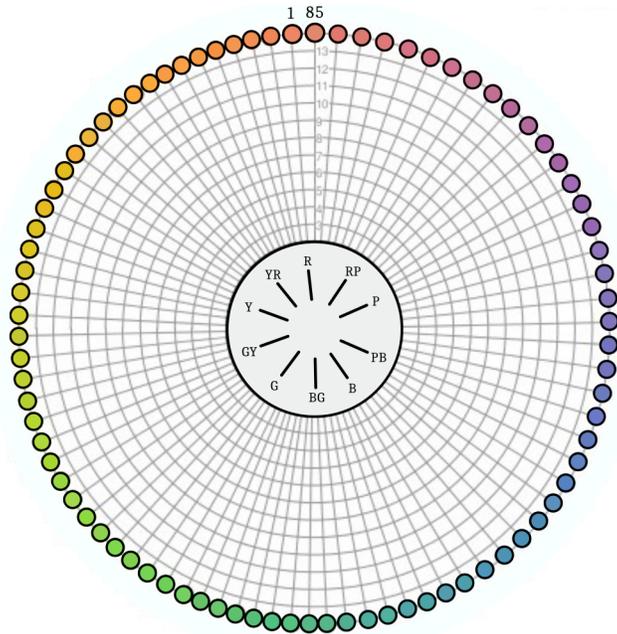


Figura 2.31: Divisiones de donde se obtienen las series de la prueba Hue Test. En total se tienen 85 diferentes Hues.

La prueba es realizada en condiciones de luz con temperatura de color conocida ¹, de preferencia y cuando las condiciones lo permitieron con luz natural y en un ambiente con fondo neutro.

¹Las fuentes blancas utilizadas se caracterizaron midiendo con un espectrorradiómetro su Temperatura de Color en Kelvins



Figura 2.32: Observador realizando el Hue test en condiciones controladas

Los resultados posibles de la prueba son: discriminador perfecto (cero errores al acomodar las 85 fichas de manera perfecta); discriminador superior (hasta 16 errores que equivalen a 4 permutaciones simples o 2 dobles); discriminador promedio (hasta 100 errores) y discriminador bajo más de 100 errores.

Entre los resultados favorables, se tienen discriminador perfecto y discriminador superior. No siendo favorable pero de utilidad para este trabajo, se permite que los observadores cumplan al menos el resultado de discriminador normal pero poniendo un límite máximo de 50 errores. Con esto se establece el criterio de exclusión más importante del trabajo. Resultados con mayor número de errores en la prueba son inmediatamente excluidos.

3.1. Arreglo experimental final

A partir de la descripción de la sección anterior, donde se detalló el funcionamiento del monocromador experimental y el mezclador RGB, se puede montar el arreglo experimental final que contempla todas las partes revisadas. En esta sección se presenta dicho montaje y se explica el procedimiento para obtener experimentalmente los valores triestímulo.

El arreglo experimental final es el conjunto del monocromador experimental y el mezclador RGB, este fue pensado y construido para poder realizar la prueba del observador estándar con un campo visual de 2° . En la Figura 3.1 se muestra el diagrama completo.

Por el lado del monocromador se tiene que A es la fuente de luz que provee de un haz homogéneo el cual es enfocado en la rejilla de difracción que se encuentra en B , al desplazar el tornillo micrométrico se rota la rejilla, dependiendo esta rotación se selecciona cada longitud de onda que se quiere evaluar. El haz sale de la caja que rodea B y atraviesa las rendijas en C , esto permite precisión en la selección de la longitud de onda, permitiendo que sólo se proyecten en la pantalla anchos de banda cercanos a $10nm$. La pantalla G es blanca y es rodeada de un anillo negro que elimina los bordes del haz y provee el campo visual deseado. El resto del fondo es una tela gris mate que permite relajar la vista del observador al desarrollar el experimento, ver Figura 3.3.

Por el lado del mezclador RGB, se tienen tres fuentes de poder E que alimentan las lámparas incandescentes dentro de D , cada lámpara corresponde a uno de los canales R, G y B. Cada canal proyecta un haz de luz con una longitud de onda dominante a causa de los filtros dicróicos, los haces de color se proyectan en la misma pantalla G

Finalmente, la última parte del diagrama indica la posición del observador F , este se encuentra a una distancia aproximada de 50 cm, y dado que el anillo tiene una circunferencia interior de 2.8 cm, entonces el observador puede igualar con un campo visual de 2°

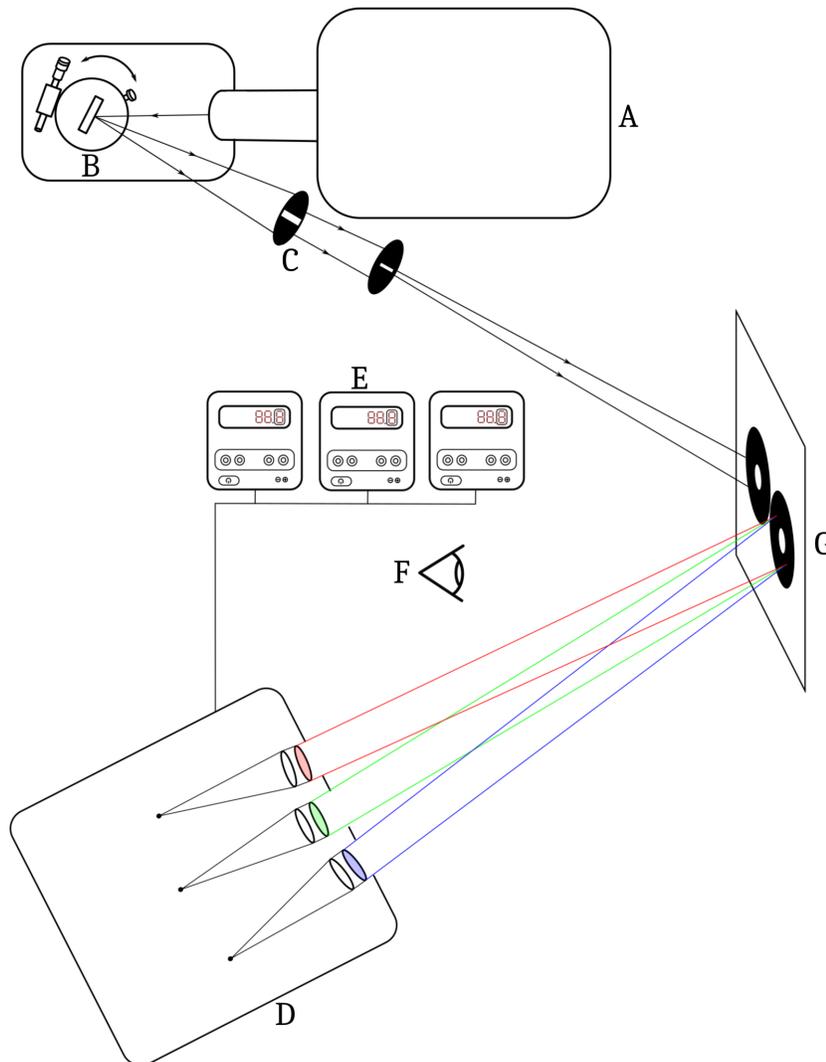


Figura 3.1: Arreglo experimental diseñado y construido para medir lo valores triestímulo para un campo visual de 2°

A continuación, presentamos fotografías de los instrumentos. En la Figuras 3.2, 3.3, se aprecia el monocromador, conformado prioritariamente por la fuente, el sistema dispersor y las rendijas, descritas en Figura 3.1

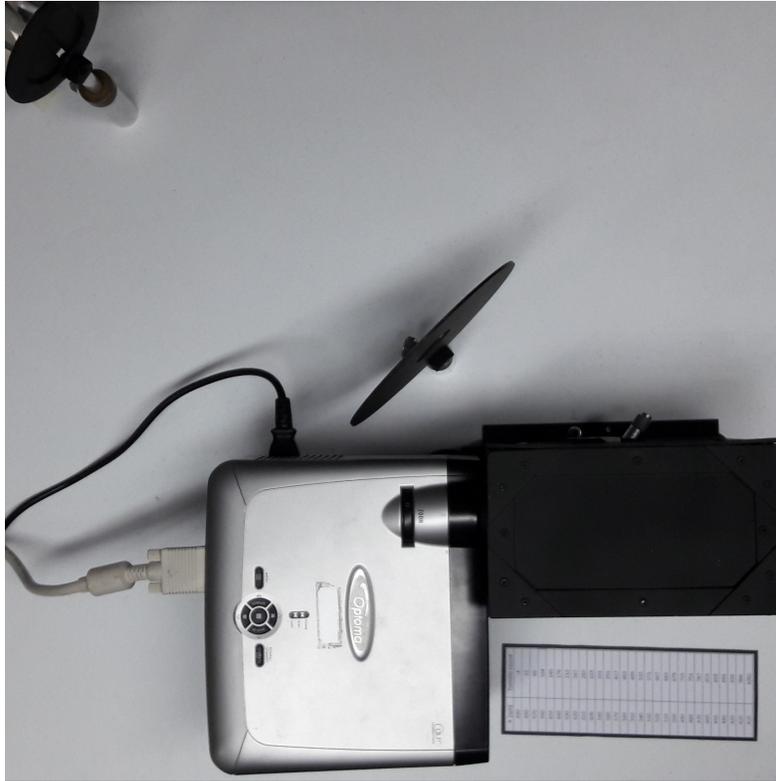


Figura 3.2: Fotografía aérea del monocromador experimental implementado para seleccionar longitudes de onda cada 10 nm, dentro del intervalo 410 nm a 690 nm

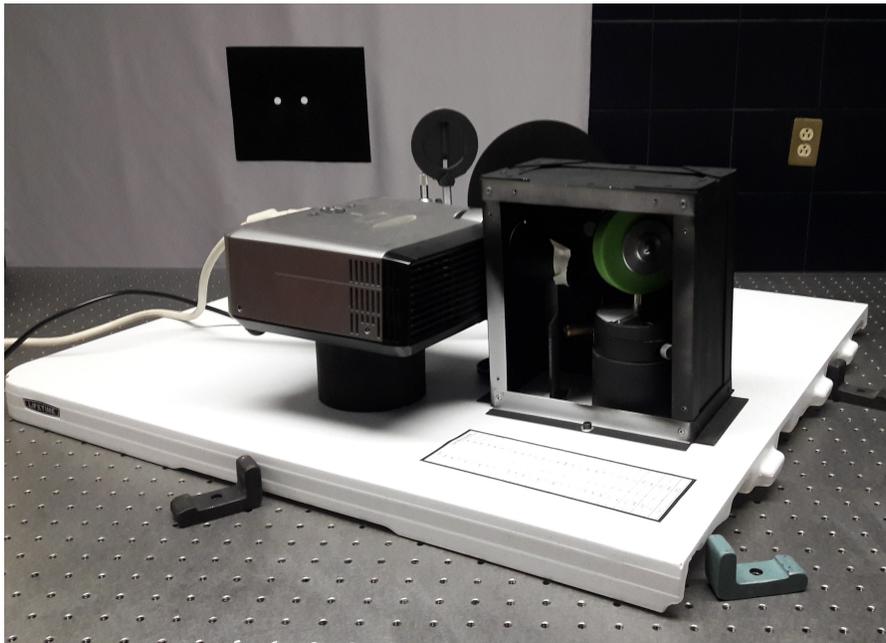


Figura 3.3: Fotografía lateral del monocromador. Se removió un lado de la caja que contiene a la montura para mostrar el interior

El haz de luz proveniente del monocromador se proyecta sobre la pantalla del fondo, la cual es un círculo blanco rodeado de una tela negra que reduce las molestias causadas por la luz de fondo, ver Figura 3.3. La montura se puede ver en Figura 3.4, la rejilla de difracción se encuentra dentro del compartimento superior.

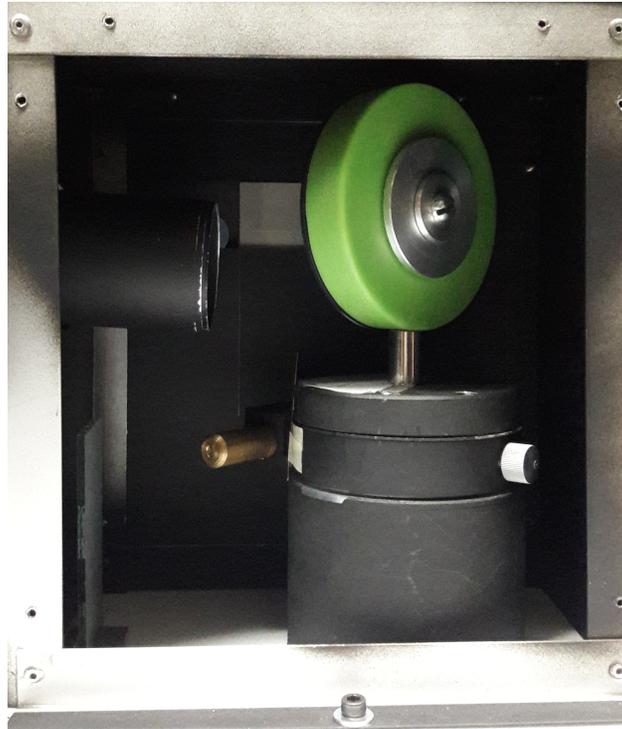


Figura 3.4: Montura del monocromador experimental donde se sostiene la rejilla de difracción

Por parte del mezclador RGB, se muestran las fuentes de poder en la Figura 3.5, el voltaje máximo de trabajo es de 16V que corresponde a los dígitos del lado derecho de cada fuente.



