



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



John Heraldo Álvarez Martínez

Umbral de Iluminación para el Reconocimiento de Colores

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 28 de junio de 2017



Umbral de iluminación para el reconocimiento de colores

John Heraldo Álvarez Martínez

Informe Final para optar al título de Ingeniero Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Enrique Piraino Davidson
Profesor Guía

Sr. Iván Kopaitic Otero
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 16 de Junio de 2018

Resumen

Se realiza un análisis detallado de 2 experimentos, esto con el propósito principal de poder identificar umbrales de iluminación bajo los cuales se pueden reconocer diferentes colores, esto con el objetivo de poder utilizarlos en el diseño de iluminación y el uso de los colores, estos experimentos miden la respuesta de un grupo de observadores al presentarles un conjunto de muestras de diversos colores esto se realiza a diversos niveles de iluminación cuyos valores van desde 1000 lux que es un nivel claramente fotópico, y llega hasta niveles de 0,1 lux.

A 10 lux, la identificación de muestras de colores es similar a los 1000 lux, mientras que a 1 lux se producen mayores cambios en la identificación, el cambio más notorio es el reemplazo en la identificación de las muestras que en principio eran mencionadas como verde, pero al bajar los niveles de luz, estas fueron mencionadas como azul, a 0,1 lux la identificación confiable prácticamente se pierde dado a la inconsistencia en las respuestas de los observadores, los colores que mejor se reconocen a bajos niveles de luz son los rojos y azules, y las muestras con mayor saturación también tienen mejores resultados que las muestras menos saturadas, se cree que estos cambios en la identificación se producen por la transición o modificación en la sensibilidad de los 3 tipos de conos que tiene el ojo y por el cambio en la curva de sensibilidad la cual se mueve hacia las longitudes de onda más cortas, pasando desde un estado de visión cromática llegando a una visión completamente acromática.

Los primeros capítulos presentan una base teórica sobre los conceptos relacionados con la iluminación, características visuales del ojo humano y otros conceptos concernientes al color, mientras que el último capítulo muestra en forma detallada los resultados de los 2 experimentos psicofísicos utilizados.

Palabras claves: iluminación, visión del color, colorimetría, fotometría, visión tricromática, fotorreceptores.

Abstract

A detailed analysis of 2 experiments is carried out, this with the main purpose of being able to identify lighting thresholds under which different colors can be recognized, this with the aim of being able to use them in lighting design and the use of colors,, experiments measure the response of a group of observers by presenting a set of samples of different colors this is done at various levels of illumination whose values range from 1000 lux which is a clearly photopic level, and reaches levels of 0.1 lux.

At 10 lux, the identification of colored samples is similar to 1000 lux, while at 1 lux major changes occur in identification, the most noticeable change is the replacement in the identification of samples that were originally mentioned as green , but when lowering the light levels they were mentioned as blue, at 0.1 lux the reliable identification is practically lost due to the inconsistency in the responses of the observers, the colors that are better recognized at low levels of light are the red ones and blue, and the samples with higher saturation also have better results than the less saturated ones, it is believed that these changes in the identification are produced by the transition or modification in the sensitivity of the 3 types of cones that the eye and the eye have. Change in the sensitivity curve which moves towards the shortest wavelengths, passing from a chromatic vision states arriving at a completely acromatic vision.

The first chapters present a theoretical basis on the concepts related to lighting, visual characteristics of the human eye and other concepts concerning color, while the last chapter shows in detail the results of the two psychophysical experiments used.

Key words: lighting, color vision, colorimetry, photometry, trichromatic vision, photoreceptors.

Índice general

Introducción.....	1
1 Antecedentes generales del proyecto	2
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivo específico.....	2
2 Principios Basicos.....	3
2.1 La naturaleza de la luz.....	3
2.2 Frecuencia y longitud de onda.....	5
2.3 La curva espectral.....	6
2.3.1 Deteccion de la radiación.....	6
2.3.2 la irradiancia.....	7
2.3.3 Medicion de la irradiancia y la curva espectral.....	8
2.3.4 La radiación y su efecto fotoeléctrico.....	12
2.4 Curva de visibilidad.....	13
2.5 Iluminancia.....	15
2.6 El lumen.....	19
2.7 Intensidad Luminosa.....	20
2.8 Luminancia.....	22
3 La visión	24
3.1 Introduccion.....	24
3.2 El proceso de la visión.....	24
3.3 Estructura del ojo.....	25
3.4 Distribucion de conos y varillas (bastones) en la retina.....	28
3.5 Sensibilidad espectral.....	28
3.6 Resolución y sensibilidad a la luz.....	30
3.7 Fotoquímica de la retina y la adaptación a la oscuridad.....	31
3.8 Factores externos que influyen en la visión.....	34
3.8.1 Tamaño.....	34
3.8.2 Luminancia y contraste.....	37
3.8.3 Tiempo.....	38
3.9 Modelos de rendimiento visual.....	38

4 El color	41
4.1 Introduccion.....	41
4.2 ¿ Que es el color?.....	41
4.3 Tono ,saturación y Luminosidad.....	42
4.4 Aportes teóricos.....	43
4.5 Aspectos generales de la colorimetría.....	43
4.6 Coeficientes tricromáticos.....	44
4.7 Fotorreceptores.....	51
4.8 Vision de 3 conos.....	52
4.9 sensibilidad del sistema trivariante o tricromático.....	54
5 La identificación del color.....	56
5.1 Experimento N°1: "Identificación del color a niveles fotópicos hasta mesópicos".....	56
5.2 Experimento N°2: "Apariencia de los colores en el crepusculo".....	79
Discusión y conclusiones	91
Bibliografía	93

Introducción

Desde una mirada psicológica el color es una sensación consciente resultante de la interacción de nuestros sentidos con la estimulación luminosa.

Los colores forman parte importante de la vida del hombre, desde que se nace hasta que se muere, estos se encuentran en la naturaleza, en las cosas que utilizamos, en las personas como también en la moda. Es tal la importancia que tienen los colores que se han dedicado diversos estudios para explicar los efectos que tienen en las personas.

Desde que los animales están en la tierra dotados con los órganos de los sentidos, la vista se consideró de los más importantes ya que permite una relación con el mundo exterior, les permite conocer el terreno o distinguir el peligro.

Esta importancia no se limita solo a los animales, los hombres de la antigüedad aprendieron mucho de los fenómenos naturales gracias a la distinción de los colores, como las estaciones del año y los cambios del clima, una relación mucho más cercana con los colores a medida que la sociedad se volvió más compleja, el hombre comenzó a manipular los colores por ejemplo para la vestimenta o las viviendas.

El color, hoy en día, en la arquitectura como en la decoración se desenvuelve de la misma manera como en el arte de la pintura, aunque su utilización suele tener fines bastante específicos, puede servir para desenfocar un objeto u ocultarlo, para crear una sensación excitante o tranquila o para indicar el peligro, para expresar una temperatura, un tamaño o una profundidad, se puede usar deliberadamente para despertar sentimientos, incluso su mala utilización puede transformar y anular la bella cualidad de un determinado objeto o material. Por estas razones, el estudio de la percepción de los colores, constituye un cuidado especial en el ámbito de la iluminación.

1 Antecedentes generales del proyecto

En esta sección se pretende dar a conocer los objetivos generales y específicos en los cuales se enfocará este documento y se presentará el plan de trabajo para lograr dichas metas.

1.1 Objetivo general.

- Estudiar los antecedentes generales que determinan los niveles de iluminación mínimos para el reconocimiento de colores.

Buscar en la bibliografía relacionada con la ingeniería en iluminación y en investigación del último tiempo sobre aquellos factores involucrados en el reconocimiento de los colores como también en las metodologías utilizadas para determinar los niveles mínimos de iluminación en normas que estén en uso actualmente.

1.2 Objetivo específico.

- Revisión de los conceptos básicos de iluminación necesarios para el presente estudio.
- Revisión de conceptos relacionados con la luz, la percepción visual y el color, entre otros.
- Identificar los valores críticos de iluminación para reconocer colores.
- Determinar aquellos valores mínimos de iluminación necesarios para lograr la percepción de los colores para distintas circunstancias como tiempo, espacio o factores psicológicos.

2 Principios Basicos.

2.1 La naturaleza de la luz.

Teoría corpuscular:

Los antiguos griegos pensaban que la luz consistía en una corriente de partículas extremadamente pequeñas, más conocidas como corpúsculos, las cuales salían de cuerpos calientes y entraban al ojo generando una sensación en el ser humano, esta era la visión general de la mayoría de los físicos hasta aproximadamente 1850, entre sus defensores más conocidos se encuentra Isaac Newton, esta teoría se basa en 3 premisas:

- Los cuerpos luminosos emiten energía radiante en partículas.
- Las partículas son liberadas en forma intermitente y en líneas rectas.
- Estas partículas actúan en la retina, estimulando una respuesta la cual produzca una sensación visual.

Teoría ondulatoria:

Huygens cerca del año 1690 ya había planteado nuevas ideas sobre la luz, introduciendo el concepto de la onda o movimiento ondulatorio de la luz, la teoría se basa en 3 premisas:

- La luz es el resultado de la vibración molecular en los cuerpos luminosos.
- Estas vibraciones se transmiten a través de un éter por medio de movimientos ondulatorios.
- Estas vibraciones transmitidas actúan en la retina, estimulando una respuesta la cual produce una sensación visual.

Teoría electromagnética:

Años más adelante, los trabajos de Maxwell, Hertz entre otros, demostrarían que la luz puede ser considerada como un fenómeno de ondas electromagnéticas y que las radiaciones que producen la sensación visual son de la misma naturaleza que las conocidas ondas de radio, o las infrarrojas, sus tres premisas fundamentales son:

- Los cuerpos luminosos emiten luz en forma de energía radiante.
- La energía radiante es propagada en forma de ondas electromagnéticas.
- Estas ondas electromagnéticas actúan sobre la retina estimulando una respuesta que produce una sensación visual.

La teoría corpuscular explica de manera satisfactoria la transferencia de energía, además permite explicar el paso de la radiación a través de medios homogéneos en líneas rectas. Sin embargo, esta fue incapaz de explicar *el fenómeno de la interferencia* en el experimento de la doble rendija, en el cual la radiación parece comportarse como una onda generando un patrón de interferencias la cual podía producir en ciertas condiciones zonas de oscuridad total.

La teoría ondulatoria también tiene algunos problemas. Para poder explicar cómo una onda podía pasar a través del espacio libre, los físicos postularon un medio llamado "*el éter*". Análisis matemáticos posteriores mostraban que este medio hipotético tenía algunas propiedades contradictorias, esta idea del *éter* fue abandonada gradualmente.

También se encontraron otras falencias importantes en esta teoría, el "*efecto fotoeléctrico*", por ejemplo, no podía ser explicado en base a la teoría ondulatoria. Se encontró que la radiación de ciertas longitudes de onda, provocaban la expulsión de electrones de la superficie de algunos metales, y que la velocidad de los electrones era independiente de la intensidad de la radiación, pero si se enviaba radiación de una longitud de onda mayor, podía suceder que no se expulsaran electrones, esto sin importar cuan intensa sea la radiación. La teoría ondulatoria fue incapaz de analizar cuantitativamente la radiación de cuerpos calientes, la radiación de los átomos y otra serie de fenómenos.

Una gran cantidad de estudios cerca del año 1900 causaron una nueva revolución en el pensamiento de la época y dieron como resultado la teoría del quantum y la mecánica ondulatoria, las cuales dieron una nueva mirada a la naturaleza corpuscular de la radiación.

La teoría del quantum:

Esta es una forma moderna de la teoría corpuscular, fue desarrollada por Max Planck, y se basa la siguiente premisa:

- La energía es emitida y absorbida en cuantos discretos conocidos como fotones, la magnitud de cada quantum Q es determinada por el producto de h y v ;

$$Q = hv$$

Donde;

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ (J} \times \text{s)} = \text{constante de planck}$$

$$v \text{ (Hz)} = \text{frecuenciade vibracion del foton}$$

$$Q \text{ (joules)} = \text{energia del foton}$$

Este principio entra en juego siempre que energía radiante es producida e interactúa con la materia, por ejemplo, convirtiéndose en calor, afectando la retina del ojo, o liberando electrones en una celda fotoeléctrica.

Tanto la teoría de quantum como la teoría electromagnética proveen adecuadas explicaciones de las características de la energía radiante que son concernientes al área de la ingeniería en iluminación [1].

2.2 Frecuencia y longitud de onda.

A cada fotón se le puede asociar una onda la cual será capaz de predecir la trayectoria del mismo. Se podría considerar entonces que esta onda ficticia contiene 3 atributos, *frecuencia*, *longitud de onda* y *velocidad*.

Estas tres cantidades pueden ser relacionadas por la siguiente igualdad:

$$v = \lambda f$$

Donde:

$$v = \textit{velocidad}$$

$$\lambda = \textit{longitud de onda}$$

$$f = \textit{frecuencia}$$

Para una radiación dada se presenta una condición bastante particular. En principio se tiene que la velocidad v cambia con el medio, necesariamente la frecuencia f o la longitud de onda λ (o ambos) debe cambiar. Pero la frecuencia f se mantiene constante para una radiación dada, la cual viene determinada por la constante oscilatoria del circuito (para ondas de radio por ejemplo) o por las constantes de los átomos o moléculas (para ondas de luz), luego la longitud de onda cambiará según el medio que este atravesando.