Figura 3.5: Fuentes de poder con los cuales se alimentan las lámparas del mezclador RGB

3.2. Realización del experimento

3.2.1. Visión general

Para realizar el experimento se requiere de un observador, de la muestra descrita anteriormente y de un ayudante. La función del ayudante es explicar al observador el funcionamiento del aparato, el trabajo a realizar y el procedimiento de ajustar el voltaje de la fuente de poder para igualar los estímulos de color de prueba.

Primero, se coloca al observador a la distancia acordada para que la imagen de los estímulos visuales corresponda a un campo visual de 2° , se le muestra donde se proyecta el estímulo de prueba y el estímulo generado por la mezcla, el observador debe comprender el funcionamiento de ambos antes de iniciar la prueba. El ayudante enciende los aparatos dejando ver solamente la pantalla con el estímulo de prueba seleccionando la longitud de onda más corta a igualar ($410nm$). El observador se encarga de igualar el primer estímulo variando los voltajes de las tres fuentes, una vez hecho, el ayudante debe anotar los valores de las fuentes.

El ayudante girará el tornillo micrométrico tanto como se necesite para cambiar la longitud de onda una distancia de $10nm$, para cada una de estas longitudes de onda, el observador repite el proceso de igualación y se anotan nuevamente los resultados. En caso de que el observador no sea capaz de igualar algún estímulo, el ayudante debe desaturar el estímulo de prueba, esto se hace girando el canal R, G o B según sea el caso, de manera que este se proyecte en la región del estímulo de prueba. El canal transferido debe desaturar poco a poco, en cada paso se debe intentar igualar con los dos canales restantes. El ayudante decide el primario a ser transferido basado en la teoría revisada anteriormente, en estos casos se obtendrán valores negativos en dicho primario utilizado para desaturar.

El observador deberá realizar la igualación de 30 estímulos de color correspondientes a la región ($410nm - 690nm$).

El observador debe tener cuidado en cada igualación, tratando de evitar la fatiga, se le pide que una vez completada una igualación este aparte su vista del campo de visión dirigiéndose hacia el resto de la pared que fue una tela gris y que confirme si su igualación es satisfactoria.

El ayudante se encarga de recopilar todos los datos obtenidos y almacenarlos para su posterior análisis. Los datos que se registran son los coeficientes R , G y B

3.2.2. Procedimiento de medición

Antes iniciar el experimento, se le pide al observador firmar una carta de consentimiento informado, ver apéndice A.6 y posteriormente llenar sus datos en la hoja con el

formato generado para la adquisición de los datos experimentales.

Como el requisito más importante de la prueba es contar con una visión sana, se le aplica la prueba de discriminación de color "Hue test" y se registra el número de errores, con esto se calcula su puntuación y se determina si es apto o no para el experimento. El observador que obtiene un resultado de observador normal o superior continua con un breve entrenamiento sobre la igualación de color.

El entrenamiento consiste en una rutina, donde para empezar, se le enseñan al observador los conceptos de mezcla de luces y se le muestran ejemplos de algunas mezclas de color entre los primarios R , G y B . Después de una introducción teórica, se les piden 5 tareas.

- i) Igualación en luminosidad de tres estímulos de hue similar a los primarios. En esta tarea se busca que el observador aprenda a manejar las fuentes de voltaje, de manera que pueda entender el concepto de luminosidad.
- ii) Igualación de dos estímulos que requieren solamente dos primarios. Se elige este orden por la facilidad de hacer mezclas con dos fuentes.
- iii) Igualación de dos estímulos que requieren un coeficiente negativo. La intención aquí es mostrarle al observador que algunos estímulos no son igualables al sólo agregar los tres primarios, en este caso, el primario se gira proyectándose sobre el color de prueba. La desaturación causa que el color de prueba cambie de hue y de luminosidad, permitiendo que se pueda igualar con los dos primarios restantes.
- iv) Igualación del blanco de la fuente. Esto permite obtener los coeficientes que se utilizan en el método de factores, además el observador puede combinar libremente los tres primarios de manera que puede conocer la gama de colores que se pueden producir.

Este entrenamiento permite que el observador entienda los conceptos teóricos, además permite al observador saber cuándo se requiere girar la proyección del primario para desaturar el color de prueba.

Se proponen dos métodos para el experimento del observador estándar.

Método de los factores espectrales

Este método consiste en igualar el blanco de la fuente para obtener los coeficientes necesarios para compensar las funciones de igualación de color.

El observador iguala el blanco como

$$W = R_w \mathbf{R} + G_w \mathbf{G} + B_w \mathbf{B} \quad (3.1)$$

de donde la lectura de los coeficientes determina el valor de los factores espectrales

$$\begin{aligned} F_r &= \frac{\max(R_w, G_w, B_w)}{R_w} \\ F_g &= \frac{\max(R_w, G_w, B_w)}{G_w} \\ F_b &= \frac{\max(R_w, G_w, B_w)}{B_w} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Cada igualación que hace el observador sobre un estímulo de color se multiplica por los factores como sigue

$$Q = RF_r\mathbf{R} + GF_g\mathbf{G} + BF_b\mathbf{B} \quad (3.3)$$

La aceptación de la igualación del blanco depende de la medida tomada para la temperatura de color. La temperatura de color es una medida que relaciona el color de una fuente con el color de un cuerpo negro radiando a cierta temperatura [1]. Por ejemplo, una lámpara incandescente de temperatura de color de $2800K$ simula un cuerpo negro con una temperatura de $2800K$.

Cada igualación del blanco de la fuente se mide con un espectrorradiómetro Konika Minolta y se anota la temperatura de color de la fuente del monocromador, así como el blanco de la mezcla. Dada la complejidad de igualar el blanco, se repite la igualación 3 veces y se toma el promedio de los valores R_w , G_w y B_w , siempre que la temperatura de color tenga una diferencia menor a $500K$ respecto a la temperatura de color de la fuente. En caso de que la diferencia sea mayor para todas las igualaciones se toman los valores que correspondan a la menor diferencia.

Método de la fuente equienergética

En este método cada longitud de onda que se selecciona para proyectar un estímulo de color en el monocromador se debe atenuar de manera que todos los estímulos de color tengan la misma energía. Para esto es importante conocer la curva espectral de la fuente del monocromador, la cual es un proyector que se conecta a una computadora, ver Figura 3.6

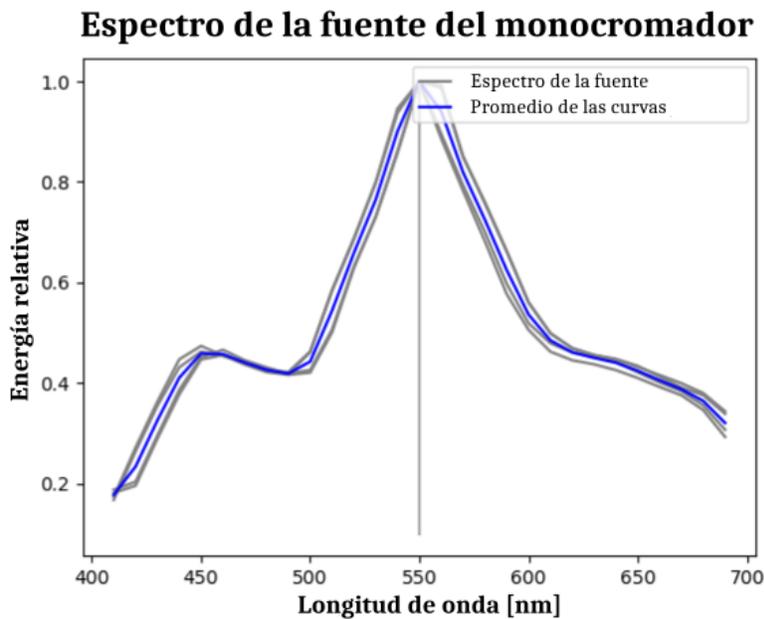


Figura 3.6: Curva espectral del monocromador. En gris se muestran las repeticiones de la medición y en azul el promedio de las curvas

Tomando la curva promedio, se atenúa la fuente del proyector utilizando pantallas grises que se generaron digitalmente. Para atenuar la luz proyectada, se seleccionó la energía más baja del espectro y se ajusta una pantalla gris adecuada a cada longitud de onda para igualar la energía seleccionada, en este caso la mínima energía se encuentra en $\lambda = 410nm$

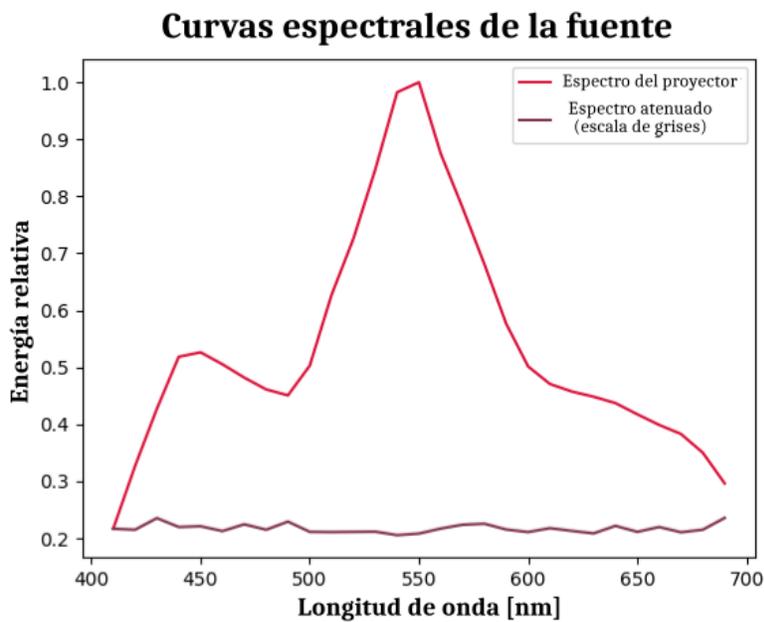


Figura 3.7: Curva espectral de la fuente y curva espectral atenuada con pantallas

Como se ve en la Figura 3.7, el espectro se vuelve casi constante, exceptuando por el ruido causado por el detector S120c usado con Thorlabs PMD100. Este ruido se amplifica en baja energía.

4.1. Descripción de la muestra

El experimento del observador estándar para un campo visual de 2° se realizó para 15 observadores, los cuales cumplieron los criterios de exclusión e inclusión descritos anteriormente. Inicialmente, se examinaron a 18 candidatos donde se encontraron 3 con deficiencia en discriminación del color, a 2 de ellos se les realizó la prueba de discriminación Hue test y al otro solamente se aplicó la prueba Ishihara. Los tres observadores fueron descartados del experimento. De los 18 sujetos iniciales, entonces 15 realizaron las igualaciones del experimento, donde 13 realizaron únicamente el método de los factores espectrales y 15 también lo hicieron con el método de la fuente equienergética. La distribución de sexo y edad se muestran a continuación

Edad	Hombres	Mujeres	Total
(15-25)	1	2	3
(25-35)	4	4	8
(35-45)	1	2	3
(45-60)	0	1	1

Tabla 4.1: Distribución del sexo y edades de la muestra de observadores

Además es importante, mostrar el número de errores de los observadores en la prueba del Hue Test, ver Tabla 4.2, donde el máximo permitido para realizar la prueba son 50 errores.

Observador	Hombre	Mujer	Errores en Hue test	Observaciones
1	✓		16	
2		✓	4	
3		✓	No realizó	Descartado
4	✓		32	
5	✓		16	
6	✓		28	
7		✓	8	
8		✓	12	
9	✓		36	
10		✓	12	
11		✓	16	
12		✓	8	
13	✓		Deficiencia	Descartado
14	✓		16	
15		✓	36	
16	✓		32	
17		✓	48	
18	✓		Deficiencia	Descartado
19	✓		No realizó	Descartado

Tabla 4.2: Descripción de la muestra de observadores examinados para realizar el experimento del observador estándar colorimétrico

Los observadores realizaron la prueba para los dos métodos descritos en el capítulo anterior en el intervalo $(410 - 690)nm$ para cada $10nm$.

Los datos de las observaciones se registraron en Volts, que es la unidad que entrega la lectura de la pantalla digital de la fuente de alimentación de las lámparas. Dado que el voltaje de salida de la fuente sólo indica el aumento de luminosidad de la fuente de alimentación de cada primario, sin tomar en cuenta el filtro dicróico, es necesario entonces realizar una transformación de voltaje a energía en todos los datos. La transformación se muestra en la Tabla 4.3 para cada Volt aunque en esta tabla no se muestra, la transformación está medida cada 0.1 Volt en cada primario. En la figura 5.25 ya se mostraron las gráficas de conversión correspondientes.

Voltaje [V]	Energía		
	R [μW]	G [μW]	B [μW]
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0.878	0.235	0.083
3	14.95	7.43	3.827
4	66.2	30.96	23.58
5	163.4	78.1	62.5
6	312.5	143.0	132.6
7	530	232.7	221.7
8	802	346.2	336.4
9	1143	495.2	471.4
10	1525	662	621
11	1957	845	795
12	2432	1039	989
13	2983	1256	1191
14	3552	1505	1418
15	4189	1752	1652
16	4766	1991	1879

Tabla 4.3: Transformación de voltaje a energía

4.2. Métodos de ajuste de datos propuestos

En esta sección se muestran los resultados para ambos métodos, donde en cada uno se ajustaron los datos de dos maneras.