En términos de longitudes de ondas, las unidades más utilizadas son las siguientes:

Micrómetros: $1 \textit{ metro} = 10^6 \mu m$

Nanómetros: $1 \textit{ metro} = 10^9 nm$

Angstrom: $1 \textit{ metro} = 10^{10} A$

En nuestra vida cotidiana estamos siendo bombardeados constantemente por radiación de una inmensa gama de longitudes de onda, pero la mayoría de esta radiación no la podemos percibir. Exceptuando aquella radiación que puede generar algún tipo de calentamiento en determinados cuerpos, somos totalmente inconscientes de toda la radiación excepto un estrecho margen de longitudes de ondas que afectan a nuestros ojos.

Como se ve en la figura 2-1, la región visible para el ser humano comprende aproximadamente desde los $400nm$ a los $700nm$ y en términos de micrómetros, desde los $0.4\mu m$ a los $0.7\mu m$. [1]

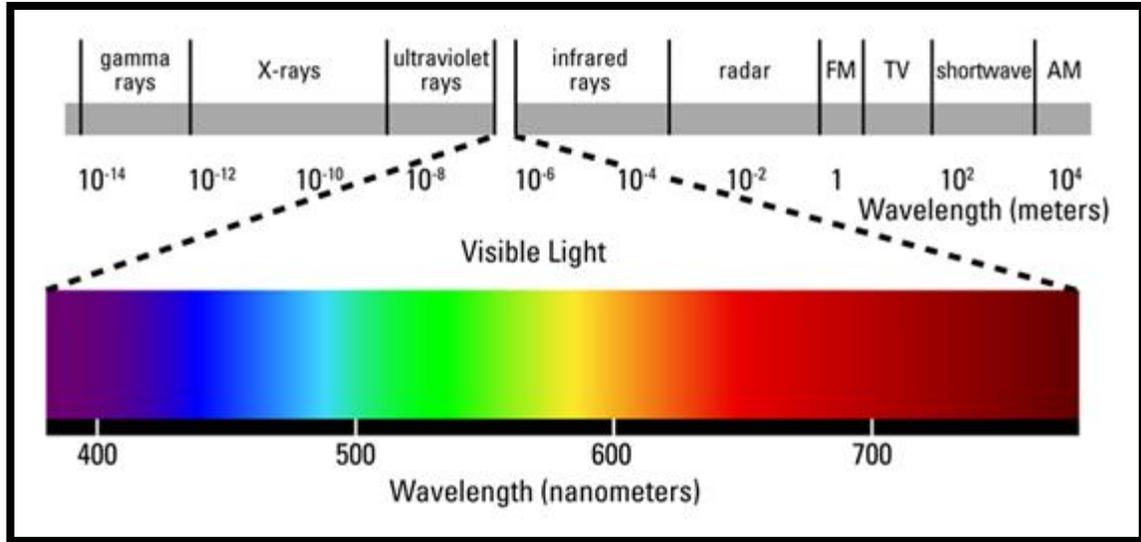


Figura 2-1: espectro de la energía radiante. [2]

Las longitudes de onda entre los $0.4\mu\text{m}$ y $0.45\mu\text{m}$ dan la sensación violeta, entre los $0.45\mu\text{m}$ y los $0.49\mu\text{m}$ la sensación del azul, $0.49\mu\text{m}$ a $0.55\mu\text{m}$ el verde, $0.55\mu\text{m}$ a $0.59\mu\text{m}$ el amarillo, $0.5\mu\text{m}$ a $0.63\mu\text{m}$ el naranja, $0.63\mu\text{m}$ a $0.70\mu\text{m}$ dan la sensación de rojo.

Los límites no están estrictamente definidos entre $0.4\mu\text{m}$ y $0.7\mu\text{m}$, de hecho, una radiación lo suficientemente fuerte podría permitir al ojo detectar radiación que este ubicada más a los extremos de los "límites" antes mencionados.

En el área de la iluminación, no se trabaja con radiación emitida a una sola frecuencia, aunque para efectos prácticos, algunas de las radiaciones se pueden considerar de una sola frecuencia, las cuales son llamadas radiaciones *monocromáticas*.

Muchas fuentes como el sol por ejemplo u otros cuerpos calientes, envían radiación de un amplio rango de frecuencias. [1]

2.3 La curva espectral.

2.3.1 Detección de la radiación.

Para la detección de la radiación un método fue utilizado por Herschel (astrónomo alemán) en 1800, lo que hacía era ubicar un termómetro en el espectro obtenido luego de pasar un haz de luz solar a través de un prisma, Herschel se dio cuenta que el termómetro se calentaba no solo en la región visible si no que lo hacía más allá de la zona del color rojo, donde el ojo es incapaz de detectar radiación alguna.

Por otro lado, si se envía potencia radiante a una placa ennegrecida y el aumento de la temperatura se mide eléctricamente, un pequeño aumento en la temperatura de la placa podría ser detectado. Para longitudes de onda mayores como las ondas de radio, es más conveniente utilizar circuitos resonantes, ajustados para una frecuencia en particular.

El método de la ionización de gases también suele ser conveniente en algunos casos, el átomo de argón por ejemplo, requiere una energía de $2.5 \times 10^{-11}(\text{erg})$ para ser ionizado. Un fotón que tenga una energía igual o superior será capaz de ionizar el átomo al colisionar con él, para longitudes de onda inferiores a los $0.03\mu\text{m}$ los fotones ya cuentan con los niveles de energía necesarios para poder lograr este tipo de hazañas, en estos casos el método de la ionización es más usada.

Ya que los metales a diferencia de los gases poseen una gran cantidad de electrones libres, se podría esperar que un fotón, a pesar de tener muy poca energía, sería capaz de liberar un electrón de la superficie metálica. Sin embargo, la energía que el fotón requiere para lograr esto debe estar por sobre un nivel mínimo en caso contrario no se liberaran electrones.

Una cantidad adicional de energía W_p se requiere para lograr la liberación de un electrón en la superficie, se tiene entonces que:

$$hf = W_p + \frac{1}{2}mv^2$$

Donde,

$$\frac{1}{2}mv^2 = \text{energía cinética del electrón que deja la superficie}$$

Este fenómeno es conocido como “efecto fotoeléctrico”. Gracias a esta cualidad es que las células fotoeléctricas son utilizadas en la detección y medición de la radiación en la región visible, la región ultravioleta e infrarroja. [3]

2.3.2 la irradiancia.

La *potencia radiante* o *flujo radiante* ϕ es la energía que está siendo radiada por unidad de tiempo, su unidad es *erg por segundo* pero también puede ser expresado en watts.

$$1 \text{ watt} = 10^7 \left(\frac{\text{ergs}}{\text{s}}\right)$$

Cuando esta potencia radiante incide en una superficie, se dice que es *irradiada*. La Irradiancia G en una superficie dada, es igual a la potencia radiante incidente sobre esta superficie por unidad de área de esta misma.

Resumiendo, se tiene que:

$$\text{energía radiante} = \text{erg o joule}$$

$$\text{potencia radiante} = \frac{\text{erg}}{\text{s}} \text{ o watt}$$

$$\text{irradiancia} = \frac{\text{potencia radiante}}{\text{unidad de área}} = \text{watt/cm}^2$$

Es importante aclarar que la irradiancia no son los watts por centímetros cuadrados absorbidos por una superficie ni los reflejados, se define la irradiancia como aquella que está impactando en la superficie, luego, la irradiancia G es independiente de la naturaleza de la superficie.

Para aquellas superficies que son capaces de reflejar una parte del poder radiante que impacta sobre ella, se debe introducir un nuevo concepto llamado *radiancia*, esta es expresada en watts por centímetros cuadrados, y describe la irradiancia que es emitida por una superficie, ya sea por reflejo o porque esta irradiancia es emitida originalmente por la superficie. [3]

2.3.3 Medicion de la irradiancia y la curva espectral.

La figura 2-2 muestra un dispositivo utilizado para la medición de la irradiancia que cae sobre una superficie S.

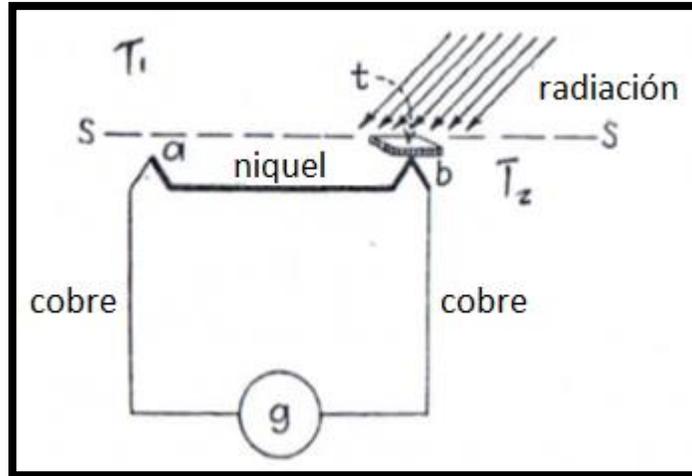


Figura 2-2: Imagen de termopar utilizado en medición de la radiación. [3]

Este dispositivo utiliza 2 cables finos, que pueden ser de cobre y níquel, se sabe que, si las uniones A y B están a la misma temperatura, no aparecerá una fuerza electromotriz y el galvanómetro no detectará alguna corriente, pero si hay una elevación de la temperatura en B, por ejemplo, entonces si se detectara una corriente a través del circuito. La elevación de la temperatura en la unión b, puede lograrse ubicando una placa ennegrecida que pueda absorber parte de la energía radiante que impacte sobre ella y pueda convertirla en energía térmica. Este instrumento de medición es *no selectivo*. Esto es, las lecturas del instrumento son independiente de las longitudes de onda.

Pero en la mayoría de los casos la radiación suele ser de una gran gama de longitudes de ondas, para estos casos sería necesario calibrar el instrumento para poder realizar una medición específica para cada longitud de onda.

Cada longitud de onda tiene un efecto proporcional sobre la deflexión del galvanómetro, esto permitiría realizar una suma de cada componente actuando por sí sola, luego, la medición de la irradiancia total que cae sobre la superficie en watts por centímetros cuadrados, de todas las componentes, viene dado por la expresión:

$$G = \sum_1^n G_i \left(\frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \right) \quad (2-1)$$

Donde,

$$G_i = \text{irradiancia de cada componente } i$$

$$n = \text{el numero de componentes de la radiación}$$

En la figura 2-3 se presenta un ejemplo de la radiación de una lámpara, la cual envía irradiancia en varias de las componentes del espectro visible.

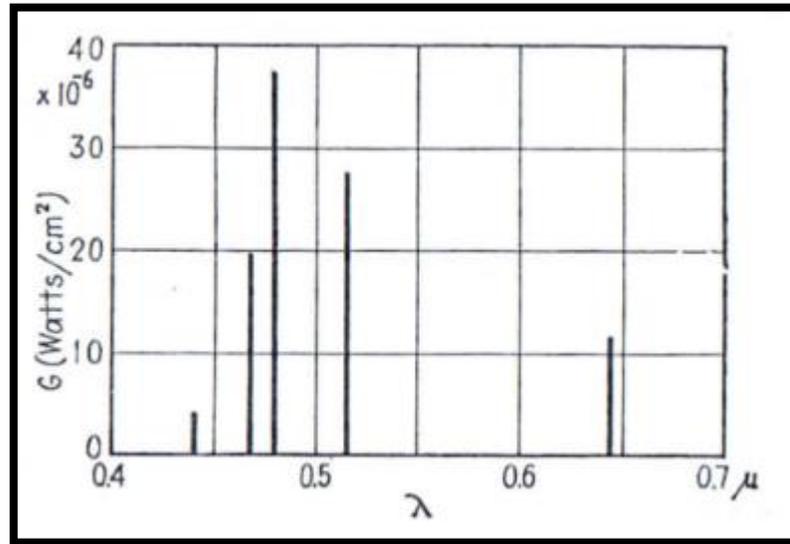


Figura 2-3: irradiancia de una lámpara de vapor de cadmio sobre una superficie S. [3]

En este caso de la figura 2-3 se tiene que:

$$G_{total} = \sum_1^5 G_i$$

$$G_{total} = \sum_1^5 G_i = 4.5 \times 10^{-6} + 19 \times 10^{-6} + 37 \times 10^{-6} + 28 \times 10^{-6} + 11.5 \times 10^{-6}$$

$$G_{total} = G = \sum_1^5 G_i = 100 \times 10^{-6} \left(\frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \right)$$

Para poder obtener una especificación completa se debe separar el espectro en todas sus componentes y medir la irradiancia en cada banda lo suficientemente pequeña que determinará una longitud de onda particular. En estos casos es conveniente el uso de los prismas de vidrio o cuarzo como se observa en la figura 2-4.

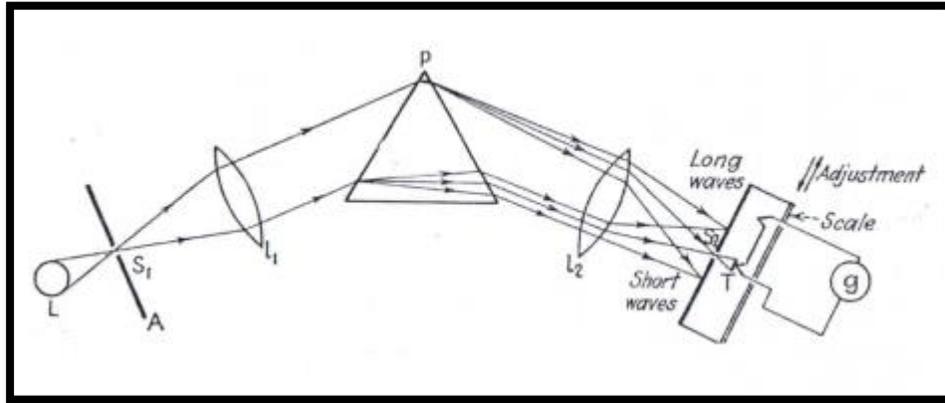


Figura 2-4: esquema básico de un espectro radiómetro. [3]

El aparato receptor puede ser movido para medir la irradiancia en una longitud de onda específica de la región visible, ultravioleta o infrarroja, este instrumento se conoce como espectro radiómetro. Para espectros continuos se debe usar una ranura muy pequeña y esta se debe pasar a lo largo de todo el espectro, la anchura de esta siempre debe ser constante.

Luego la irradiancia total G es representada por el área bajo la curva, ó:

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda \left(\frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \right) \quad (2-2)$$

La función G_{λ} es llamada *curva de irradiancia espectral*, y representa el espectro continuo.

Un ejemplo es mostrado en la figura 2-5, la cual representa la irradiancia que llega a una superficie desde un radiador el cual está a $1999 K^{\circ}$:

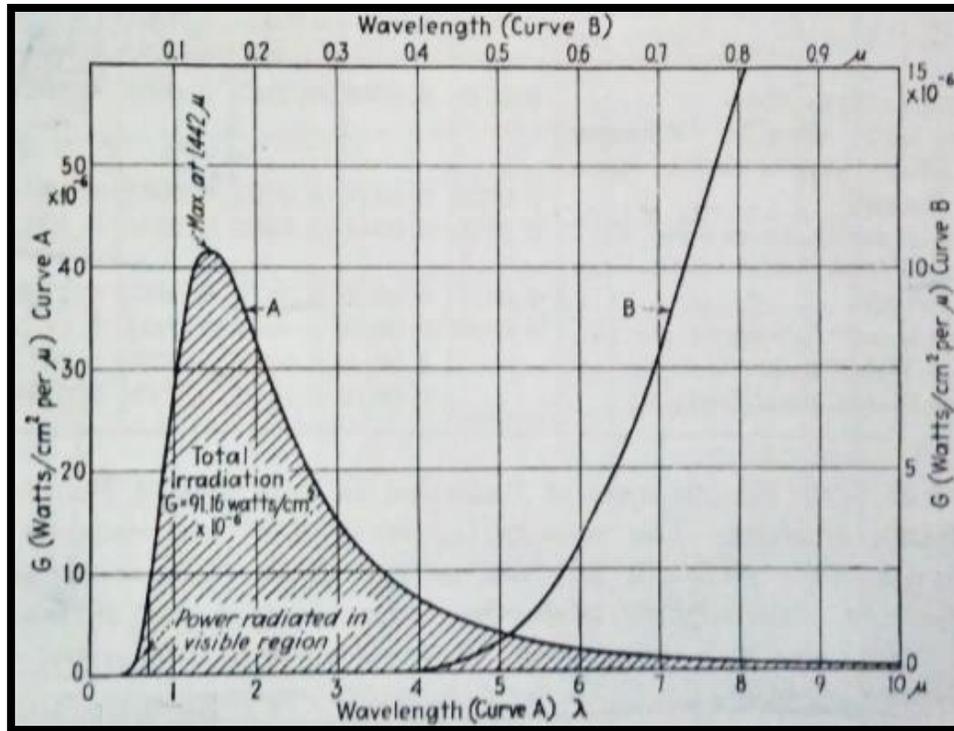


Figura 2-5: curva de irradiancia espectral de un radiador a 1999° K. [3]

La curva B es un aumento de la curva A y muestra la región visible la cual incluye solo una pequeña parte de la irradiancia total. Se observa que la mayor parte de la radiación está en la zona infrarroja, por lo tanto, este radiador irradia menos luz. Es importante destacar, que si se aumentara la temperatura de este radiador, la curva se movería hacia la izquierda y esto tendría efectos en la zona visible de la curva (el radiador sería más luminoso a mayor temperatura ya que emitiría mayor irradiancia en el espectro visible, esto es, entre 0,4 μ m y 0,7 μ m). Comparando estos resultados con la figura 2-6, la cual corresponde a la irradiancia del sol, Se ve que una proporción mucho mayor de energía se irradia en la región visible por lo que este irradiaría más luz. [3]

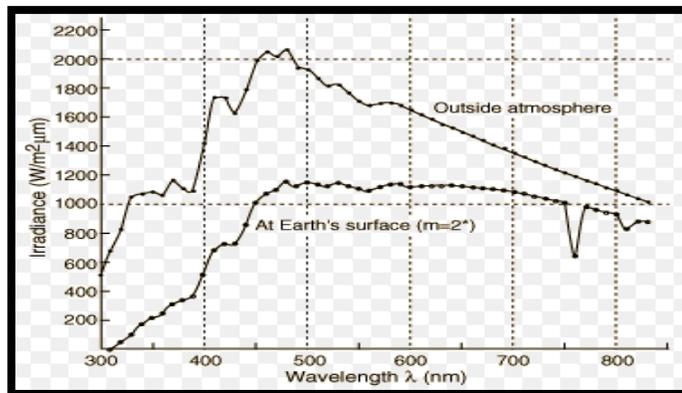


Figura 2-6: curva de irradiancia solar con datos estándares de la NASA. [4]

2.3.4 La radiación y su efecto fotoeléctrico.

Imaginemos una fotocelda conectada a una batería y un galvanómetro de la manera usual, y permitamos que irradiación a una longitud de onda λ_1 entre a la celda, esto producirá una corriente. Ahora la longitud de onda es cambiada a λ_2 , con la misma cantidad de potencia radiante entrando a la celda, esta corriente se vuelve a medir.

De esta manera se puede trazar una curva, de *amperes por watt por centímetros cuadrados vs longitud de onda*, como se muestra en la figura 2-7. Los resultados son corregidos a una base común de 1 W cm^{-2} cuadrado.

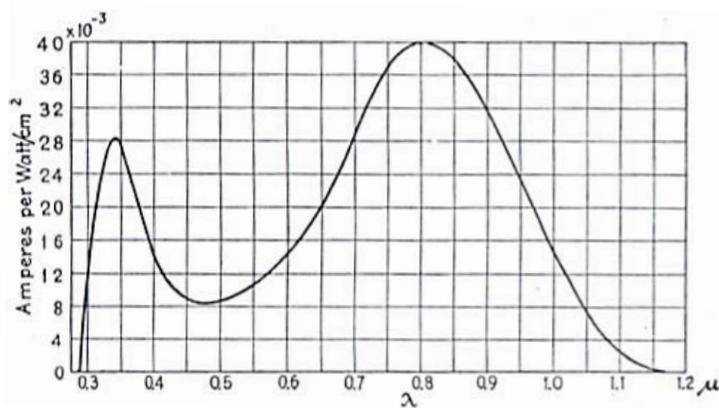


Figura 2-7: curva de respuesta de una fotocelda. [3]

Teniendo esta curva, se puede determinar la corriente que se producirá dado un nivel de irradiancia de longitud de onda específica. Por ejemplo, si se sabe que la irradiancia que llega a la fotocelda es de $3.0 \times 10^{-4} \text{ (watt/cm}^2\text{)}$ con una longitud de onda de $0.5 \mu\text{m}$, la curva indica que a una longitud de onda de $0.5 \mu\text{m}$ se produce una corriente de aproximadamente $8.8 \times 10^{-3} \text{ amperes}$ por cada watt por centímetro cuadrado de irradiancia, luego, la corriente que se generará en la celda es:

$$i = (3 \times 10^{-4}) \times (8.8 \times 10^{-3}) = 26.4 \times 10^{-7} \text{ (A)}$$

$$i = 2.64 \times 10^{-6} = 2.64 \text{ (}\mu\text{A)}$$

Por lo tanto, si p_i representa la función de respuesta de la fotocelda en amperes por watt por centímetro cuadrado dada una irradiancia a una longitud de onda específica i , y si el valor de esta irradiancia es G_i , luego la corriente resultante debido al espectro completo es:

$$i = \sum_1^n p_i G_i$$

Si se tiene un espectro continuo, la corriente queda definida por la siguiente integral:

$$i = \int_0^{\infty} p G_{\lambda} d\lambda$$

Donde p esta en función de λ y representa la curva de corriente entregada por la fotocelda por cada watt por centímetro cuadrado de irradiancia [3].

2.4 Curva de visibilidad.

Ya que no existe la forma de poner un amperímetro dentro de un nervio óptico, no es posible medir la respuesta directa a ciertos estímulos como se hace con una fotocelda. Más aún, si se pudieran medir los impulsos en el nervio óptico, no se podría decir mucho al respecto acerca de la sensación producida por dicho estímulo. Es por esto que la necesidad de usar esquemas indirectos de medición.

La figura 2-8, muestra una pared con 2 secciones, la zona izquierda es irradiada con una radiación de magnitud constante y una longitud de onda de $0.554\mu m$, la zona derecha también es irradiada pero esta radiación es de magnitud y longitud de onda variable.

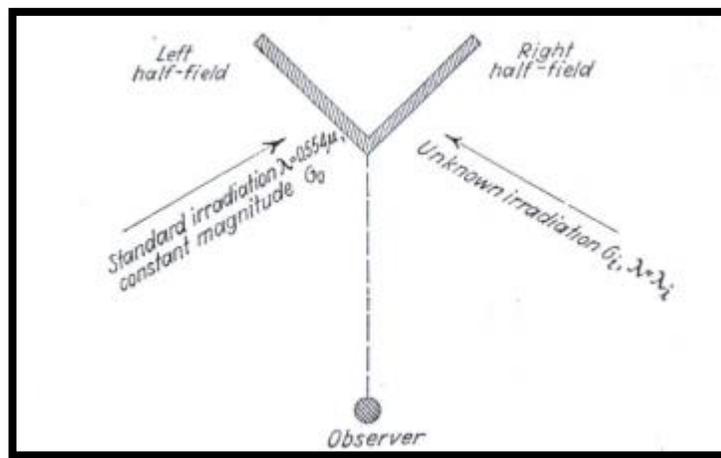


Figura 2-8 Diagrama esquemático de experimento para obtener curva de sensibilidad. [3]

Con una radiación en la zona derecha de una longitud de onda dada, de por ejemplo $0.6\mu m$, el observador verá la pared de 2 colores, uno en cada zona, estas serán distintas tanto en calidad como en cantidad.

A medida que la irradiancia se va reduciendo en el lado derecho, el observador podrá encontrar un punto en el cual la zona derecha es indudablemente menos brillante que la zona izquierda, del mismo modo al incrementar la irradiancia, el observador notara en algún momento que la zona derecha es más brillante que la de la izquierda.

Se puede entonces ajustar la irradiancia de la zona derecha de modo que las 2 mitades se muestren igualmente brillante pero no idénticas por su distinta longitud de onda.

Se han encontrado que iniciando desde la longitud de onda de $0.550\mu m$ y moviéndose en cualquiera de las 2 direcciones, la energía radiante requerida para lograr un equilibrio en ambas paredes va incrementando, en otras palabras, el ojo tiene el mayor nivel de sensibilidad en la zona amarilla - verde, y se vuelve menos sensible a medida que la longitud de onda aumenta o disminuye, esta propiedad del ojo es comúnmente llamada como *curva de visibilidad* y se presenta en la figura 2-9. [3]

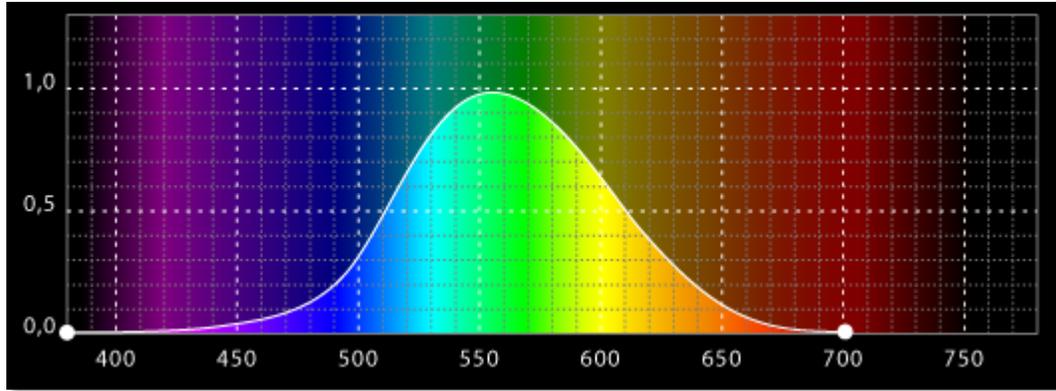


Figura 2-9: curva de sensibilidad del ojo humano, el eje de las abscisas está en nanómetros y el de las ordenadas en valores relativos. [5]

La visibilidad v se determina por medio de la siguiente expresión:

$$v = \frac{G_0}{G_i} v_0 \quad (0 \leq v \leq 1)$$

Donde,

v = visibilidad a la longitud de onda λ_i

v_0 = visibilidad a la longitud de onda de 0.554μ (considerado usualmente como 1)

G_0 = irradiancia fija ($\lambda = 0.554$)

G_i = irradiancia variable ($\lambda = \lambda_i$)

Cada observador tiene su propia curva de sensibilidad, la cual podría diferir más o menos de las demás personas, pero en general se espera que todos los individuos presenten lecturas parecidas y obtengan curvas bastante parecidas. La figura 2-10 muestra la diferencia que puede llegar a haber en los valores de visibilidad para un grupo de observadores y un estímulo específico de $0.64 \mu m$, la visibilidad de los observadores iba de 0.10 hasta 0.30. [3]

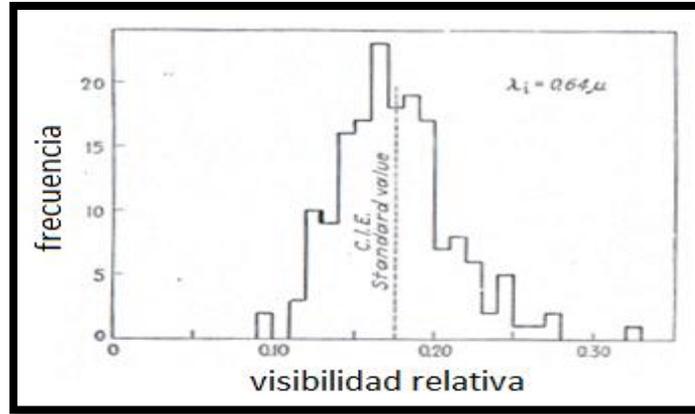


Figura 2-10: variación de sensibilidad a la longitud de onda $0.64 \mu m$ en 177 observadores. [3]

2.5 Iluminancia.

Cuando una superficie es irradiada y parte de esa energía radiante está en las longitudes de onda del espectro visible, se puede decir que la superficie es *iluminada*.