- i) **Promedio de curvas.** Este procedimiento se utilizó por Guild y Wright para mostrar la curva que representa la superposición de las observaciones realizadas en cada trabajo. Esta curva es importante porque centra las variaciones de los valores triestímulo para cada longitud de onda, por lo que la curva se suaviza sin perder la información de la forma. Por otro lado, no hay ninguna afirmación ni suposición que indique que las funciones de igualación de color son suaves, así que se considera importante analizar las variaciones de los observadores en sus igualaciones mostrando las coincidencias en los máximos y mínimos locales, así como las intersecciones con el eje λ que representan la desaturación de los estímulos de color.
- ii) **Regresión con splines cúbicos.** Este método suaviza la curva minimizando la distancia entre la curva ajustada y los puntos, similar al método de mínimos cuadrados. En este caso, cada curva se ajustó utilizando este modelo cúbico particionando los datos con 7 nodos parcialmente equiespaciados, es decir, se ajustan 8 curvas polinomiales de tercer grado para cada nodo y se establecen condiciones de continuidad entre las curvas y continuidad de la primera y segunda derivada en los

nodos. Este método es más complejo que el primero y crea una curva suave en todo el intervalo que muestra la visión tricromática de un observador promedio. La CIE ajustó y suavizó los resultados de los experimentos de Guild y Wright para la estandarización de 1931, esto justifica la necesidad de utilizar un método como el propuesto.

4.3. Método de los factores espectrales

4.3.1. Igualación del blanco de la fuente

Para los 13 observadores que relizaron este método, se promediaron sus curvas para cada longitud de onda igualada. Cada observador igualó también el blanco de la fuente del monocromador tres veces y se promediaron los valores obtenidos, siempre que los voltajes utilizados generaran un blanco con una temperatura de color con una diferencia menor a los $500K$ respecto a la temperatura de color medida para la fuente del monocromador. La temperatura de color promedio de la fuente blanca utilizada fué de $6300K$.

La variación que se encuentra en este método es debida a la propia percepción de color de los observadores y a la falta de experiencia en identificar diferencias de tendencia y luminosidad. Otras razones por las cuales las igualaciones tienden a variar pueden ser que las igualaciones toman en promedio tres horas y los observadores sufren fatiga, sobresaturación de los conos, desesperación al no poder igualar fácilmente los estímulos de color.

Los valores triestímulo, obtenidos de la transformación a energía, son multiplicados por los factores obtenidos al igualar el blanco de la fuente (W), los cuales también se transforman a energía. Por ejemplo, el observador 1 obtuvo en promedio la lectura

$$W(V) = 9.5\mathbf{R} + 11.7\mathbf{G} + 13.4\mathbf{B} \quad (4.1)$$

que transformada a energía es

$$W = 1328.28\mathbf{R} + 979.25\mathbf{G} + 1279.31\mathbf{B} \quad (4.2)$$

De aquí, los factores espectrales quedan determinados como

$$\begin{aligned} F_r &= 1 \\ F_g &= 1.3564 \\ F_b &= 1.0383 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.4, se muestran los coeficientes de los primarios (en Volts y convertidos a energía) de las igualaciones del blanco de la fuente por cada observador.

Observador	R [V]	G [V]	B [V]	R [μW]	G [μW]	B [μW]
1	9.5	11.7	13.4	1328.28	979.25	1279.31
2	9.1	11.3	13.2	1179.47	901.86	1234.48
3	11.6	13.6	15.1	2233.34	1403.62	1675.03
4	12	12.8	15.8	2432	1209.69	1833.97
5	9.6	12	14	1366.77	1039	1418
6	10.8	12.4	15	1867.64	1121.86	1652
7	9.7	11.9	13.4	1405.5	1018.89	1279.19
8	11.8	14.2	16.0	2330.69	1555.27	1879
9	8.8	11.9	12.1	1070.87	1018.89	1008.68
10	8.4	10.7	12.6	931.47	788.82	1108
11	13.1	16	16	3038.64	1991	1879
12	9.9	13.3	14.9	1484.58	1328.54	1628.86
13	9.7	13.3	15.0	1366.77	1328.54	1652

Tabla 4.4: Datos sobre la igualación del blanco de la fuente por 13 observadores

Únicamente con la finalidad de representar las igualaciones del blanco para todos los observadores, se puede pedir la condición $r_w + g_w + b_w = 1$. De esta manera, los coeficientes se pueden mostrar como puntos en \mathbb{R}^3 si cada eje corresponde a los primarios R, G y B. Por simplicidad y para una mejor visualización, se elige el plano RG, ver Figura 4.1.

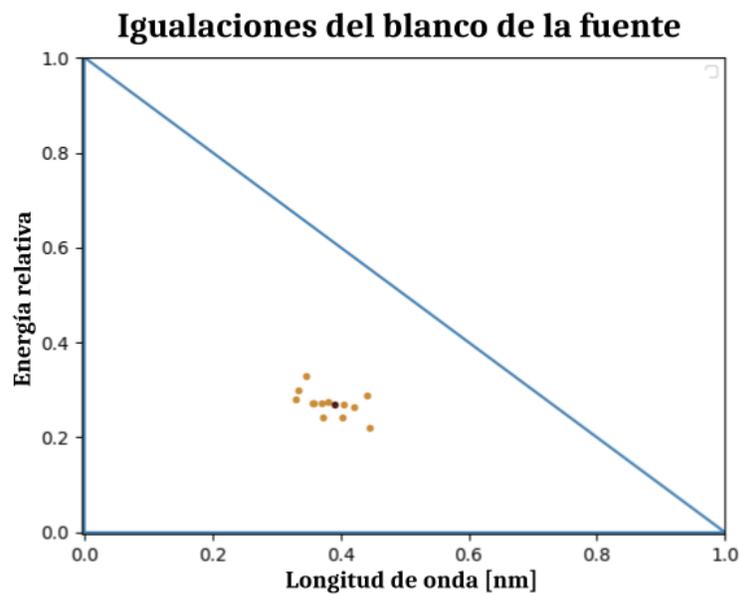


Figura 4.1: Igualaciones del blanco de la fuente por los 13 observadores, el promedio de la cantidad de rojo y verde necesarios para igualar el blanco se representa en color negro

4.4. Resultados de la igualación por el Método de Factores

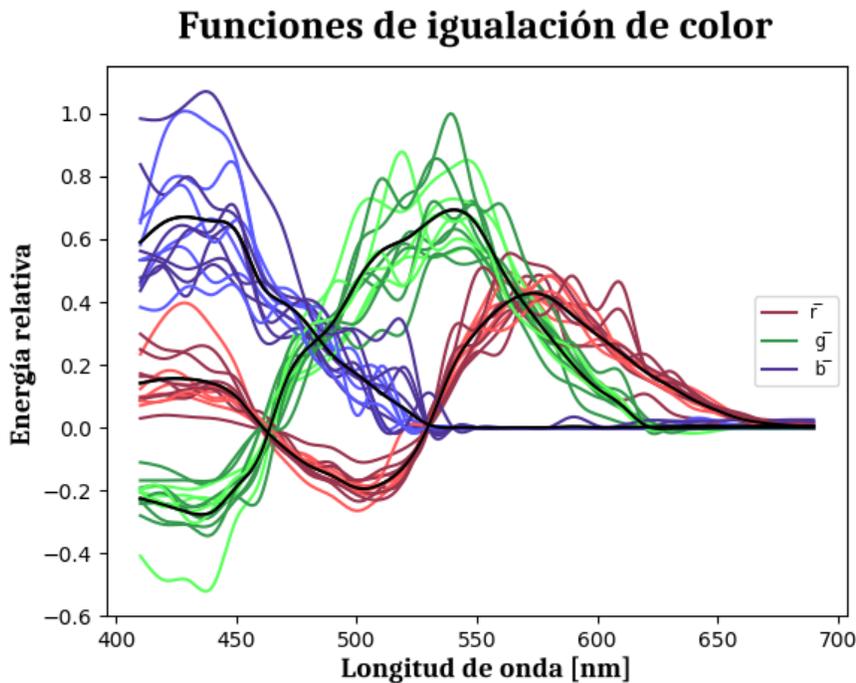


Figura 4.2: Superposición de los valores triestímulo para 13 observadores y su promedio (negro) por el método de factores espectrales

La Figura 4.2 muestra la superposición de las funciones de igualación de color \bar{r} , \bar{g} y \bar{b} para los 13 observadores, cada una está representada en color, el promedio de estas curvas se representa en negro. Estas curvas describen la percepción del espectro visible de los observadores en función de las tres fuentes utilizadas como primarios. En la Tabla A.2 del apéndice A, se muestran los resultados numéricos del ajuste de los 13 observadores. En esta tabla los resultados originales están en voltaje, una vez convertidos a energía cada renglón de esta tabla representa los valores triestímulo que cada observador ha propuesto para esa banda del espectro visible. En la literatura se llama funciones de igualación de color (Color Matching Functions) a las tres gráficas que obtenemos de estas tabulaciones, representadas como las funciones $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$ poniendo a la longitud de onda en el eje de las abscisas.

Haciendo uso del método de los splines cúbicos estos mismos datos se muestran como puntos en el plano, y la función de igualación de color ajustada resulta del método de regresión descrito anteriormente, ver Figura 4.3. Los datos de este ajuste se obtienen utilizando los factores espectrales de la igualación del blanco, así como se hizo ajustando la curva promedio.

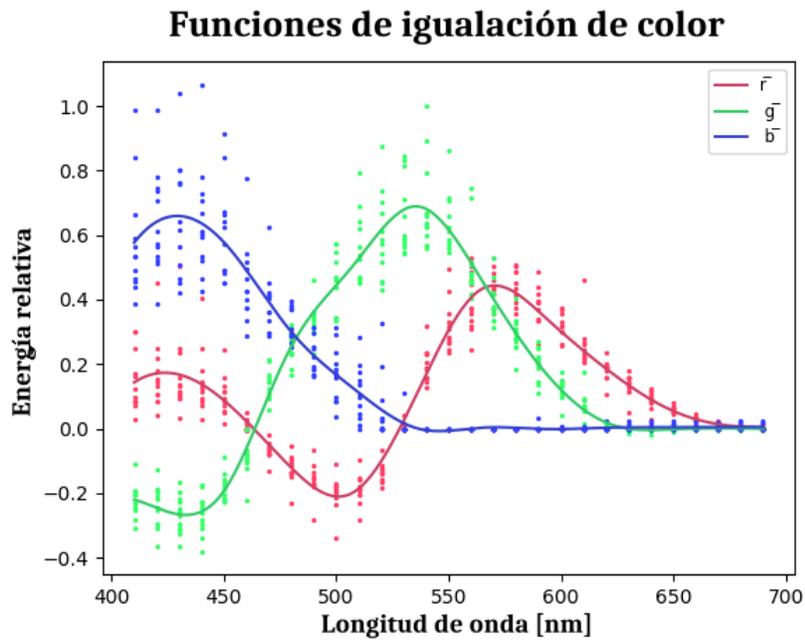


Figura 4.3: Valores triestímulo ajustados con splines cúbicos para el método de los factores espectrales por el método de factores espectrales

Comparación entre los métodos de ajuste propuestos

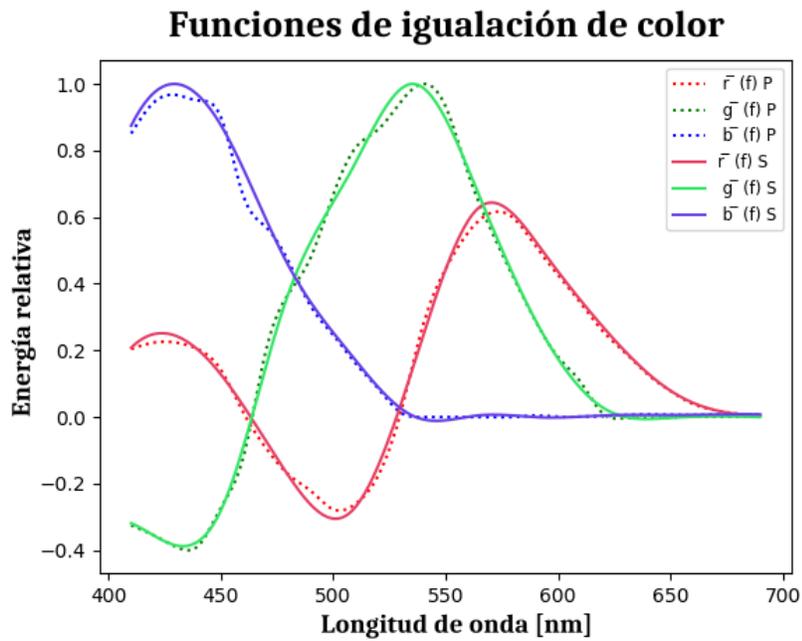


Figura 4.4: Comparación entre los 2 métodos de ajuste de la curva para los valores tristímulo obtenidos experimentalmente por el método de factores, en S se muestra el ajuste por el método de splines cúbicos y en P se muestra el promedio de las curvas

En Figura 4.4 se comparan las funciones de igualación de color encontradas para cada método de ajuste. Se nota que ambos métodos son consistentes entre sí, reproduciendo prácticamente la misma curva, como consecuencia de esto y a causa de que las curvas reportadas por Guild y Wright son suaves, entonces se puede optar por utilizar el conjunto de datos obtenido por el método de regresión con splines cúbicos. Con este conjunto de datos, se hará la comparación con las curvas reportadas por Guild y Wright en la sección “Discusión” presentada en el capítulo siguiente.