Luego, la *iluminancia* se puede definir por la siguiente expresión:

$$E = \sum_1^n v_i G_i \text{ (lightwatts/cm}^2\text{)} \quad (2-3)$$

Para espectros continuos:

$$E = \int_0^\infty v G_\lambda d\lambda \text{ (lightwatts/cm}^2\text{)} \quad (2-4)$$

Esta nueva cantidad indica la irradiancia que está en el espectro visible o que está produciendo algún estímulo al ojo, por esta razón se puede decir que E está en *lightwatts por centímetros cuadrados*.

La figura 2-11 muestra un ejemplo de la iluminancia de una lámpara, la figura 2-11a representa la irradiancia de la lámpara que incide sobre una superficie, la figura 2-11b es la curva de visibilidad, la curva 2-11c es el producto de la curva a y b, esto es vG_λ , la cual está en función de la longitud de onda, el área de la curva de la figura 2-11c representa la iluminancia.

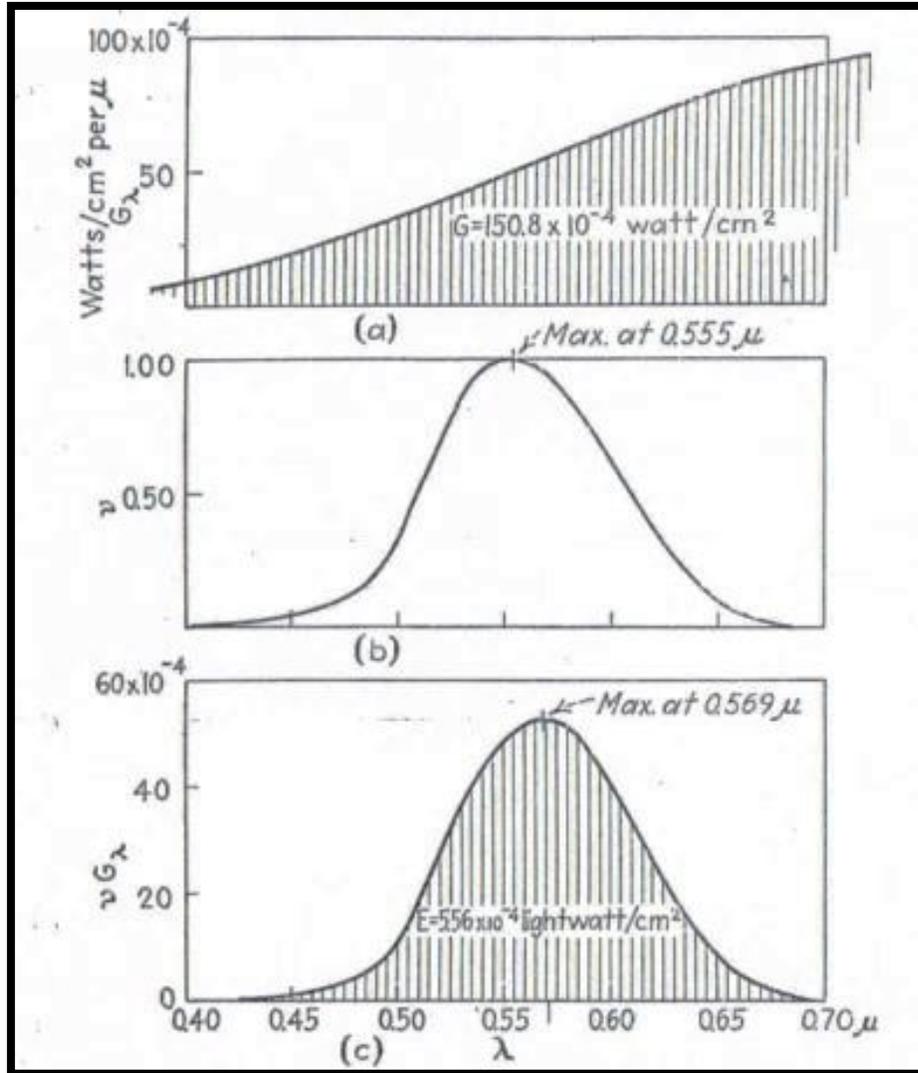


Figura 2-11: curvas de irradiancia, visibilidad y vG_λ , respectivamente [3]

Los niveles de irradiancia para cada ancho de banda de $0.01 \mu\text{m}$ están expresados en la tabla 2-1, donde la columna λ indica la longitud de onda en donde se ubica el ancho de banda y la columna G_λ indican el nivel de irradiancia en ese ancho de banda, expresados en *watts por centímetro cuadrado por micrómetro*.

Tabla 2-1: Niveles de irradiancia por ancho de banda [3]

Longitud de onda λ (μm)	Irradiancia G_λ ($\frac{\text{watts}}{\text{cm}^2}$ por micrómetro)	Visibilidad relativa (v)	vG_λ
0.40	9.1×10^{-4}	0.0004	0.00
0.41	10.8×10^{-4}	0.0012	0.00
0.42	12.7×10^{-4}	0.004	0.1×10^{-4}

Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here.

0.43	14.8×10^{-4}	0.0116	0.2×10^{-4}
0.44	17.0×10^{-4}	0.023	0.4×10^{-4}
0.45	19.4×10^{-4}	0.038	0.7×10^{-4}
0.46	21.9×10^{-4}	0.06	1.3×10^{-4}
0.47	24.7×10^{-4}	0.091	2.2×10^{-4}
0.48	27.6×10^{-4}	0.14	3.8×10^{-4}
0.49	30.4×10^{-4}	0.208	6.3×10^{-4}
0.50	33.3×10^{-4}	0.323	10.7×10^{-4}
0.51	36.3×10^{-4}	0.503	18.2×10^{-4}
0.52	39.4×10^{-4}	0.71	28.0×10^{-4}
0.53	42.6×10^{-4}	0.862	36.7×10^{-4}
0.54	45.7×10^{-4}	0.954	43.6×10^{-4}
0.55	49.0×10^{-4}	0.995	48.7×10^{-4}
0.56	52.1×10^{-4}	0.995	51.9×10^{-4}
0.57	55.3×10^{-4}	0.952	52.5×10^{-4}
0.58	58.5×10^{-4}	0.87	50.9×10^{-4}
0.59	61.5×10^{-4}	0.757	46.6×10^{-4}
0.60	64.7×10^{-4}	0.631	40.8×10^{-4}
0.61	67.5×10^{-4}	0.503	33.9×10^{-4}
0.62	70.5×10^{-4}	0.381	26.9×10^{-4}
0.63	73.3×10^{-4}	0.265	19.4×10^{-4}
0.64	75.9×10^{-4}	0.175	13.3×10^{-4}
0.65	78.6×10^{-4}	0.107	8.4×10^{-4}
0.66	81.0×10^{-4}	0.061	4.9×10^{-4}
0.67	83.7×10^{-4}	0.032	2.7×10^{-4}
0.68	86.0×10^{-4}	0.017	1.5×10^{-4}
0.69	88.1×10^{-4}	0.0082	0.7×10^{-4}

0.70	90.8×10^{-4}	0.0041	0.4×10^{-4}
------	-----------------------	--------	----------------------

De acuerdo a la expresión 2-2, la irradiancia total de la lámpara de la figura 2-11 es:

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda = (9.1 \times 10^{-4} + 10.8 \times 10^{-4} + \dots + 90.8 \times 10^{-4}) \times 0.01$$

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda = (1522 \times 10^{-4}) \times 0.01 = 15.22 \times 10^{-4}$$

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda = 15.22 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \right)$$

Cabe destacar que la suma de todas las irradiancias de la tabla 2-1 deben multiplicarse por un factor de 0.01, ya que los valores de irradiancia G entregados, están para un ancho de banda de $1\mu m$.

Luego la iluminancia E tal como indica la expresión 2-4, será la suma de todas las irradiancias desde $0.4\mu m$ hasta $0.7\mu m$ pero evaluadas o ponderadas por el factor entregado por la curva de visibilidad en su longitud de onda correspondiente, esto es:

$$E = \int_0^{\infty} v G_{\lambda} d\lambda = (0.0004 \times 9.1 \times 10^{-4} + 0.0012 \times 10.8 \times 10^{-4} + \dots + 0.0041 \times 90.8 \times 10^{-4}) \times 0.01$$

$$E = \int_0^{\infty} v G_{\lambda} d\lambda = (556.4 \times 10^{-4}) \times 0.01$$

$$E = \int_0^{\infty} v G_{\lambda} d\lambda = 5.56 \times 10^{-4} (\text{lightwatt}/\text{cm}^2)$$

Es importante destacar que si toda la potencia radiante se concentrara en la longitud de onda $\lambda = 0.554\mu m$, mejoraría la producción de iluminancia, esto dado las características de la curva de visibilidad la cual esta evaluada en 1 para esa longitud de onda, esto es [3]:

$$E = v_{\lambda=0.554} \times G_{\lambda=0.554} = 1 \times 15.22 \times 10^{-4}$$

$$E = vG = 15.22 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{lightwatt}}{\text{cm}^2} \right)$$

2.6 El lumen.

Si se tiene una irradiancia que está incidiendo de manera uniforme sobre una superficie de área S , el flujo radiante total (o potencia radiante total) que cae sobre esta superficie es:

$$\varphi = S (\text{cm}^2) G \left(\frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \right) = SG (\text{watt})$$

Se puede definir el concepto de *flujo luminoso* F como:

$$F = SE = S \int_0^{\infty} v G_{\lambda} d\lambda (\text{lightwatts}) \quad (2-5)$$

Entonces el flujo luminoso puede definirse como la potencia radiante evaluada con respecto a la curva de visibilidad v en un área específica S .

Los lightwatts no son una unidad muy usada para determinar el flujo luminoso, en lugar de esto se utiliza el *lumen*. Esta unidad de flujo luminoso se basa o deriva de manera arbitraria de la emisión de luz que puede dar una vela estándar.

La relación que se obtuvo como resultado de una serie de experimentos con velas estandarizadas es la siguiente:

$$1 \text{ lightwatt} = 680 \text{ lumenes} \quad (2-6)$$

Usando la igualdad de (2-7), se redefine la expresión de iluminancia:

$$E = 680 \int_0^{\infty} v G_{\lambda} d\lambda \left(\frac{\text{lumen}}{\text{cm}^2} \right) \quad (2-7)$$

La *eficacia luminosa* se puede definir por medio de la siguiente expresión:

$$n = \frac{\int_0^{\infty} v G_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda} = \frac{\text{iluminancia} \left(\frac{\text{lightwatts}}{\text{cm}^2} \right)}{\text{irradiancia} \left(\frac{\text{watts}}{\text{cm}^2} \right)} \rightarrow (\text{lightwatts/watt})$$

O en términos de lúmenes, se tiene:

$$n = \frac{680 \int_0^{\infty} v G_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda} = \frac{\text{iluminancia} \left(\frac{\text{lumen}}{\text{cm}^2} \right)}{\text{irradiancia} \left(\frac{\text{watts}}{\text{cm}^2} \right)} \rightarrow (\text{lumen/watt})$$

Esta expresión permite conocer la relación entre el poder radiante que incide sobre una superficie versus aquella radiación que realmente está provocando algún estímulo al ojo, es decir su flujo luminoso.

En otras palabras, eficacia luminosa quiere decir, cual es la efectividad de un watt de potencia radiante en producir flujo luminoso.

Por definición, 1 watt de flujo radiante a una longitud de onda de $0.554\mu\text{m}$, generaran 680 lúmenes, luego su eficacia será de 680 (lúmenes/watt) esta es la máxima eficacia que puede alcanzar una fuente luminosa. [3]

2.7 Intensidad Luminosa

Un concepto bastante utilizado es la *intensidad luminosa*, esta es una manera conveniente de especificar el nivel de “fuerza” de una fuente con respecto a su capacidad de producir iluminación en una dirección específica.

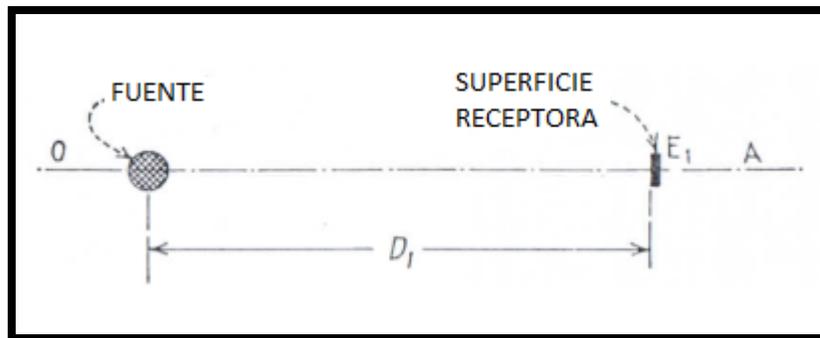


Figura 2-12: diagrama esquemático para la medición de la intensidad luminosa. [3]

Si se ubica una fuente en el punto O como en la figura 2-12, y se desea su intensidad luminosa en la dirección de OA, en la cual hay una superficie receptora a una distancia D_1 .

Lo que se hace es medir la iluminancia E obteniendo la curva espectral (curva de irradiancia G) que incide en la superficie y evaluándola con respecto a la curva de visibilidad estándar.

Si se repite esta medición de iluminancia en varios puntos de la línea que une O con A, se verá que la iluminancia disminuye rápidamente a medida que la distancia D aumenta. El valor $E \times D^2$, sin embargo, tiende a aproximarse a una constante a medida que D incrementa ($D \rightarrow \infty$) [3].

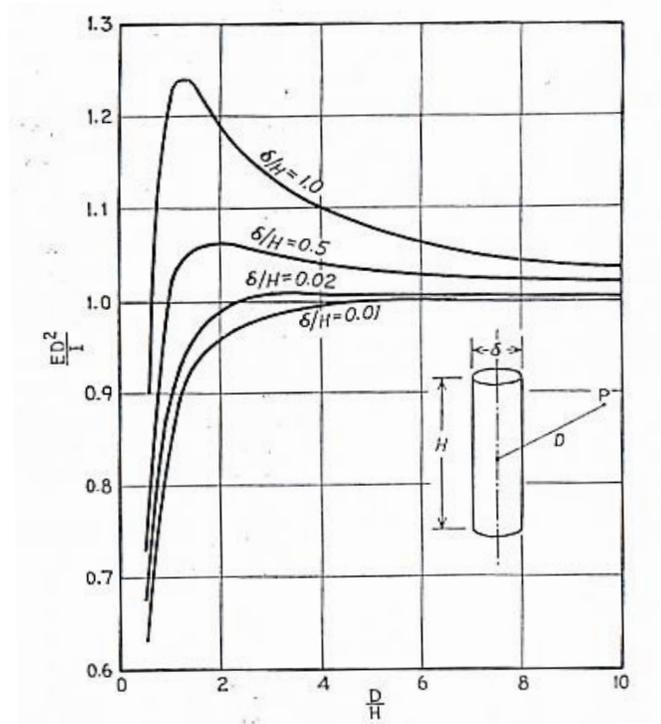


Figura 2-13: grafica de intensidades en función de la distancia para una fuente lumínica de forma cilíndrica de altura H y diámetro δ . [3]

Como se ve en la figura 2-13, cerca de la fuente los valores de ED^2 varían marcadamente, pero cuando D aumenta estos valores tienden a una constante.

Como se observa, el uso de luminarias de distinta forma o tamaño, podría alterar de alguna manera las curvas, pero no cambia el hecho de que tarde o temprano ED^2 se vuelve independiente de la distancia.

El valor del límite de ED^2 es usado como una medida y se llama *intensidad luminosa I*:

$$I = \lim_{D \rightarrow \infty} ED^2 \text{ (candela)} \quad (2-8)$$

Si una superficie está inclinada, como se muestra en la figura 2-14, el flujo luminoso por unidad de área se reducirá en proporción al coseno del ángulo que se forma entre los "haces" del flujo luminoso y la normal de la superficie, combinando esta idea con la expresión (2-11), se tiene:

$$E = \frac{I}{D^2} \cos \theta$$

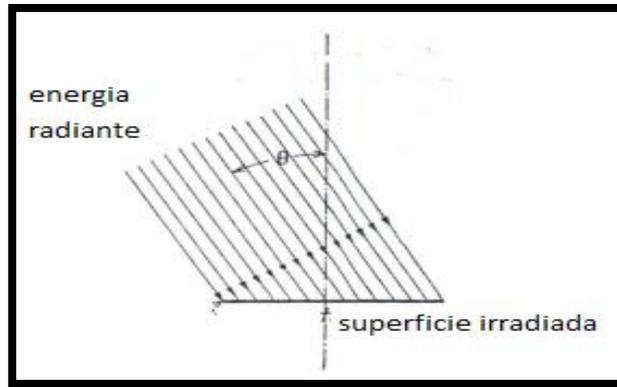


Figura 2-14: Esquema del ángulo generado entre la normal de una superficie y una radiación homogénea. [3]

2.8 Luminancia.

La luminancia es la cantidad de flujo luminoso que incide, emerge o atraviesa una superficie en una **dirección determinada**, esta superficie se denomina "aparente", puesto que es la proyección de la superficie real en el plano perpendicular a la línea de visión.

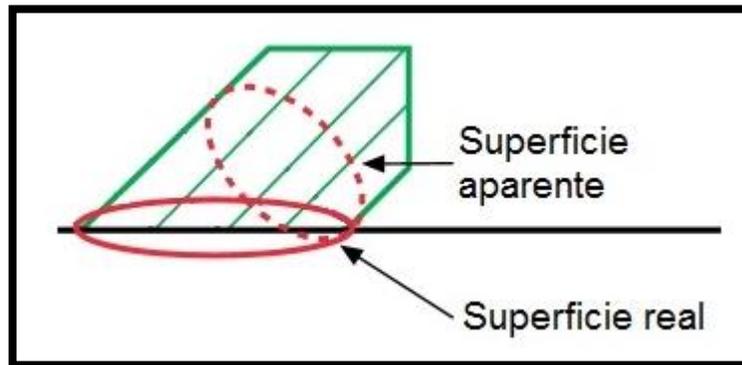


Figura 2-15: Comparación entre la superficie real y la aparente. [6]

La unidad de medida de la luminancia en el sistema internacional es la **candela por metro cuadrado**, esto es:

$$\text{Luminancia } (L) = \frac{cd}{m^2}$$

0,

Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here.

$$Luminancia (L) = \frac{Lumen}{sr(m^2)}$$

3 La visión

3.1 Introduccion.

El propósito de la mayoría de la iluminación es permitir que la gente vea, es por esto que cada sistema de iluminación debe diseñarse con el objetivo de que esta promueva una buena visión, por esta razón, el estudio del ojo y de su comportamiento ante distintos fenómenos externos son de suma importancia para el presente texto.

3.2 El proceso de la visión.

El primer requisito en el proceso de la visión es una fuente radiante como el sol o una llama, el segundo requisito debe ser un objeto que refleje o transmita la luz al ojo por ejemplo una página de un libro, a ese objeto se le llama modificador porque en la mayoría de los casos alterará de alguna manera la naturaleza de la radiación de la fuente como su intensidad, su dirección o su carácter espectral. [7]

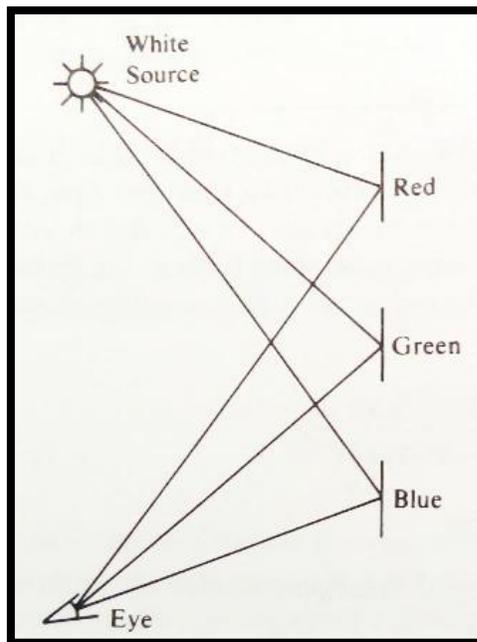


Figura 3-1: Esquema de modificación espectral. [7]

Esta modificación espectral se ilustra en la figura 3-1, la luz blanca que contiene todos los colores espectrales, inciden en las superficies rojas, verdes y azul, 3 ondas luminosas se reflejan en el ojo, una onda roja de la superficie roja, una verde y una azul, de las superficies verdes y azul respectivamente, la superficie roja, aparece roja para el espectador, la verde se verá verde, y la azul, azul.

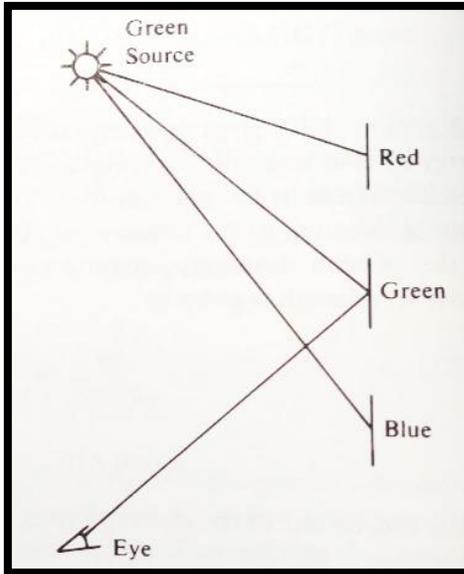


Figura 3-2: Esquema de modificación espectral de una luz verde. [7]

En la figura 3-2, hay una fuente con longitudes de ondas verdes, la luz verde se refleja en el ojo desde la superficie verdes, que entonces aparece verde para el espectador, las otras dos superficies aparecen oscuras, por lo tanto, es el carácter espectral de la fuente y el modificador lo que determinan lo que el observador percibe.

El tercer ingrediente es el ojo, el cual es el receptor y procesador de la luz para luego transmitirlo al cerebro.

El cerebro es el cuarto elemento, el cual decodifica las señales y proporciona al espectador la percepción y la comprensión del objeto. [7]

3.3 Estructura del ojo.

La figura 3-3 muestra las partes de un ojo:

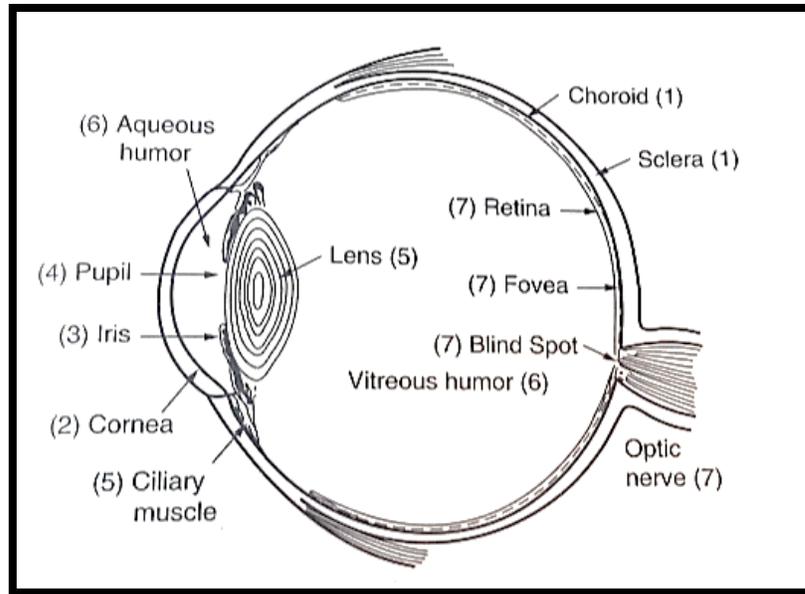


Figura 3-3: diagrama de cada una de las partes del ojo. [7]

Se presenta una descripción de las partes más importantes del ojo en el proceso de la visión:

1.- Esclerótica y coroide: esta es una envoltura exterior del ojo, con un grosor total 1 milímetro, la esclerótica mantiene el ojo en forma casi esférica. La coroide es una capa negra de 0.2 mm de espesor que recubre la esclerótica y contiene gran parte del suministro de sangre del ojo.

2.-Cornea: esta es la primera de las 3 partes principales del sistema óptico, esta es una membrana transparente que consta de 5 capas. la cornea tiene un radio aproximado de unos 7.5 mm y un espesor de unos 0.4 mm.

3.- Iris: corresponde a la parte de color café o azul de la parte frontal del ojo y cumple un papel similar al diafragma de una cámara, controlando el tamaño de la abertura, en este caso de la pupila, a través de la cual ingresa la luz, protegiéndola así contra la luz excesiva.

4.- Pupila: es la segunda parte del sistema óptico, y corresponde a una abertura circular en el iris, lo que hace es controlar la cantidad de luz que entra y confinarla en el área central de las lentes para minimizar la distorsión de lo que se está viendo.

5.- Lentes: es la tercera parte del sistema óptico, está ubicado junto detrás de la pupila y suspendido en su lugar con la ayuda de un músculo ciliar. En una cámara el enfoque se logra moviendo la lente, en el ojo el músculo ciliar altera la forma de la lente para cambiar el enfoque.

6.- Humor acuoso y vítreo: son 2 líquidos transparentes de la cornea y las zonas más internas del ojo, el humor acuoso se encuentra antes de la lente y es muy similar al agua, el humor vítreo situado detrás de la lente es más denso y gelatinoso.

7.-Retina: es un revestimiento interior del ojo, en ella se encuentran 2 tipos de foto-receptores, las varillas y los conos, los cuales son estimulados por la radiación entrante.

8.- Músculos extraoculares: permiten al ojo concentrarse en un objeto y mirar en cualquier dirección, cada ojo está provisto de 6 músculos extraoculares.