4.5. Resultados por el método de la fuente equienergética

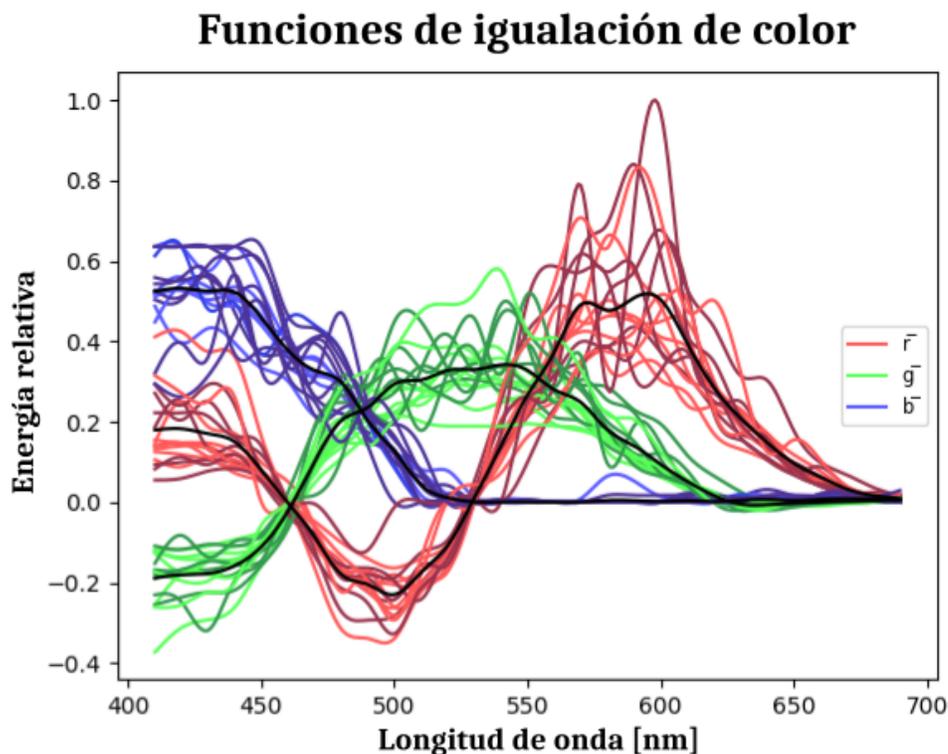


Figura 4.5: Valores triestímulo espectrales para 15 observadores por el método de la fuente equienergética, se superponen las curvas de cada observador y se muestra el promedio de dichas observaciones (negro)

Los 15 observadores realizaron el método de la fuente equienergética, en este método no se realiza una igualación del blanco pues al tener una fuente equienergética no se requiere ningún factor de compensación para los primarios. En la Figura 4.5, se muestran los resultados, nuevamente la superposición de las curvas de igualación de color \bar{r} , \bar{g} y \bar{b} se representan en colores, mientras el promedio de ellas en negro. En el Apéndice 4.6.2 se muestran las tablas de resultados del ajuste de los 15 observadores que hicieron

el método de fuente equienergética.

Ajustando los datos nuevamente con el método de regresión se obtienen las curvas de igualación de color, ver Figura 4.6.

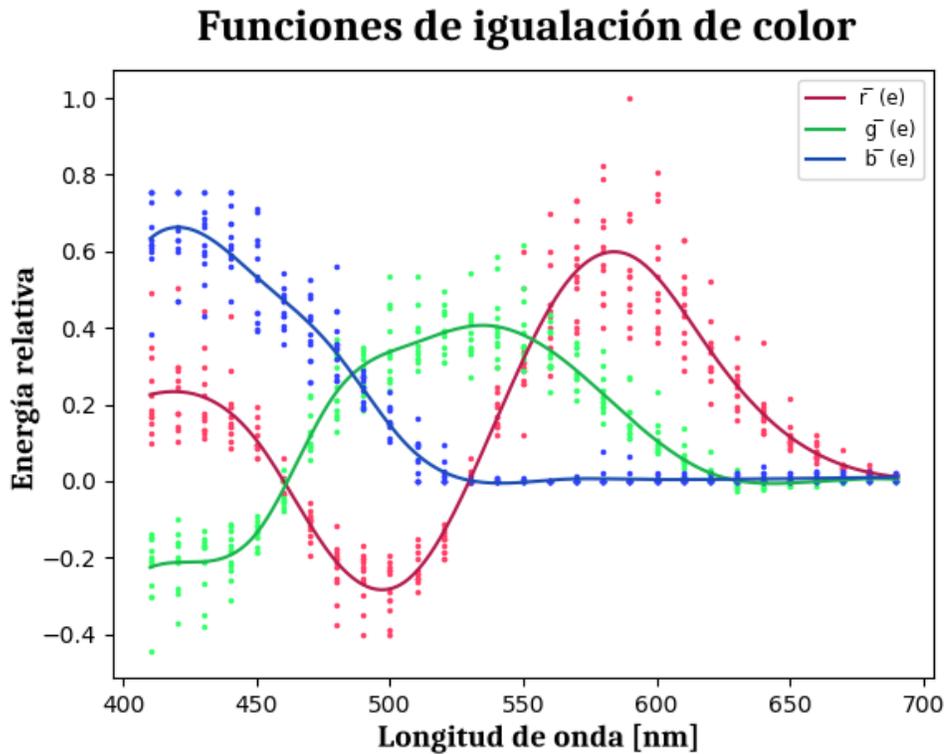


Figura 4.6: Valores triestímulo de los 15 observadores ajustados por splines cúbicos para el método de la fuente equienergética

Comparación entre los métodos de ajuste propuestos

Nuevamente se puede ver la coincidencia de los resultados al hacer la comparación entre el promedio y el ajuste por splines cúbicos, como se muestra en la Figura 4.7

En Figura 4.7 se comparan las funciones de igualación de color encontradas para los resultados obtenidos en el método de la fuente equienergética y para cada método de ajuste descrito previamente. Para el método de la fuente equienergética, el promedio y el ajuste por regresión coincide como se esperaba del anterior método. Por esta razón, evitamos el ruido por problemas al igualar de los observadores tomando los valores del ajuste suavizado. Aquí es clara esta justificación al tener en la curva del primario rojo dos máximos.

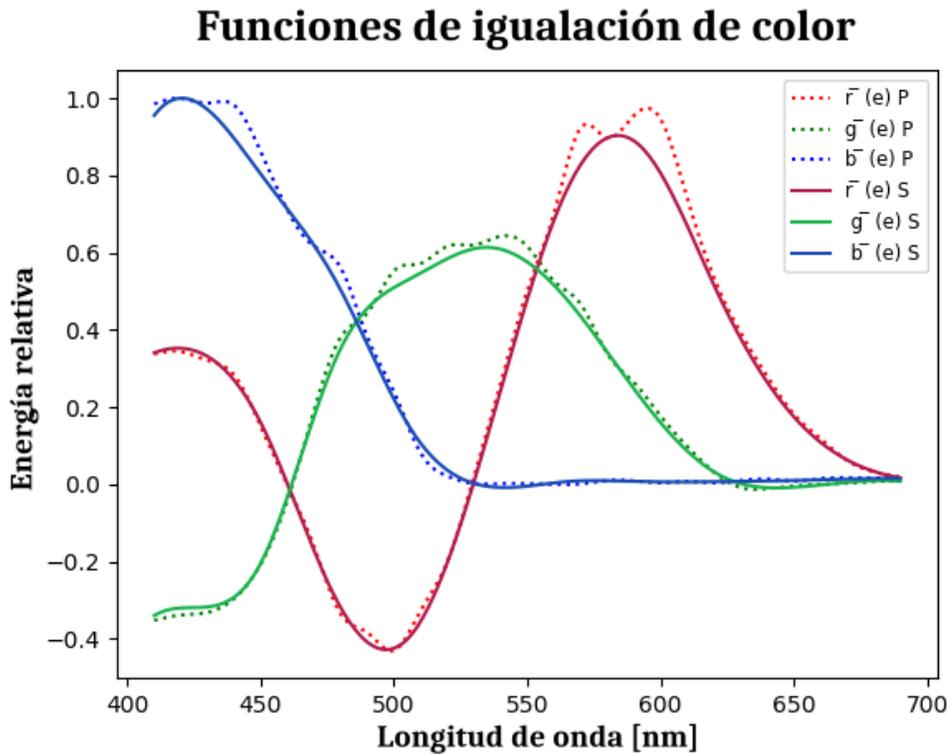


Figura 4.7: Comparación entre los 2 métodos de ajuste de los resultados de 15 observadores para la igualación con fuente equienergética, en S se muestra el ajuste por el método de splines cúbicos y en P se muestra el promedio de las curvas

4.6. Comparación entre el método de factores y el de fuente equienergética

4.6.1. Comparación en funciones de igualación de color

Los métodos propuestos en este trabajo tienen la diferencia de la distribución espectral de la fuente, las funciones de igualación para ambos métodos difieren principalmente en el primario verde. En el método equienergético las longitudes de onda cercanas al máximo del espectro 550nm son las más afectadas por la atenuación, por eso con respecto al método de factores, el primario verde pierde luminosidad y en consecuencia la energía que se utilizó para las igualaciones de este primario son menores a las del primario rojo y azul. En la Figura 4.8, se muestran las funciones de igualación de color para los 2 métodos descritos.

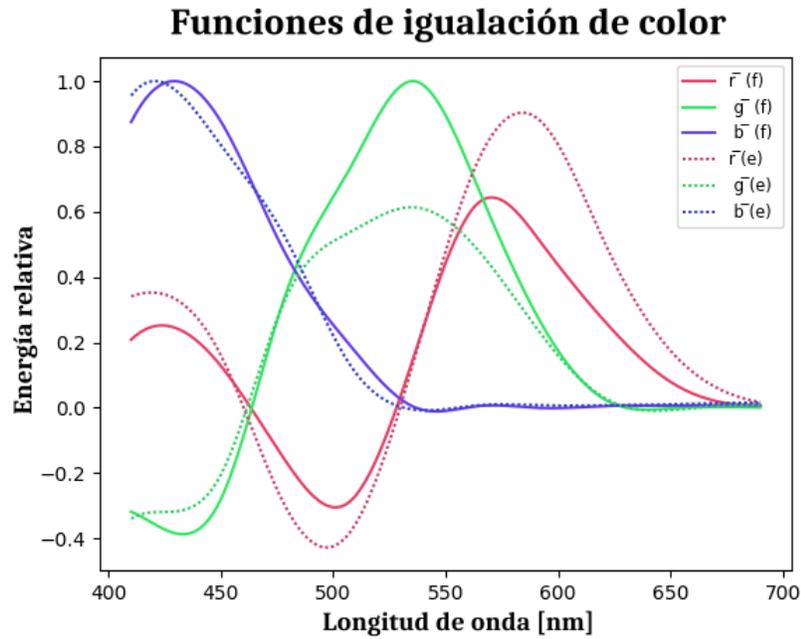


Figura 4.8: Comparación de los resultados entre el método de factores espectrales (f) y el método de la fuente equienergética (e)

Puede notarse también que la mayor coincidencia es para el primario azul.

4.6.2. Comparación en Coordenadas Cromáticas

Bajo la condición de transformación a coordenadas cromáticas, se pueden comparar mejor visualmente los resultados obtenidos pues se muestra la cantidad de energía utilizada de cada primario entre el total de la energía de cada igualación, es decir, la transformación que corresponde

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{\bar{r}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} \\
 g &= \frac{\bar{g}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} \\
 b &= \frac{\bar{b}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

En la Figura 4.9, se muestra la comparación entre los métodos en términos de las coordenadas cromáticas. Se aprecia que los observadores perciben los primarios aproximadamente como $B = 460nm$, $G = 530nm$ y $R = 630nm$. La determinación visual de los primarios es cuando la igualación de un estímulo de color es igualado utilizando solamente uno de los primarios, mientras los otros se encuentran apagados o con una energía muy cercana a cero.

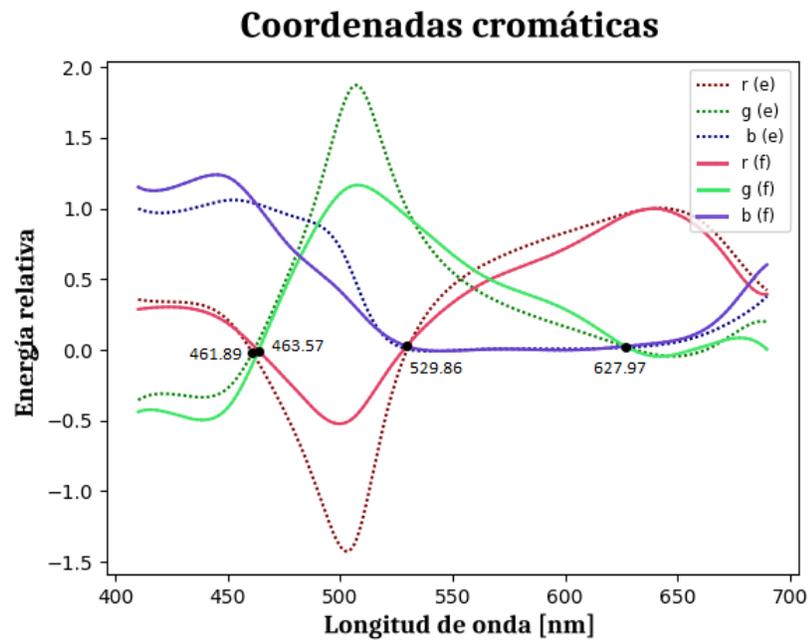


Figura 4.9: Comparación entre el método de factores espectrales (f) y el método de la fuente equienergética (e) con la transformación a coordenadas cromáticas

Puede verse que en esta representación los resultados muestran diferencias más marcadas. Ni siquiera el azul se parece como en el caso de la Figura 4.8 y el rojo se acerca más en la región de las longitudes de onda largas pero se obtiene una mayor diferencia en las longitudes de onda intermedias.