9.- Bastones y conos: son 2 tipos de foto-receptores en la retina, que transforman la luz que entra al ojo en impulsos eléctrico que se envían a través del nervio óptico al cerebro. [4]

La tabla 3-1 resume las propiedades de los conos y los bastones:

Tabla 3-1 características de los foto-receptores [7]

	Bastones	Conos
Cantidad	130×10^6	7×10^6
Distribución	Localizadas principalmente al exterior de la fovea.	Ubicados principalmente en la fovea a medida que se alejan de esta parte su densidad baja.
Tiempo de adaptación Sensibilidad	Puede ir de varios minutos a unas horas. Permite una visión escotópica, esto es visión nocturna, altamente sensible a la luminancia	Puede ser de milisegundos hasta unos 10 minutos. Permite una visión fotópica, es decir en el día, baja sensibilidad a la luminancia.
Conexión al nervio óptico	Están conectados en grandes grupos en la periferia, proveen una pobre resolución al detalle.	Conectados en la fovea individualmente o en grupos pequeños, proveen una alta resolución al detalle.
Características de la visión	Acromática, todos los objetos se ven prácticamente grises.	Cromática, con un peak de sensibilidad a 555 nm.

Estudiando el ojo bajo ciertas condiciones de iluminación se ha encontrado que los bastones y conos tienen ciertas diferencias en su modo de operación. Los bastones son considerablemente más sensibles que los conos, pero las sensaciones del color se obtienen solo a través de los conos.

La visión diurna ordinaria o visión fotópica usa los conos foveales, casi exclusivamente en la visión fotópica se produce la sensación del color, ya que los conos foveales están muy juntos es que tienen un alto grado de agudeza visual. [7]

La tabla 3-2 muestra los niveles de luminancia bajo los cuales el ojo entra en los rangos fotópicos, mesópicos o escotópicos, se indican los rangos utilizados por la CIE.

Tabla 3-2: Rangos de luminancia fotópica, mesópica y escotópica [8]

Nivel de luz	Luminancia ($\frac{\text{candelas}}{\text{m}^2}$) Límite superior	Luminancia ($\frac{\text{candelas}}{\text{m}^2}$) Límite inferior
Fotópico	---	3.0
Mesópico	3.0	0.03
Escotópico	0.03	---

3.4 Distribucion de conos y varillas (bastones) en la retina.

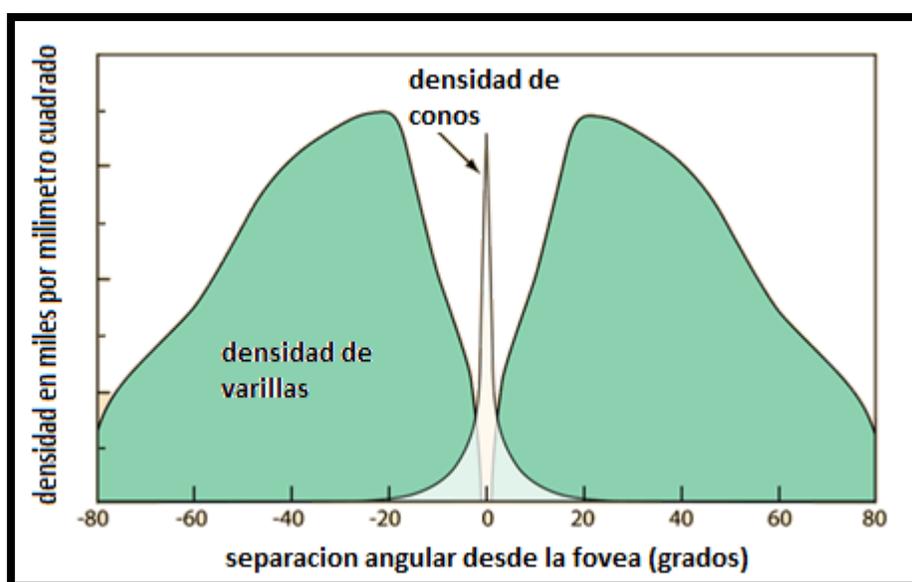


Figura 3-4: Esquema de distribución de los conos y los bastoncillos (varillas) en la retina. [9]

Las curvas de densidad de bastoncillos y conos medidas en la retina muestran una enorme densidad de conos en el centro de la fóvea, a ésta se le atribuye tanto la visión del color como la más alta agudeza visual. El examen visual de los detalles pequeños, se realiza enfocando la luz de esos detalles sobre la fóvea. Por otro lado, los bastones están ausentes en la fóvea. A unos pocos grados fuera de ahí, su densidad se eleva a un alto valor y se esparce sobre una gran área en la retina. Estos bastones son los responsables de la visión nocturna y de la detección del movimiento más sensible. [9]

3.5 Sensibilidad espectral.

Tanto los bastoncillos como los conos son selectivamente sensibles a distintas longitudes de onda y cada una tiene su *propia curva de sensibilidad espectral*.

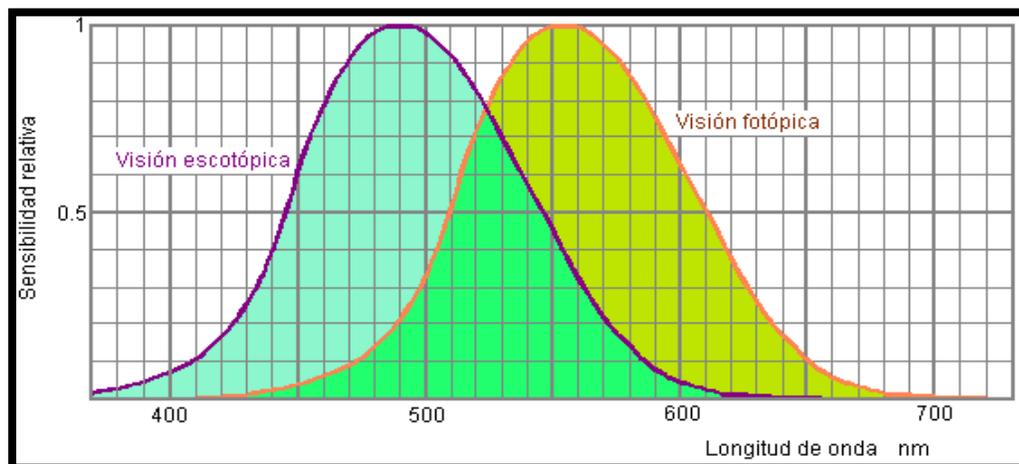


Figura 3-5: curva de sensibilidad espectral fotópica y escotópica. [10]

La figura 3-5, indica que, con la visión fotópica, el ojo es más sensible a la luz a 555nm (que es la zona amarilla-verde del espectro). La tabla 3-3 muestra los valores relativos de la curva fotópica para cada longitud de onda, la función de eficiencia luminosa generalmente se normaliza con el valor de 1 a longitud de onda de 555nm , para las demás longitudes es menos sensible.

Tabla 3-3: Valores de eficiencia luminosa espectral para la visión fotópica [7]

Longitud de onda λ (nm)	Eficiencia luminosa espectral	Longitud de onda λ (nm)	Eficiencia luminosa espectral
380	0.00004	540	0.954
390	0.00012	550	0.995
400	0.0004	560	0.995
410	0.0012	570	0.952
420	0.004	580	0.87
430	0.0116	590	0.757
440	0.023	600	0.631
450	0.038	610	0.503
460	0.06	620	0.381
470	0.091	630	0.265

Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here.

480	0.139	640	0.175
490	0.208	650	0.107
500	0.323	660	0.061
510	0.503	670	0.032
520	0.71	680	0.017
530	0.862	690	0.0082

Si un observador se centra en una fuente de luz azul de 1 watt a $450nm$ y una fuente de 1 watt de luz amarilla del mismo tamaño a $600nm$, la luz de $600nm$ será $\frac{0.631}{0.038} = 16.6$ veces mas luminosa (ver tabla 3-3).

La eficiencia luminosa espectral puede ser definida como:

$$V(\lambda) = \frac{M_{555}}{M_{\lambda}}$$

Donde M_{555} es la potencia referida a $555nm$ para balancear la luminancia con otra fuente a una potencia M_{λ} a una longitud de onda λ .

También se puede determinar una función $V'(\lambda)$ de eficiencia luminosa para la visión escotópica, cuyo peak está en los $507nm$, esta curva está ubicada $48nm$ hacia la izquierda respecto a $V(\lambda)$. Esto se conoce como el efecto *Purkinje*, llamado así por Johannes Von Purkinje.

Un buen ejemplo de este camino es observando las flores rojas y violetas a medida que se acerca el crepúsculo en la luz del día, la flor roja parecerá probablemente más brillante durante el día, pero como la oscuridad se acerca, la flor roja se verá menos brillante y la violeta más brillante, esta es la transición de la visión fotópica a la escotópica, a medida que se produce la transición tanto los conos los bastoncillos están en operación, pero la sensibilidad de los conos disminuye, mientras que la sensibilidad de las varillas aumenta, también la visión está cambiando de la fovea a la periferia, causando una pérdida de la resolución y distinción del color.

Si la iluminación en la retina es muy baja, la curva de visibilidad estándar ya no es aplicable y las unidades fotométricas carecen de sentido. Este hecho puede ser muy interesante en aquellas aplicaciones en que se use una iluminación muy baja. [7]

3.6 Resolución y sensibilidad a la luz.

Como se mencionó, la luz incide en los bastones y conos, generando secreción de sustancias químicas, las cuales provocan la liberación de señales neuronales. Estas señales son recibidas y organizadas por células colectoras y enviadas a las células ganglionares para su interpretación.

Cada ojo contiene aproximadamente 130 millones de foto-receptores, por lo tanto, en cada instante hay 130 millones de señales de luz recibida por cada ojo, cada ojo contiene cerca de 1 millón de celulares ganglionares cuyo trabajo es condensar e interpretar 130 millones de señales de los foto-receptores.

Esta relación de 130 a 1 se llama convergencia, la convergencia varía en toda la retina, es casi de 1 a 1 en la fovea, pero aumenta en la periferia de esta.

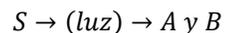
La resolución se define como la capacidad del ojo de distinguir entre 2 luminancias adyacentes, la resolución es inversamente proporcional a la convergencia, mientras más foto-receptores suministren información a una sola célula ganglionar, empeorará la resolución, dado que la convergencia es de 1 a 1 en la fovea, la resolución es mayor, por lo tanto, las regiones con bajas convergencias son esenciales para localizar objetos con exactitud en los detalles.

Mientras que la convergencia alta es contraria a la resolución (pobre para reconocer objetos), esta mejora la sensibilidad, en la periferia los campos receptivos son grandes y están conectados a un gran número de foto-receptores. Esto significa que las señales de luz débiles individuales pueden generar respuestas grandes. Esta es la anteriormente mencionada *visión escotópica*. [7]

3.7 Fotoquímica de la retina y la adaptación a la oscuridad.

Después de pasar por el sistema óptico del ojo, la energía radiante incide sobre la retina produciendo una reacción en ella, esta etapa es considerada un proceso fotoquímico.

Si se asume que cada elemento receptor (conos y bastones) tienen asociada a él una cierta cantidad de sustancia fotoquímica llamada S , cuando un quantum de energía radiante es absorbido por S , aquellas moléculas que constituyen S se rompen en otras 2 sustancias las cuales no son sensibles a la luz.



Una de estas 2 sustancias será capaz de excitar los terminales nerviosos. Entonces se reconocen 2 pasos del proceso de la retina.

1.- una reacción fotoquímica, donde cada quantum absorbido produce una pequeña parte del elemento A y otra del elemento B.

2.- la excitación de las terminales nerviosas.

Pero en general habrá 2 reacciones opuestas, una en que la energía radiante se absorbe para producir A y B, y otra que reduce A y B.

Estos procesos se pueden modelar por medio de la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dx}{dt} = k_1 E_{ret}(1 - x) - k_2 x^2 \quad (3-1)$$

Donde;

X : número de moléculas de la sustancia A

E_{ret} : iluminación en la retina

k_1 y k_2 = constantes

t = tiempo

La solución a esta ecuación diferencial es complicada ya que es no lineal, pero puede entregar información muy relevante en un caso en particular.

Después de que se ha cortado una radiación constante sobre la retina, el ojo comienza a adaptarse a los entornos oscuros y una luz débil se introduce, por medio de la expresión 3-1 se puede llegar a la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{1-x} = KE_{ret} \quad (\text{ecuación de adaptación a la oscuridad})$$

Se pueden generar curvas de $\frac{1}{(1-x)}$ contra $k_2 t$, estas son las curvas de adaptación a la oscuridad.

Una de estas curvas se presenta en la figura 3-6, lo que indica la figura es que los ojos del observador tardan un tiempo determinado en adaptarse a la oscuridad para así poder ver objetos con luminancias bajas, a medida que la luminancia del objeto va aumentando se requerirá menos tiempo para que el observador lo detecte. [3]

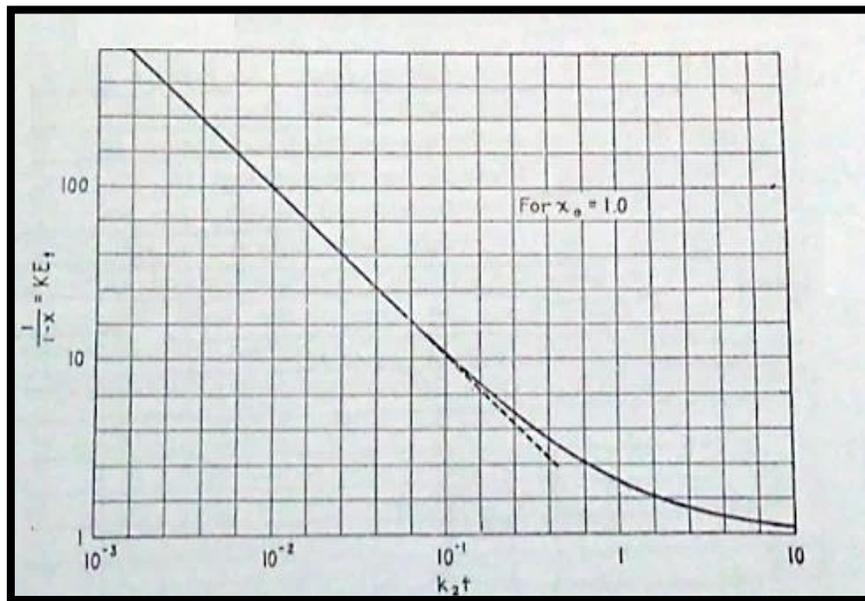


Figura 3-6: Modelo teórico de la curva de adaptación a la oscuridad. [3]

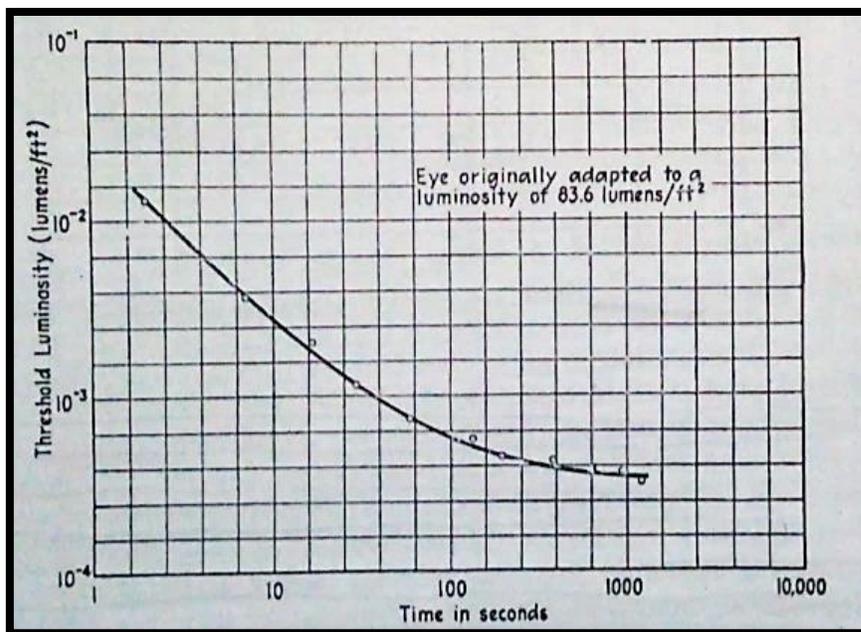


Figura 3-7: curva de adaptación obtenida por medio de experimentación con observadores (adaptación foveal) [3]

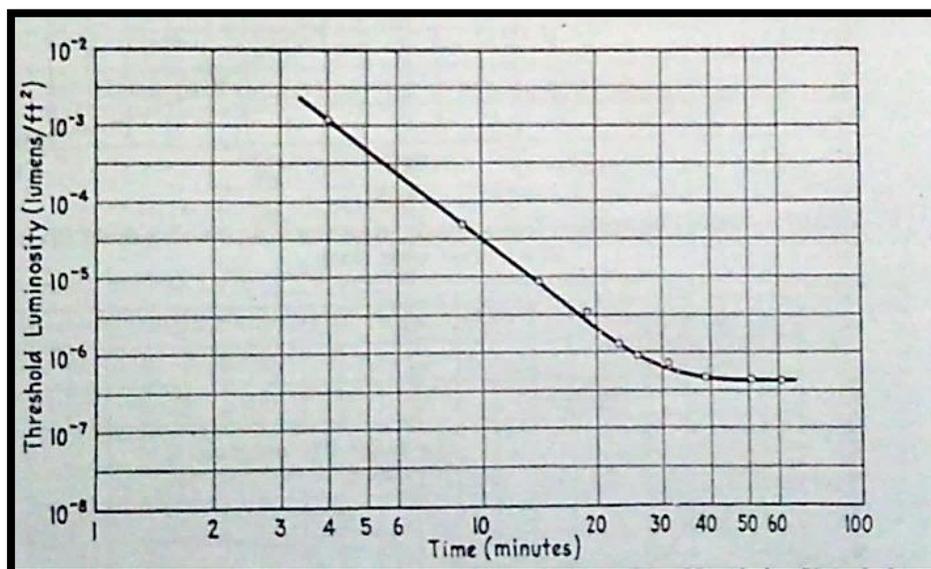


Figura 3-8: Curva de adaptación obtenida por medio de experimentación con observadores (adaptación parafoveal). [3]

Las curvas 3-7 y 3-8 se obtuvieron por medio de experimentación con observadores, este progreso en la adaptación se determinó exponiendo un pequeño objeto en un cuarto oscuro y aumentando su luminancia hasta que el observador podía verla.

En los primeros segundos se requiere un nivel alto de luminancia del objeto para que este pueda ser visto, pero a medida que el ojo se adapta al entorno oscuro el nivel de luminancia necesario será cada vez menor.

La gráfica 3-7 muestra la adaptación foveal, es decir de los conos, se observa que la adaptación es rápida, en menos de 100 segundos la retina alcanza condiciones de equilibrio con una alta sensibilidad. La grafica 3-8 muestra la adaptación parafoveal a la oscuridad, se obtiene una curva similar, solo que el proceso es mucho más lento se requiere cerca de 1 hora en alcanzar el equilibrio. Las curvas indican que las substancias fotoquímicas de los conos y los bastones son bastante diferentes.

En términos generales, los conos se adaptan más rápido que los bastones, de 10 a 12 minutos en comparación los 60 minutos o más de los bastones, es decir, la respuesta a niveles más altos de iluminación es más rápida que a niveles bajos.

Esto es evidente al entrar y salir un cine, al entrar a este desde un lugar luminoso, a una persona le puede tomar hasta 30 minutos para poder ver relativamente bien en la oscuridad. Al salir del cine el tiempo que tarda en adaptarse es solo unos cuantos segundos.

El sistema visual es capaz de adaptarse a 3 niveles de visión, fotópico, mesópico y escotópico, en la visión mesópica, los bastones y conos están en actividad. [3]

3.8 Factores externos que influyen en la visión.

Hasta ahora se consideró el aspecto interno del ojo, ahora se considerará algunos factores externos. Existen 5 factores externos importantes, estos son, el tamaño, el contraste, el tiempo, la luminancia y el color se hablará de los primeros 4 y el color será tratado más adelante.

3.8.1 Tamaño.

Observando la figura 3-9 donde una carretera se muestra desapareciendo a la distancia con una fila de postes al lado, si bien todos los postes tienen la misma altura, los que están más lejos parecen más pequeños y es difícil ver sus detalles, por lo tanto, el tamaño físico del objeto, no es en sí mismo un buen criterio para determinar si el objeto puede ser visto.



Figura 3-9: Esquema de una carretera desapareciendo a la distancia. [11]

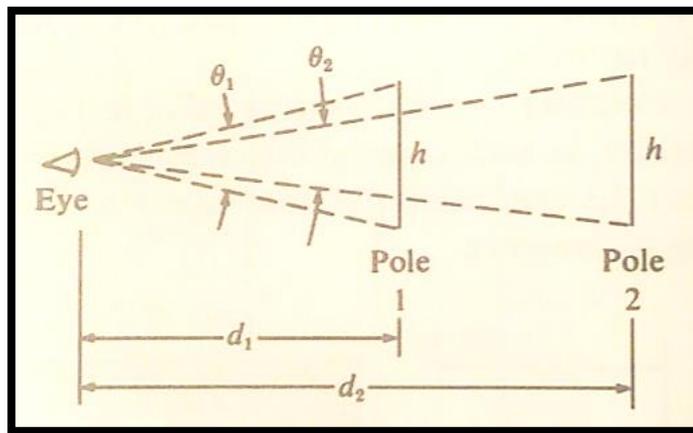


Figura 3-10: Diagrama para determinar el tamaño visual de un objeto a la distancia [7]

Considerando la figura 3-10, donde h es el tamaño de los objetos, d son las distancias respectivamente y θ los tamaños visuales, por definición, se sabe que:

$$\theta_1 = 2 \tan^{-1} \frac{h}{2d_1} \cong \frac{h}{d_1}$$

Y

$$\theta_2 = 2 \tan^{-1} \frac{h}{2d_2} \cong \frac{h}{d_2}$$

En donde los ángulos θ_1 y θ_2 son los tamaños visuales del objeto.

Si se tiene por ejemplo un objeto de 10 metros de altura a unos 200 metros del observador, su tamaño visual será de 0.05 radianes o unos 3 grados.

Se nota entonces que, aunque las alturas de los postes son iguales sus tamaños visuales son diferentes, entonces es el tamaño visual más que el tamaño físico que ayuda a determinar que tan bien puede verse un objeto.

El tamaño visual de un objeto circular (bidimensional) se expresa en términos de ángulos solidos como se muestra en la figura 3-11.

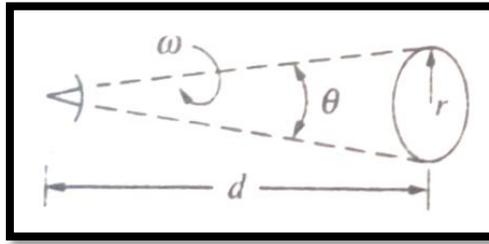


Figura 3-11: Esquema de representación del tamaño visual de un objeto bidimensional. [7]

Esto es:

$$w = \frac{\pi r^2}{d} = \pi \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Si el objeto es muy pequeño comparado con la distancia, la expresión es la siguiente:

$$w = \pi \frac{\theta^2}{4}$$

No siempre es fácil decidir la dimensión del tamaño visual, pero el tamaño visual del detalle más pequeño que necesita ser determinado es el que se considera.

El diagrama 3-12 es una imagen estándar que se elaboró a principios de los 1900 como objeto de prueba para hacer estudios de visibilidad.

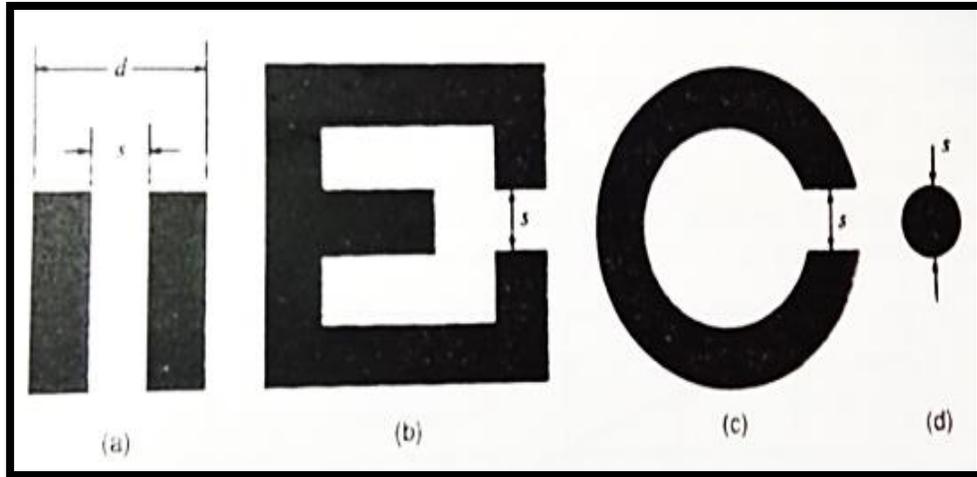


Figura 3-12: test de visibilidad visual [7]

Suponiendo que la tarea visual es simplemente determinar la presencia o ausencia de un objeto, solo se requerirá su dimensión total “d”, pero si se requieren mayores detalles por ejemplo para las barras paralelas de la figura 3-12a, se deberá tomar en cuenta la separación.

Si la preocupación es con los detalles de los objetos de la figura 3-12, en cada caso se debe usar la dimensión “s”, de esta forma, de esta forma los 4 objetos tendrían el mismo tamaño visual. [7]

3.8.2 Luminancia y contraste.

El contraste de luminancia entre un objeto y su fondo adyacente se define mediante la siguiente ecuación:

$$c = \frac{|L_b - L_t|}{L_b}$$

Donde L_t es la luminancia del objeto y L_b la luminancia de fondo. El contraste puede ir de 0 a 1 si $L_t \leq L_b$ y de 0 a infinito si $L_t \geq L_b$.

Usualmente la luminancia de fondo tiende a ser mayor que la del objeto, esto es $L_b > L_t$, luego la ecuación queda como sigue:

$$c = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max}}$$

El contraste es muy dependiente de la luminancia de fondo, como también del tamaño visual del objeto y del tiempo.

La figura 3-13 muestra como la luminancia de fondo puede afectar a la visibilidad de un objeto. Es posible notar que se produce un efecto de saturación a medida que la luminancia de fondo aumenta. [7]

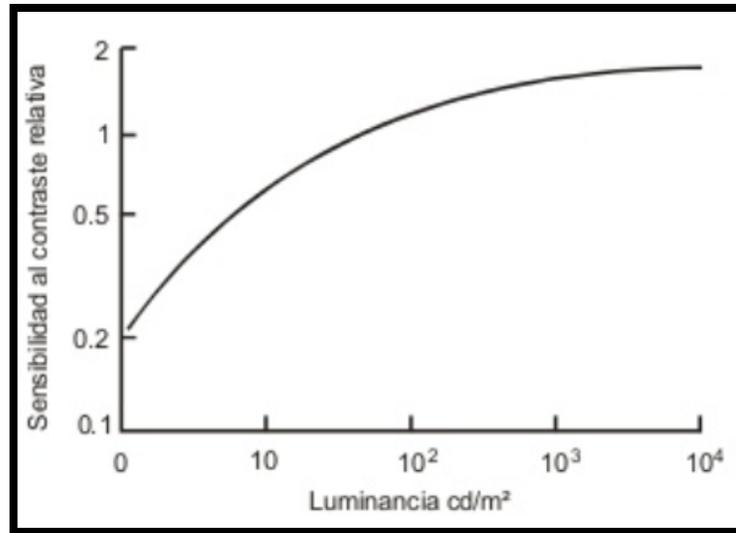


Figura 3-13: curva de sensibilidad al contraste en función de la luminancia de fondo. [12]

3.8.3 Tiempo.

Como se sabe, se necesita tiempo para poder ver un objeto o suceso determinado. Por ejemplo, cuando un globo revienta, primero se ve completamente inflado y después completamente desinflado, pero no se puede ver el proceso intermedio justo después que se pincha con un alfiler.