Introducción

El objetivo de este trabajo ha sido el de determinar los valores triestímulo para el observador estándar colorimétrico de 2°, de modo que la discusión de los resultados obtenidos se centrará en comparar los resultados aquí obtenidos con los encontrados y reportados por los trabajos pioneros de Guild y Wright.

La justificación de este trabajo es mayormente por las inconsistencias encontradas en lo reportado, como se analizará más adelante, y con la finalidad de obtener una actualización para el conjunto de datos estandarizado desde 1931.

Comparación entre los dos métodos propuestos

Recordemos que nuestro experimento de igualación se realizó siguiendo dos métodos, por el de factores y por el de uso de una fuente equienergética, de manera que cada método mostró al observador un espectro diferente a ser igualado.

La forma de las funciones de igualación de color son también afectadas por el espectro de la fuente de la cual se seleccionan las longitudes de onda, en nuestro caso el monocromador. Las coordenadas cromáticas son menormente afectadas, pues las proporciones para igualar algún estímulo de color monocromático deben ser consistentes, aunque experimentalmente no se encontró una proporción idéntica, dadas las variaciones de los observadores que no repitieron el mismo conjunto de valores triestímulo. Comparando los resultados presentados en este trabajo por los dos métodos propuestos, se puede confirmar lo que se dijo anteriormente,

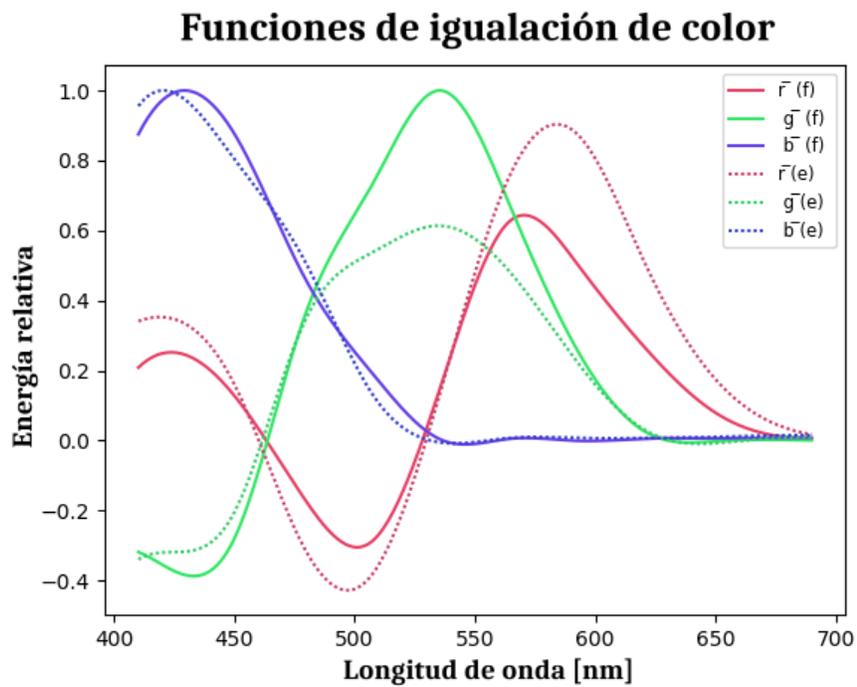


Figura 4.10: Comparación entre las Funciones de Igualación de Color para los dos métodos propuestos en este trabajo, f es para el método de factores y e para el de fuente equienergética

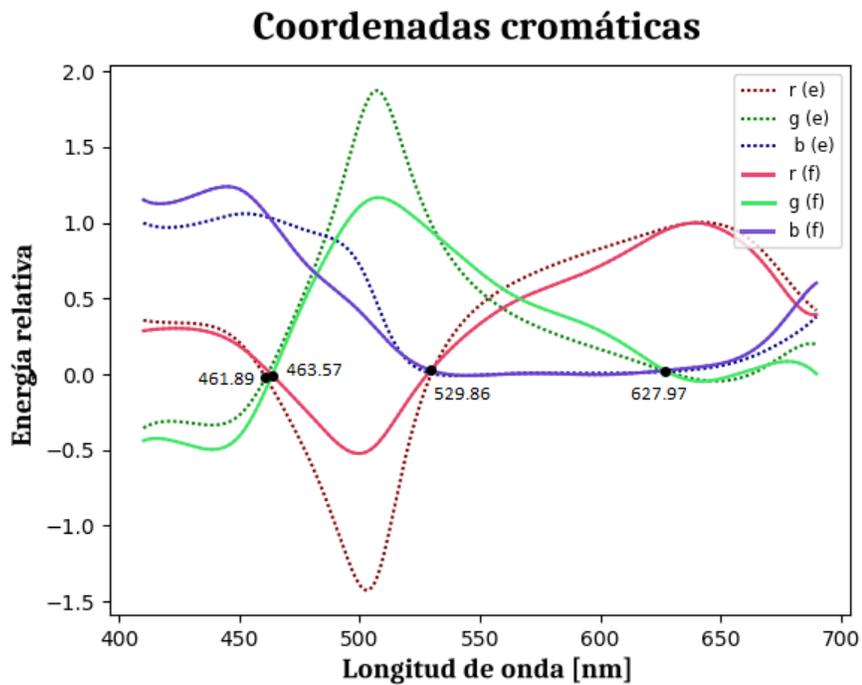


Figura 4.11: Comparación entre las Coordenadas Cromáticas para los dos métodos propuestos en este trabajo, f es para los resultados del método de factores y e para el método de fuente equienergética

En Figuras 4.10 y 4.11 se muestra el comportamiento mencionado al tener dos diferentes espectros mientras se mantienen los primarios para las igualaciones porque el mezclador y los observadores fueron los mismos para ambos métodos.

Efecto de los primarios utilizados

Las funciones de igualación de color \bar{r} , \bar{g} y \bar{b} y por tanto, las coordenadas cromáticas r, g, y b son dependientes de la elección de los primarios que se utilicen para igualar, es decir, la forma de las funciones cambia si se igualan usando diferentes conjuntos de estímulos primarios. Podemos evidenciar esta influencia mostrando una comparación de las coordenadas cromáticas J. Guild para su conjunto de primarios del instrumento, llamados por él como “Standard reference primaries” a un nuevo conjunto de primarios, llamado “Working primaries, los cuales fueron adoptados por CIE, ver Tabla 4.5.

	R [ηm]	G [ηm]	B [ηm]
Guild	630	540	460
Wright	650	530	460
CIE	700	546.1	435.8

Tabla 4.5: Primarios utilizados en los trabajos de Guild y Wright y los estandarizados por CIE

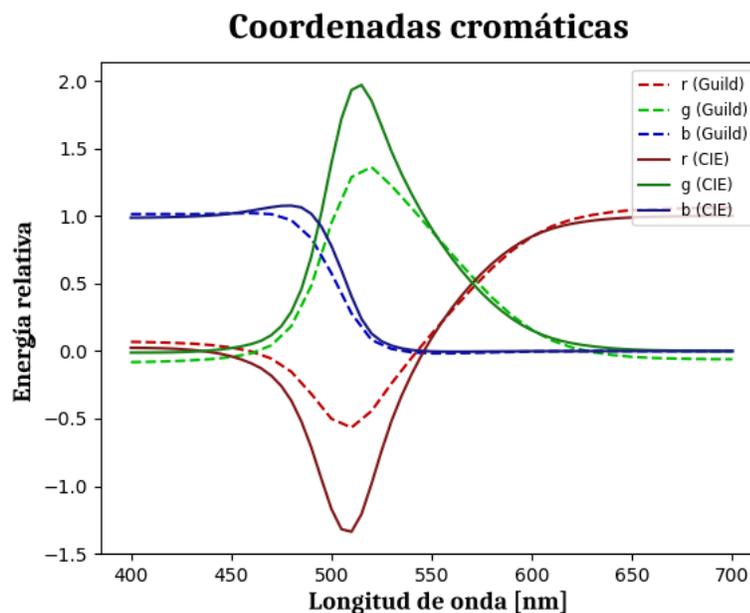


Figura 4.12: Comparación de las coordenadas cromáticas de Guild vs la transformación a CIE con nuevos primarios

La CIE transformó los datos de Guild y Wright a estos primarios, obteniéndose nuevas funciones de igualación de color y coordenadas cromáticas como se muestra en Figura

4.12. En esta comparación se puede ver la diferencia entre coordenadas cromáticas para dos diferentes conjuntos de primarios, aún cuando los datos de CIE son una transformación de los datos de Guild y Wright.

Wright además asegura que sus datos son consistentes con los obtenidos por Guild [21], al ser consistentes, entonces se puede asumir que la variación de la forma de las coordenadas cromáticas es dependiente de los primarios que se utilizaron y esto se puede ver en una comparación entre ambos autores.

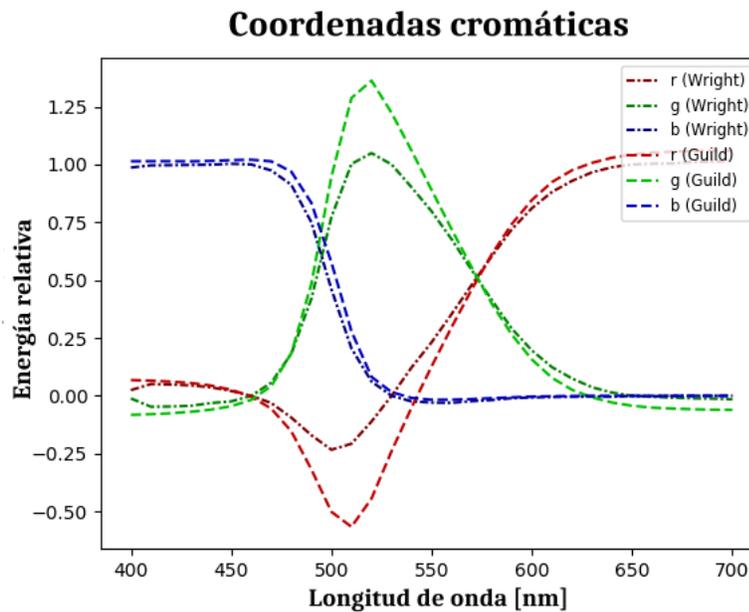


Figura 4.13: Comparación de las coordenadas cromáticas de Guild vs Wright para evidenciar la influencia del uso de diferentes primarios

Influencia de los Observadores

Para todos los observadores se realizó un entrenamiento que incluía la enseñanza de los conceptos básicos sobre la igualación de color y práctica sobre como igualar diferentes estímulos con el mezclador entre los que se incluyeron los que requieren desaturación. Los experimentos de igualación tuvieron una duración promedio de 3 horas. Los observadores con poca experiencia en la igualación de color tuvieron algunas dificultades, entre las que se destacan fatiga, aburrimiento, saturación de los conos, dificultad para entender los conceptos y aplicarlos en las observaciones, dificultad para notar la diferencia en luminosidad de los estímulos, principalmente. Esto indica que las diferencias más notorias entre las igualaciones se deben a más factores que solamente la diferencia visual.

A los observadores se les pidió realizar el experimento tres veces para cada método,

pero a causa de lo largo y cansado de la prueba los observadores decidieron no hacer las repeticiones requeridas, además de que el experimento tardaría para los observadores varios meses más. Esto llevo a decidir aumentar el número de observadores al actual para intentar compensar esa falta. El total de observadores se estableció para 15 pues el agrandar el tamaño de la muestra alargaba el tiempo de realización del experimento. En promedio se trabajaba con dos observadores por semana. Todos los observadores realizaron el Hue test y el número de errores determina la calidad en discriminación de color de cada uno, por lo que, entre más errores se tengan menor es la calidad de las igualaciones.

La repetibilidad del instrumento se realizó para un único observador dispuesto a hacer más de una vez la prueba para cada método. Dado que este observador tenía un entrenamiento sólido en igualación de color, se considera que la inexactitud de las igualaciones se debe al sesgo más que a los otros factores descritos para los otros observadores. En Figura 4.14 se muestra una comparación donde se reproducen las coordenadas cromáticas entre la primera repetición y la segunda, ambas con el método de la fuente equienergética.

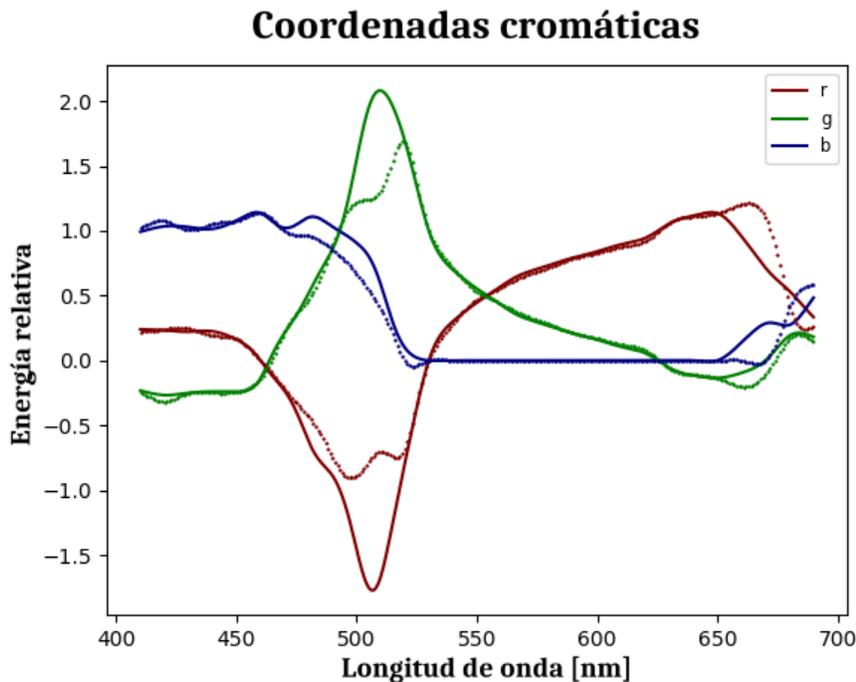


Figura 4.14: Comparación de coordenadas cromáticas para un mismo observador

Transformación de primarios

Se estableció anteriormente que la forma de las funciones de igualación de color y las coordenadas cromáticas dependen del conjunto de primarios con los que se realizó

la igualación. Esto debería solucionarse si los datos de las igualaciones se transforman conforme a las ecuaciones (1.9) donde los coeficientes se pueden determinar experimentalmente como indica Guild [20]. Por ejemplo, Guild hace una transformación de sus primarios a los primarios CIE utilizando los datos de sus igualaciones, como lo es para transformar de sus primarios al primario rojo CIE.

λ [nm]	R	G	B
700	1.0604	-0.0604	0.0000

Tabla 4.6: Datos obtenidos de la publicación de Guild [20]

Análogo para los primarios verde y azul de la CIE, entonces la transformación (4.4) está definida como

$$\begin{aligned}
 R &= 1.0604R - 0.0604G + 0B \\
 G &= 0.600R + 0.9552G - 0.0152B \\
 B &= 0.0492R - 0.0638G + 1.0146B
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Donde la transformación inversa de este sistema debe satisfacer el cambio de datos para un nuevo sistema de primarios y que las longitudes de onda correspondientes a los primarios CIE sean igualados según la Tabla 4.7

λ [nm]	R	G	B
700.0	1	0	0
546.1	0	1	0
435.4	0	0	1

Tabla 4.7: Valores triestímulo esperados por la transformación propuesta en 4.4

Sin embargo, la transformación inversa propuesta no satisface dicho comportamiento ni transforma los datos de la Tabla II a la Tabla III, que se publicaron en [20].

Por otro lado, Guild propone una nueva transformación (4.5) que lleva los datos de su conjunto de primarios a los primarios CIE definida como sigue

$$\begin{aligned}
 R_w &= 1.1315R - 0.0510G + 0.0009B \\
 G_w &= 0.0720R + 0.8951G - 0.0156B \\
 B_w &= 0.0595R - 0.0539G + 0.9835B
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Esta transformación que se propone no es más útil que la anterior, pues no reproduce ningún valor de la Tabla III de [20] y la transformación por cualquier método es incomparable. Por el lado de Wright no se propone ningún tipo de transformación para

λ [nm]	R	G	B
650	.9877	0.0123	0
660	0.9933	0.0067	0
670	0.9962	0.0038	0
680	0.9983	0.0017	0
690	0.9996	0.0004	0
700	1	0	0
710	1	0	0
720	1	0	0
730	1	0	0
740	1	0	0
750	1	0	0
760	1	0	0

Tabla 4.8: Valores triestímulo interpolados de (700-760)nm según se publicaron en ?? Guild extrapola hasta la longitud de onda 760nm repitiendo el mismo valor para todo el intervalo 700 – 760nm

comparar las coordenadas cromáticas ni la serie de datos que se tiene, pero se menciona que los datos son consistentes entre ellos. La falta de un método bien definido no permite la transformación de nuestros datos en términos de los primarios de la CIE.

Resultados de J. Guild y W. Wright

Los resultados de Guild y Wright tienen inconsistencias que no se han explicado y que provocan una falta de entendimiento en la colorimetría y en particular en lo encontrado con nuestros observadores que participaron en este experimento.

En el caso de Wright, la tabla de datos que muestra reportando sus resultados para las coordenadas cromáticas de sus 10 observadores, Figura 1.1 solamente tiene valores entre 410–690nm y con valores intermedios faltantes. Guild reporta desde los 380–700nm, pero del 380–400nm se tienen los mismos valores experimentales para las igualaciones, posteriormente “extrapola” hasta el 760nm, todos los valores entre 700 – 760nm tienen el mismo valor.

Ambos autores indican la necesidad de transformar el conjunto de datos a un nuevo conjunto en función de los primarios CIE, que estos fueron estandarizados primeramente por el National Physics Institute [20], pero no definen una transformación correcta ni un método para obtener el conjunto de datos deseado. En la bibliografía estudiada tampoco se presenta ningún tipo de método de transformación fuera del mencionado anteriormente, que no es de utilidad.

Ninguno de los autores muestra los datos ni gráficas de las funciones de igualación de color, que corresponden a los valores triestímulo obtenidos únicamente de las lecturas del instrumento, sino que directamente muestran las coordenadas cromáticas, las cuales

son el resultado de la normalización que se discutió con anterioridad.

Comparación de resultados con los trabajos de J. Guild y W. Wright

Debido a la falta de un método bien definido para transformar valores triestímulo y coordenadas cromáticas a una serie de datos en términos de un nuevo conjunto de primarios común, en particular los primarios CIE, se toma la decisión de mostrar y comparar los datos obtenidos en función de nuestros primarios con los de Guild y Wright. Esto se realiza bajo la normalización que da lugar a las coordenadas cromáticas.

En la Tabla 4.9 se muestran los primarios de los autores CR (Carranza-Rodríguez) y los utilizados por Guild, Wright y la CIE.

Autores	R [nm]	G [nm]	B [nm]
Guild	630	540	460
Wright	650	530	460
CR	630	530	460
CIE	700	546.1	435.8

Tabla 4.9: Primarios utilizados por diferentes autores y el estándar de la CIE

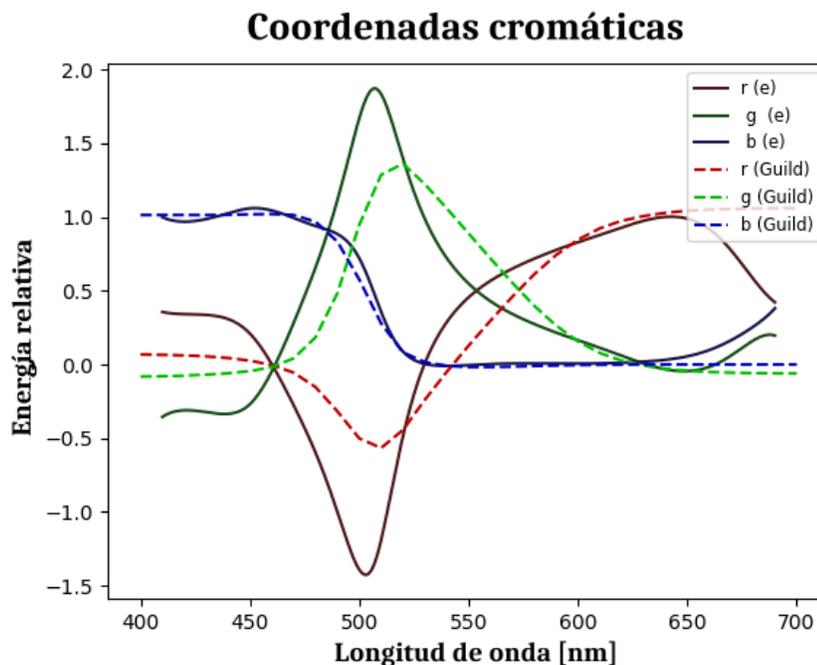


Figura 4.15: Comparación del método de la fuente equienergética contra Guild

Se nota que la diferencia con los primarios de Guild es mínima (una diferencia de $10nm$ en el primario verde), por lo que se propone una comparación directa con las coordenadas cromáticas de Guild.

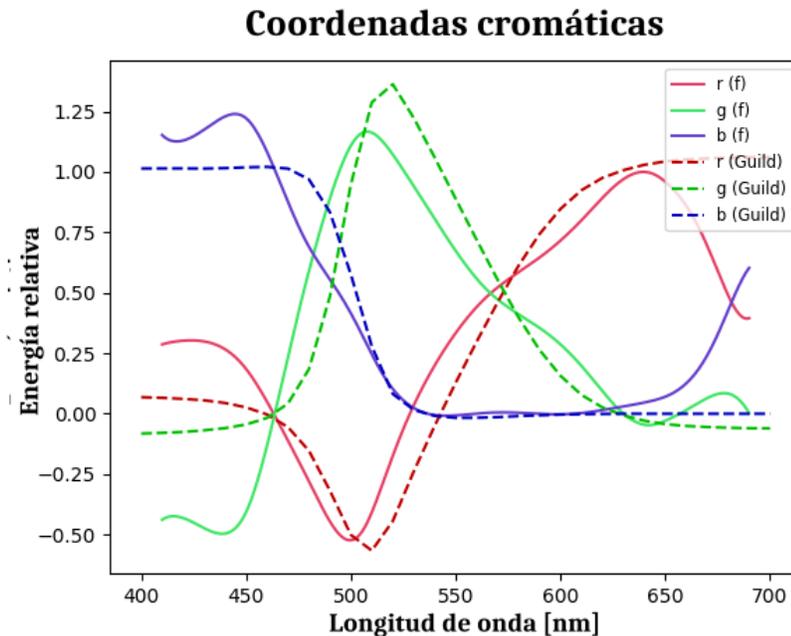


Figura 4.16: Comparación del método de los factores espectrales contra Guild

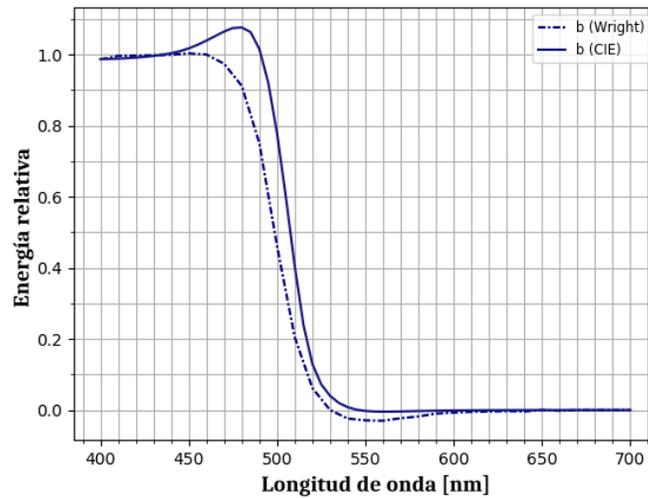
Como la fuente NPL- White que utilizó Guild intenta simular una distribución cercana a una fuente equienergética es comprensible que tengan más semejanza las gráficas que con el método de los factores espectrales.

Se observa en la Figura 4.15, que la única diferencia en los primarios es en el primario G por una diferencia de $10nm$ aproximadamente, y respecto a la forma de la gráfica cercana al máximo en ese primario, pues ya se había mencionado que las funciones no son invariantes a la selección de los primarios. Por otro lado, se vuelve a hacer énfasis en que los observadores en nuestro experimento utilizaron primarios G y B en diferentes cantidades para hacer la igualación de los estímulos de color en el intervalo $640-690nm$, contrario al comportamiento constante de Guild y Wright, esta justificación experimental indica que los estímulos de color monocromáticos en este intervalo son distinguibles como diferentes, lo mismo ocurre en el otro extremo del espectro $410-460nm$, se tiene una proporción muy baja de primarios R y G en comparación de lo determinado visualmente por nuestros observadores por lo que se cree que la determinación de los extremos del espectro se determinó posiblemente incorrectamente en los trabajos de Guild y Wright.

Comparación de resultados con la CIE

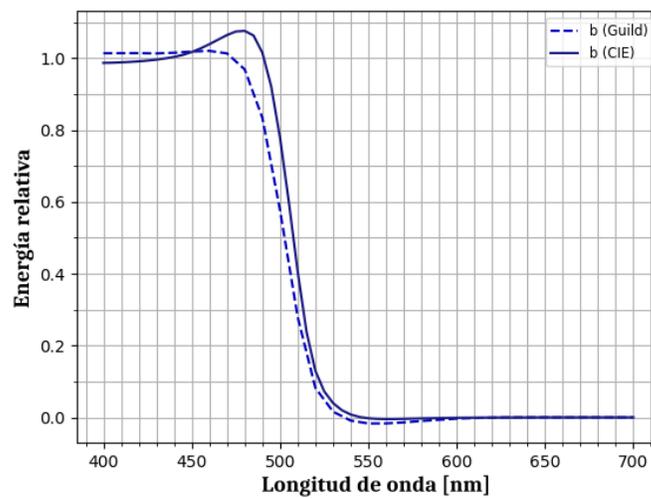
Finalmente presentamos la comparación de los resultados de Wright, Guild y el de nuestro método con la fuente equienergética respecto a la CIE, esta comparación es en Coordenadas Cromáticas.

Coordenadas cromáticas



(a) Wriyth vs CIE primario azul B

Coordenadas cromáticas



(b) Guild vs CIE primario azul B

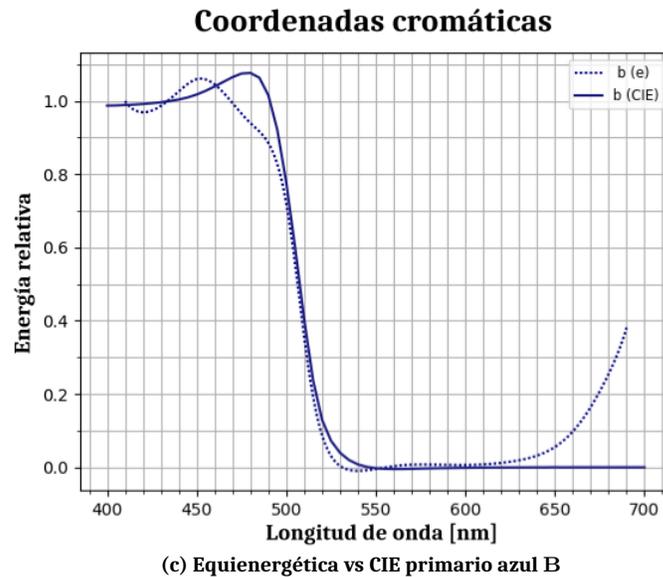


Figura 4.17: Comparación de la función de igualación de color \bar{b}

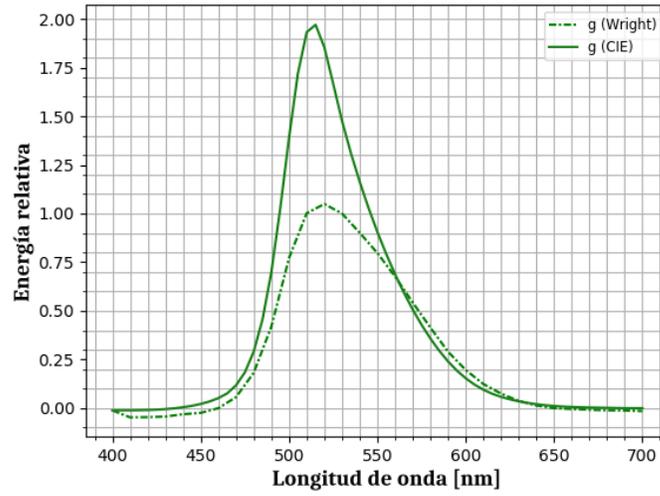
En las Figuras 4.17a, 4.17b y 4.17c tenemos las gráficas para los resultados del azul.

Se puede ver de esta secuencia que el resultado más alejado de la CIE es el de Wright, Figura 4.17a, seguido de Guild, Figura 4.17b, mientras que para el método de fuente equienergética reportado en este trabajo Figura 4.17c se obtiene un mayor acuerdo, sobre todo en las longitudes de onda centrales entre $500nm$ y $620nm$).

Las diferencias que se observan en los extremos pueden explicarse por lo dicho en el párrafo final de la sección 8.7 arriba mencionada, porque para longitudes de onda mayores a $610nm$ Guild y Wright únicamente utilizaron el primario rojo para igualar el resto del espectro, de hecho se le asignó un valor constante, dándole al primario R una intensidad constante y los primarios G y B se pusieron como cero. Este efecto no ocurrió en los experimentos de igualación para ninguno de nuestros observadores, para la igualación de esta parte de la banda roja se utilizó tanto azul como verde. Una posibilidad del por qué en los resultados de Guild y Wright no ocurrió esto puede ser al nivel bajo de intensidad que pudieron haber estado mostrando a sus observadores.

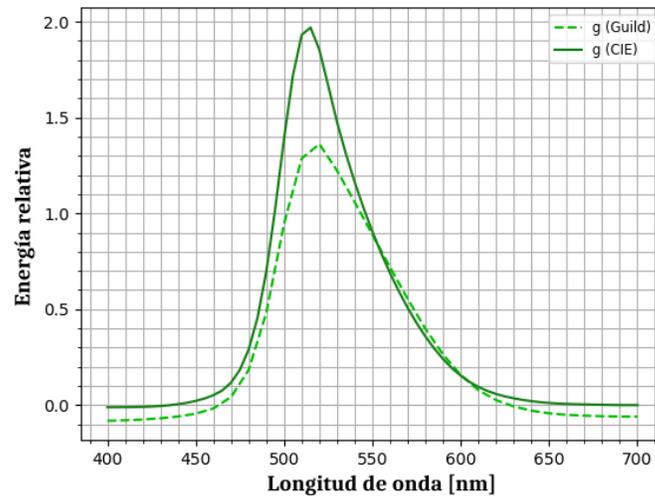
En las Figuras 4.18a, 4.18b y 4.18c se presentan las comparaciones para el primario verde.

Coordenadas cromáticas

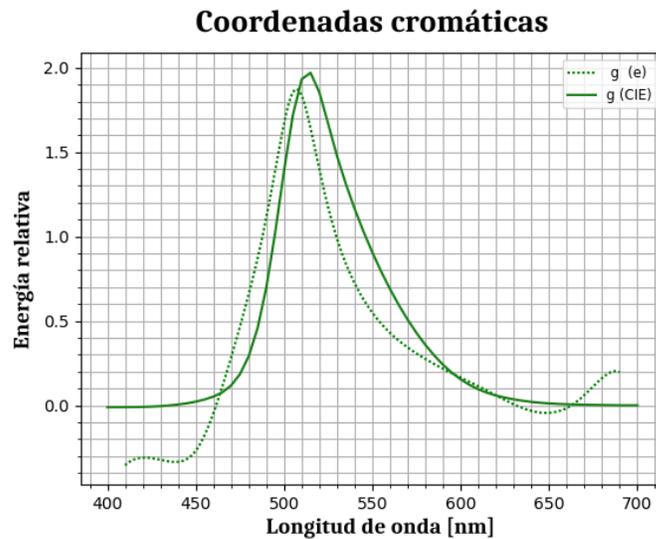


(a) Wright vs CIE primario verde G

Coordenadas cromáticas



(b) Guild vs CIE primario verde G



(c) Equienergética vs CIE primario verde G

Figura 4.18: Comparación de la coordenada cromática $g(\lambda)$

Se observa de nuevo que el resultado más alejado de la CIE es el de Wright, seguido del de Guild, mientras que para nuestro resultado de la fuente equienergética entre las longitudes de onda entre $460nm$ y $600nm$ se tiene un mayor acuerdo. De hecho si se realiza un desfazamiento de $8nm$ en la gráfica del primario verde para la fuente equienergética hacia la derecha se obtiene una coincidencia mucho mayor, ver Figura 4.19.

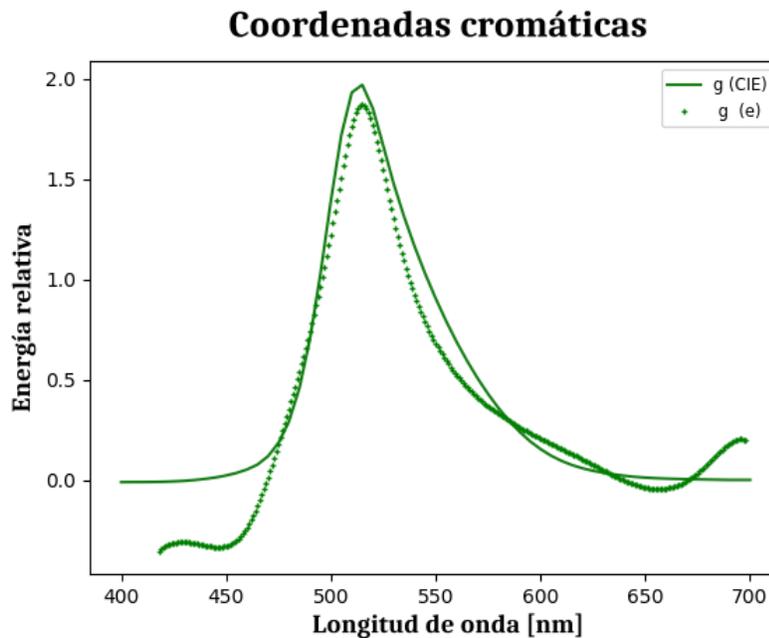


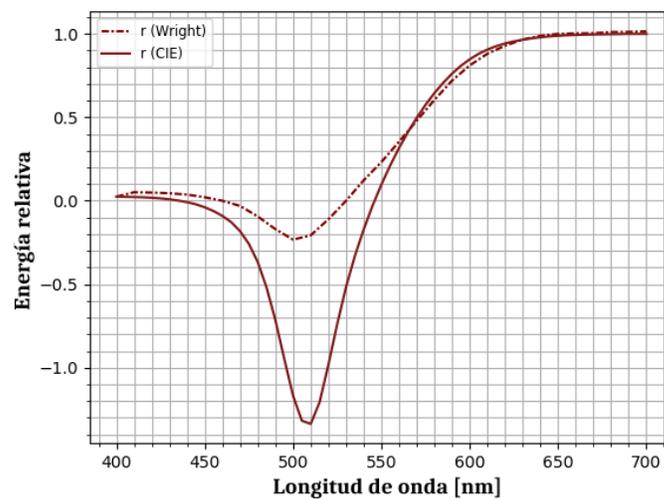
Figura 4.19: Desfazamiento de $8nm$ de la curva $g(\lambda)$ del método equienergético coincidiendo el máximo con el máximo de la coordenada cromática $g(\lambda)$ de la CIE

Nuevamente para longitudes de onda mayores a 610nm empieza la diferencia, pero esta es debida a que los resultados CIE a partir de esa longitud de onda únicamente utilizaron el primario rojo para igualar todo el resto del espectro y G se puso como cero.

Para la igualación del azul entre las longitudes de onda de 400 a 440nm la CIE reporta valores prácticamente de cero, mientras que en los resultados obtenidos en este trabajo se requirió desaturación con verde.

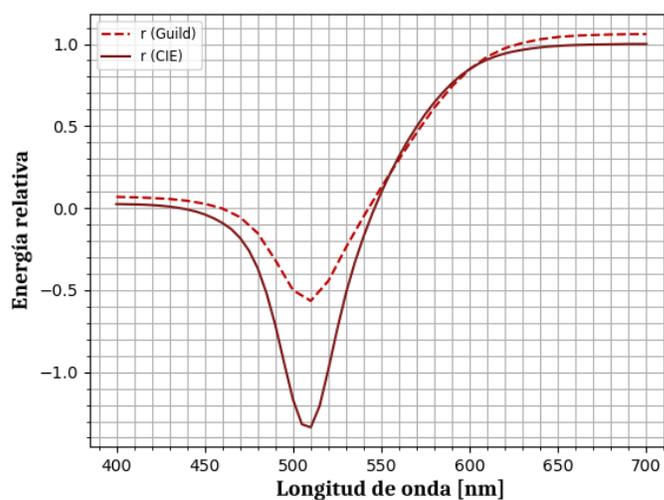
En la secuencia de Figuras 4.20a, 4.20b y 4.20c se presenta la comparación para el primario rojo.

Coordenadas cromáticas



(a) Wright vs CIE primario rojo R

Coordenadas cromáticas



(b) Guild vs CIE primario rojo R

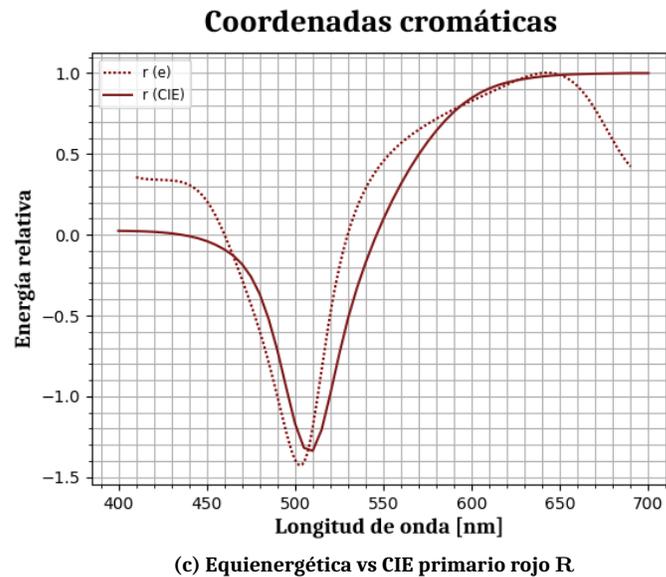


Figura 4.20: Comparación de la coordenada cromática $r(\lambda)$

Nuevamente se obtiene que el resultado más cercano a la CIE es el de la fuente equienergética (para las longitudes de onda entre $460nm$ y $650nm$) y que el de Wright es el más alejado. Las diferencias en los extremos son por la misma razón que se tienen estas diferencias en los otros dos primarios.

Este análisis nos permite concluir que a pesar de no compartir los mismos primarios, ni la misma fuente, ni obviamente una muestra de la misma población de observadores, los resultados obtenidos para la fuente equienergética están más cerca de los reportados por la CIE que los trabajos originales de donde se obtuvieron estos estándares adoptados por CIE desde 1931. Es claro que la CIE no está reportando un promedio de los resultados de Guild y Wright y que no se tiene acceso a las ecuaciones de transformación que utilizaron.

CONCLUSIONES

El experimento del observador estándar colorimétrico es parte del algoritmo base para la cuantificación del color y de ahí su importancia. Sin los valores triestímulo no sería posible hacer una predicción numérica sobre la percepción del color de los observadores.

Como se ha discutido en este trabajo, el conjunto de datos que se determinaron por la CIE como un estándar muestra inconsistencias, entre las que se destacan la falta de información para las transformaciones de conjuntos de ciertos primarios a otros; extrapolar ambiguamente los valores triestímulo para los extremos del espectro visible ($380nm - 410nm$) en los violetas y ($700nm - 760nm$) en los rojos; una posible determinación incorrecta para la igualación de los estímulos de color en el extremo de los rojos; falta de información sobre cómo se juntaron los conjuntos de datos de Guild y Wright.

En este trabajo se obtuvieron dos conjuntos de datos para los valores triestímulo, el conjunto obtenido por el método de los factores espectrales y el obtenido por el método de la fuente equienergética, donde el más importante corresponde al segundo método, lo cual nos permite conocer la respuesta del ojo humano independientemente de la fuente que se utiliza para igualar.

Al comparar los datos obtenidos con el método de la fuente equienergética con Guild y Wright se observó que el único intervalo con un comportamiento anómalo es entre $(630 - 690)nm$, pues como se discutió, los observadores perciben los estímulos de este intervalo tal que es necesaria la adición del primario azul en las igualaciones, en el caso de Guild y Wright, el azul se mantiene sin energía. Aún para el método de los factores espectrales, el mismo comportamiento se presenta, sugiriendo un posible error por parte de los observadores de Guild y Wright para diferenciar el color en este intervalo y una motivación para creer que es necesario redefinir las igualaciones en los rojos.

Por la parte del método de factores, el método es más impreciso dado que requiere la multiplicación de los factores espectrales obtenidos en la igualación del blanco, las igualaciones del blanco de la fuente están distribuidos sin un patrón definido por los observadores, lo que indica posibles errores por parte de los observadores en estas iguala-

ciones o diferencias en percepción que no son evidentes. Más aún, se supone cierto que el factor obtenido en dicha igualación debe multiplicar cada valor obtenido por el primario correspondiente, esto significa que el primario debe tener la misma proporción en todo el intervalo del espectro visible. Esto es cuestionable, pues la función $V(\lambda)$ indica que la percepción de la luminosidad de la visión humana no es constante y por parte de la sensibilidad espectral de los conos del ojo tampoco se tiene ese comportamiento.

En general, se recomienda hacer una comparación en términos de las coordenadas cromáticas, ya que representan la proporción utilizada de cada primario para la igualación de cada estímulo facilitando la discriminación de las diferencias en las mediciones.

Es importante señalar la diferencia entre el color que se mide radiométricamente y el color percibido por el observador, pues si pudiese determinarse la función de respuesta del ojo con algún instrumento, entonces el conjunto de datos obtenidos por el experimento del observador estándar sería irrelevante. Esto se puede mostrar en la diferencia entre los primarios determinados teóricamente y los primarios determinados visualmente en este trabajo, como se presentó en el capítulo 5.

El conjunto de valores triestímulo obtenidos por el método de la fuente equienergética es una posible mejora a la colorimetría con una innovación importante que es un conjunto independiente de la fuente. El experimento se realizó con la máxima precisión posible para los instrumentos y materiales utilizados. Debido a esto se asegura que los resultados obtenidos son consistentes, por lo que se proponen como un nuevo conjunto de datos mejorados que implican una posible mejor medición del color.

Como posibles mejoras al experimento se propone:

- i) Aumentar el intervalo del espectro visible para realizar igualaciones, es decir, ampliar la rotación de la montura tal que se puedan proyectar longitudes de onda menores a $410nm$ y mayores a $690nm$.
- ii) Aumentar el tamaño de la muestra y excluyendo los datos de los observadores que no repitan sus mediciones dentro de un margen de error definido.
- iii) Obtener fuentes de alimentación que permitan utilizar voltajes más altos, con un deseable hasta los $24V$, que es el voltaje de trabajo de las lámparas halógenas utilizadas en el mezclador RGB, para poder hacer las igualaciones con una fuente equienergética de más potencia, mejorando las igualaciones de los extremos, que es donde la curva de sensibilidad espectral del ojo humano ($V(\lambda)$) es menos eficiente.
- iv) Obtener experimentalmente los valores triestímulo utilizando los primarios CIE, de manera que sea comprobable la consistencia de la transformación matemática utilizada en los conjuntos de datos de Guild y Wright.

- v) Como trabajo a futuro se propone encontrar una transformación consistente que pueda transformar el conjunto de datos propuesto en términos de los primarios CIE RGB y CIE XYZ, para utilizar los algoritmos matemáticos que transforman los valores Triestímulo en otro tipo más avanzado de coordenadas cromáticas como son “Lab” y “LCh” para poder comparar si la mejora presentada aquí se puede reflejar visual y numéricamente en la interpretación de los atributos del color observados y cuantificados en estos espacios de color.

A.1

λ [nm]	Línea del tornillo
410	-4.0
420	32.0
430	68.0
440	104.0
450	140.0
460	176.0
470	212.0
480	248.0
490	283.0
500	319.0
510	355.0
520	391.0
530	427.0
540	463.0
550	499.0
560	535.0
570	571.0
580	607.0
590	643.0
600	679.0
610	715.0
620	750.0
630	786.0
640	822.0
650	858.0
660	894.0
670	930.0
680	966.0
690	1002.0

Tabla A.1: Longitudes de onda del monocromador y su posición relativa en la montura

A.2

λ [nm]	R	G	B
410	0.2083	-0.3189	0.8372
420	0.2489	-0.3555	0.9306
430	0.2435	-0.3855	0.9568
440	0.2002	-0.3723	0.9233
450	0.1272	-0.2793	0.8379
460	0.0329	-0.0874	0.7116
470	-0.0719	0.1523	0.5683
480	-0.1762	0.3711	0.435
490	-0.2636	0.5267	0.3289
500	-0.3049	0.6457	0.242
510	-0.2688	0.7656	0.162
520	-0.1456	0.8939	0.0855
530	0.0364	0.9846	0.0248
540	0.2449	0.9881	-0.0068
550	0.4432	0.8951	-0.0094
560	0.5893	0.7459	0.0006
570	0.6435	0.5826	0.0066
580	0.6097	0.4283	0.0042
590	0.528	0.2903	-0.0003
600	0.4371	0.1751	-0.0014
610	0.3512	0.0869	0.0012
620	0.2709	0.0283	0.0045
630	0.1966	0.0001	0.0061
640	0.1315	-0.006	0.0061
650	0.0794	-0.0024	0.0058
660	0.0431	0.0008	0.0063
670	0.0206	0.0019	0.0072
680	0.0089	0.0015	0.0078
690	0.0049	0.0	0.0075

Tabla A.2: Valores triestímulo por el método de los factores espectrales para una campo visual de 2° considerando 13 observadores (datos ajustados por el método de splines cúbicos)

A.3

λ [nm]	R	G	B
410	0.3407	-0.3399	0.9555
420	0.3525	-0.3204	1.0
430	0.3313	-0.3176	0.9708
440	0.2695	-0.2922	0.8959
450	0.1594	-0.2043	0.8033
460	0.0014	-0.0321	0.7137
470	-0.1718	0.1755	0.6189
480	-0.3197	0.3521	0.5031
490	-0.4088	0.4558	0.3618
500	-0.4244	0.5097	0.2198
510	-0.3551	0.5469	0.1063
520	-0.2029	0.5844	0.0368
530	0.0061	0.61	0.0023
540	0.243	0.6091	-0.0082
550	0.4788	0.5759	-0.0048
560	0.6834	0.516	0.0037
570	0.8276	0.4356	0.0091
580	0.897	0.3429	0.0094
590	0.8898	0.2478	0.0074
600	0.8066	0.16	0.0061
610	0.6705	0.0865	0.006
620	0.5173	0.0326	0.0067
630	0.3792	0.0023	0.0075
640	0.2652	-0.0087	0.0085
650	0.1754	-0.0079	0.0098
660	0.1092	-0.0019	0.0116
670	0.0634	0.005	0.0135
680	0.0338	0.0094	0.0148
690	0.0166	0.0077	0.015

Tabla A.3: Valores triestímulo por el método de la fuente equienergética para una campo visual de 2° considerando 15 observadores (método de ajuste por splines cúbicos)

A.4



Facultad de Ciencias, UNAM
Carta de consentimiento informado



Yo _____, de ____ años de edad, en el día _____, otorgo de manera voluntaria mi permiso para participar como observador en el experimento llamado "Medición experimental de los valores del observador estándar para un campo visual de 2°", bajo el responsable Carlos Bruno Rodríguez Martínez y bajo la supervisión de la Dra. Jazmín Carranza Gallardo.

El estudio se propone conocer las curvas que describen la visión tricromática de un observador sano, la duración del estudio depende del observador y en caso de extenderse más de lo deseado, se puede pausar y concluirse en otro momento.

Manifiesto mi autorización luego de haber comprendido en su totalidad la información sobre dicho proyecto, en el entendido que:

- No hay riesgos para la salud ni para la visión del observador
- No habrá ninguna consecuencia desfavorable para ambas partes en caso de no aceptar la invitación
- No habrá ningún tipo de gasto ni remuneración en lo concerniente a la colaboración en el estudio
- Se guardará estricta confidencialidad sobre los datos personales obtenidos producto de la colaboración, ya que su nombre no aparecerá en ningún documento ni en ninguna base de datos
- Los datos experimentales se utilizarán para la elaboración de la tesis con título: "Redeterminación Experimental de los Valores del Observador Estándar para un Campo de Visión de 10°" y si se redactara algún artículo de investigación
- Puedo abandonar el experimento en cualquier momento sin algún tipo de explicación y sin consecuencias

 Nombre y firma
 del participante

 Nombre y firma
 del responsable

Figura A.1: Consentimiento informado

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wysecki, G. Stiles, W. S. (2000). *Color Science; Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Neitz, J. Carrol, J. Neitz, M. (2001, January). *Color Vision*. *Optics & Photonics News*, 12, pp.26-33
- [3] Pedrotti L., Pedrotti F. (1993.) *Introduction to Optics*. Prentice Hall.
- [4] Ohta N., A. Robertson. (2005.) *Colorimetry. Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [5] Beiser, A. (2003). *Concepts of Modern Physics*. United States of America: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [6] Nassau, K. (1998). *Color for Science, Art and Technology*. Netherlands: Elsevier.
- [7] Wright, W.D. (1969). *The Measurement of Color*. Adam Hilger LTD.
- [8] M. Kaschke, K. H. Donnerhacke, and M. S. Rill, *Optical Devices in Ophthalmology and Optometry. Technology, Design Principles, and Clinical Applications*. (Wiley-VCH, 2014).
- [9] Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, et al., editors. *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates;(2001). *Cones and Color Vision*. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11059/>
- [10] Solomon, G. Lennie, P. (2007, April 1). *The Machinery of Colour Vision*. *Nature Reviews Neuroscience*, 8, pp 276-286
- [11] Kolb H. *Photoreceptors*. (2005, May 1) [Updated 2012 Feb 28]. In: Kolb H, Fernandez E, Nelson R, editors. *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System* [Internet]. Salt Lake City (UT): University of Utah Health Sciences Center; 1995-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11522/>

- [12] Kolb H. (2005, May 1) *Facts and Figures Concerning the Human Retina*. [Updated 2007 Jul 5]. In: Kolb H, Fernandez E, Nelson R, editors. *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System* [Internet]. Salt Lake City (UT): University of Utah Health Sciences Center; 1995-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11556/>
- [13] Kuehni, R. (2003). *Color Space and Its Divisions: Color ORden from Antiquity to the Present*. John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Hecht, E. (2002). *Optics*. United States of America: Addison Wesley.
- [15] Munsell A. H. (1919.) *A Color Notation*. Munsell Color Company, New York.
- [16] Feynman, R. P. (1965). *The Feynman lectures on physics*. Reading, Mass. :Addison-Wesley Pub. Co.
- [17] MacAdam D. L. (1985). *Color Measurements, Theme and Variations*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- [18] Guild J. (1925). *A Trichromatic Colorimeter Suitable for Standardisation Work*. *Transactions of the Optical Society*, 27, pp.106-139.
- [19] Gegenfurtner, K. (2003, July 1). *Cortical Mechanisms of Colour Vision*. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, pp 563-572.
- [20] Guild, J. (1931, April 30). *The Colorimetric Properties of the Spectrum*. *Royal Society of London*. Vol.230, pp 149-187.
- [21] Wright, W.D. (1929, February 7). *A Re-determination of the Trichromatic Coefficients of the Spectral Colours*. *Transactions of the Optical Society*, 30, pp.142-166.
- [22] Wright, W.D. (1928, April 19). *A Tricromatic Colorimeter with Spectral Primaries*. *Transactions of the Optical Society*, 29, pp.225-242.
- [23] Cheney W., Kincaid D. (2008). *Numerical Mathematics and Computing*. Thomsons Brooke/Cole. pp. 395-393.
- [24] Hollas, M. (2004.) *Modern Spectroscopy*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [25] Fuhr J. R., Wiese W. L. (1996). *NIST Atomic Transition Probability Tables, CRC Handbook of Chemistry & Physics*. 77th Edition, D. R. Lide, Ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- [26] Artigas, J. (1995). *Óptica Fisiológica: Psicofísica de la visión*. McGraw-Hill Interamericana.
- [27] Fairman M., Brill. H, Hemmendinger H. (1996, June 6). *How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived From Wright-Guild Data*. *Color Res. Appl.*, 22, pp. 11-23.

- [28] Schmidt, B. P., Neitz, M., & Neitz, J. (2014). *Neurobiological hypothesis of color appearance and hue perception*. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 31(4), A195–A207.
- [29] Service, P. (2016, March 29) *The Wright – Guild Experiments and the Development of the CIE 1931 RGB and XYZ Color Spaces*. Flagstaff, Arizona, USA.