Se sabe que el tiempo necesario para poder ver disminuye a medida que se aumenta la luminancia de fondo.

Un experimento interesante es preparar una diapositiva con grandes letras de color negro sobre un fondo blanco y mostrárselo a un grupo de observadores durante cierto tiempo, pidiéndole que identifique tantas letras como puedan, luego repetir el experimento con una segunda diapositiva con un fondo gris y reduciendo la iluminación.

La mayoría de los observadores será capaz de identificar 4 o 5 letras cuando la luminancia de fondo y el contraste son altos, pero identificarán menos letras con un contraste y luminancia baja. Además de esto tardarán más en realizar la misma tarea inicial si se reduce el contraste o la luminancia. [7]

3.9 Modelos de rendimiento visual.

A continuación, se presentan 2 experimentos que se desarrollaron con la idea de poder relacionar estos 4 factores mencionados en el apartado anterior y poder saber cómo influyen cada uno en los demás.

1.- Modelo de COBB-MOSS:

En este experimento se utilizaron barras paralelas en un fondo blanco y las barras se cambiaban de negro a gris, el experimento consistía en detectar el espacio entre 2 barras utilizando distintos niveles de contraste y distintos tiempos además de cambiar la luminancia de fondo y el tamaño visual.

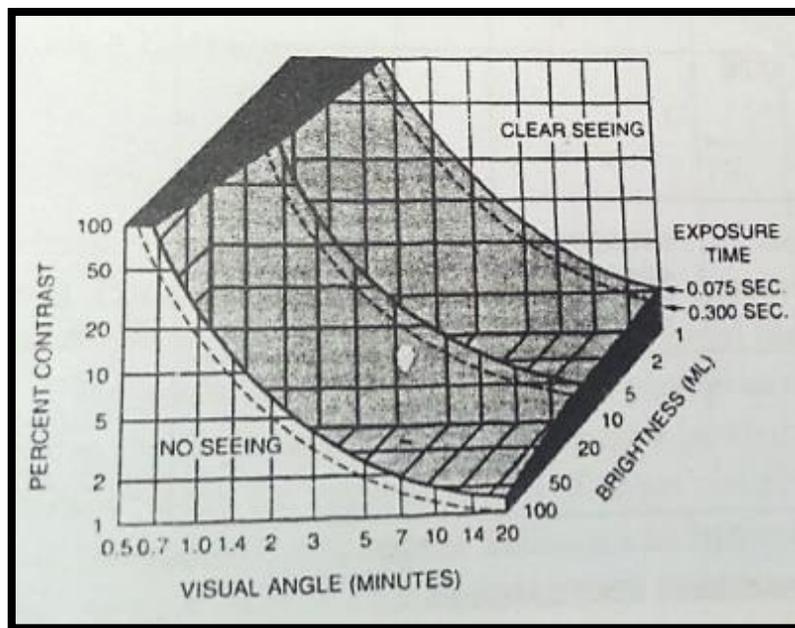


Figura 3-14: grafica para determinar la visibilidad en función del tamaño visual, la luminancia de fondo y el contraste. [7]

Los resultados se muestran en el grafico tridimensional de la figura 3-14, el contraste se trazó contra el tamaño en distintos planos de luminancia, además las líneas punteadas son los resultados para distintos tiempos de exposición. [4]

2.- Modelo de Weston:

El experimento de Weston consistía en detectar lagunas en anillos con diferentes orientaciones como se muestra en la figura 3-15, se pidió a los observadores identificar solo aquellos anillos que tenían una determinada orientación, el tiempo y los errores se iban tabulando, se utilizaron distintos niveles de contraste y distintos tamaños de los espacios (o lagunas), distintas reflectancias e iluminancias.

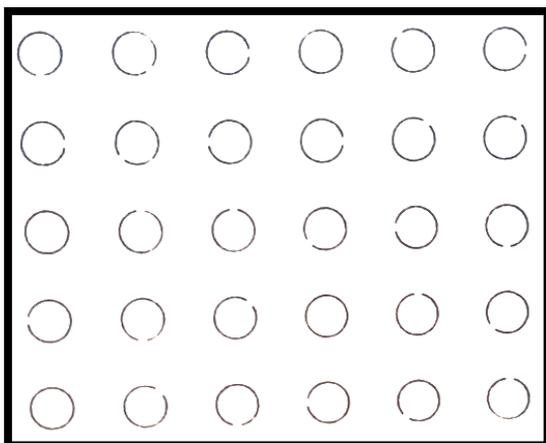


Figura 3-15: experimento de Weston. [7]

Weston preparó curvas en donde se evaluaba el desempeño de cada observador (tiempo de respuesta y cantidad de errores) con distintos niveles de iluminancia, las curvas mostradas en la figura 3-16 son para una reflectancia de fondo de 0.9, se puede ver además que a medida que el contraste disminuye la pendiente aumenta.

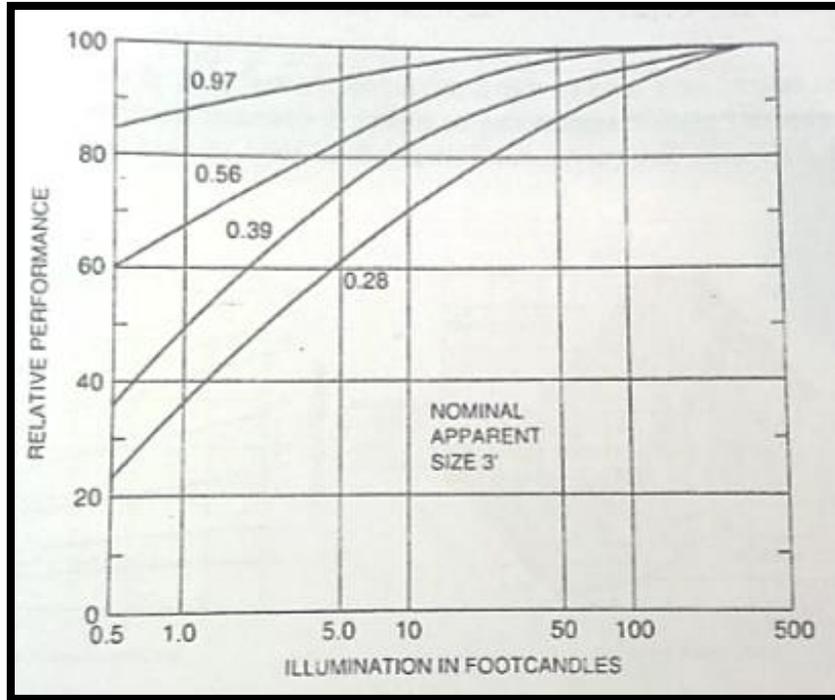


Figura 3-16: Resultados del experimento de Weston. [7]

Existen muchos modelos los cuales son más sofisticados y que relacionan estos 4 factores principalmente pero solo se mencionan con la idea de explicar cómo cada factor puede afectar a los demás empeorando o mejorando la visibilidad de un objeto.

Sobre los factores externos se puede mencionar lo siguiente:

1. Tamaño: al aumentar el tamaño visual aumenta la visibilidad.
2. Tiempo: cuanto mayor sea el tiempo que se tiene, mayor es la probabilidad que se tiene de ver un objeto.
3. Contraste: el aumento del contraste mejora la visibilidad si se tiene un objeto oscuro, y este objeto se hará más visible si el mismo se logra hacer más oscuro o al hacer el fondo más claro.
4. Luminancia: la visibilidad mejora con un aumento de la luminancia.

Adicionalmente a estos 4 factores pueden considerarse también otros como la fatiga, el envejecimiento del ojo, o el efecto flicker (parpadeo) entre otros.

4 El color

4.1 Introduccion.

Las necesidades que tienen los estudiosos del color ha ido creciendo con los años y en las investigaciones realizadas, llegaron a la conclusión de que cada persona percibe los colores de forma diferente en el órgano visual, esto explica la subjetividad de cómo ve el color cada persona. Esta subjetividad ha hecho que el estudio del color se vuelva algo complejo, estos estudios permitieron comprender el cómo los seres humanos pueden ver y permiten crear sistemas más generalizados que ayudan a representar de mejor manera un color, es por esto que se han formulado muchas teorías y experimentos acerca del color y la luz, esto es muy importante ya que son una base de lo que es hoy la ingeniería en iluminación. Toda la base teórica del color se utiliza mundialmente por ingenieros y diseñadores. Por esta razón es que este capítulo en conjunto con el de la visión se consideraron como punto de partida del presente estudio, en este capítulo se espera dar una visión genérica que permita comprender algunos conceptos e ideas generales que puedan resultar necesarios para el presente documento.

4.2 ¿ Que es el color?

El color es una sensación que producen los rayos luminosos (aquellos que están en el espectro visible) en los órganos visuales y que es interpretada en el cerebro. Se trata de un fenómeno físico-químico donde cada color es representado por una longitud de onda de la radiación electromagnética.

Un cuerpo iluminado absorbe parte de la radiación y refleja la restante, dichas ondas son captadas por el ojo y de acuerdo a su longitud de onda son interpretadas por el cerebro, es muy importante recordar que en condiciones de poca luz el ojo ve en blanco y negro.

El color blanco es el resultado de la superposición de todos los colores (colores de luz), el negro, en cambio, se define como la ausencia de color. El color es una percepción en el órgano visual de quien lo contempla. Esta percepción se da gracias a la luz. Se puede ver las cosas y apreciar su color porque estas emiten luz o lo reflejan.

El color es lo que se ve cuando la luz reflejada por un objeto llega a los ojos, todo cuerpo iluminado absorbe una parte de las ondas de luz y refleja las restantes. La percepción del color de un objeto es un proceso altamente dinámico, depende de los colores alrededor de objeto, cuanto tiempo ha sido expuesto el ojo a dicha escena e incluso que es lo que espera ver el observador en cuestión.

Describir lo que se ve es difícil ya que depende del lenguaje utilizado por el observador para poder describir o dar a conocer aquello que está en la mente. [7]

4.3 Tono ,saturación y Luminosidad.

Tono: también llamado matiz, corresponde a la cromaticidad, y es la cualidad de un color por medio de la cual se le puede diferenciar de otros y dar un nombre en particular, es un atributo asociado con la longitud de onda dominante en la mezcla de colores de luz, por ejemplo, verde, naranja, violeta etc. A la izquierda de la figura 4-1 se tienen muestras con un matiz amarillo, en el centro se tiene un matiz naranja y a la derecha se tienen muestras de matiz rojo. [7]

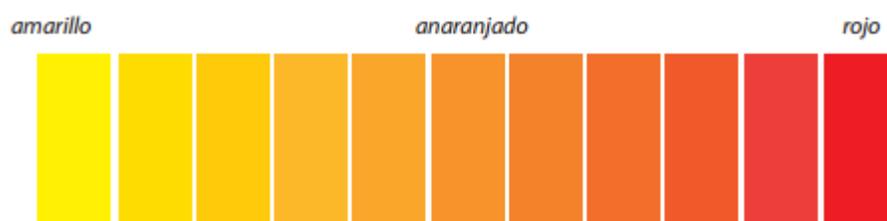


Figura 4-1: Ejemplo en la diferenciación de matices. [13]

Saturación: el cual representa la pureza de un color en particular, y puede relacionarse con el ancho de banda de la luz visualizada, los colores puros del espectro están completamente saturados. Se dice que la saturación de una radiación monocromática es alta, mientras que la saturación producida por la luz solar es baja o nula. [7]

La saturación también está definida por la cantidad de gris que tiene un color, mientras más se acerca al gris, el color será menos saturado. La figura 4-2 muestra niveles de saturación, la zona izquierda es la menos saturada, por el contrario, la zona derecha tiene mayores niveles de saturación.

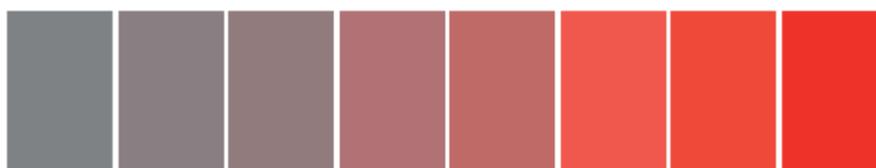


Figura 4-2: ejemplo de niveles de saturación de muestras rojas. [13]

luminosidad: Esta relacionado con la cantidad de luz que emite o refleja una superficie, esta cualidad indica el nivel de “claridad” u “oscuridad” con que se ve un color, en términos de pigmentos, la luminosidad de un color se puede aumentar agregando color blanco y se puede disminuir agregando negro. [13]

Es importante recordar que la saturación, matiz y luminosidad son cantidades psicológicas, estos conceptos se obtienen por pura observación, como no hay un método para medir la sensación de estos conceptos, estos no tienen un significado cuantitativo y se deben diferenciar claramente de cantidades físicas como irradiancia o iluminancia.

El tono y la saturación están muy relacionados con 2 especificaciones que se mencionarán más adelante, estas son la longitud de onda dominante y la pureza colorimétrica. [7]

4.4 Aportes teóricos.

James Clerk Maxwell: físico y matemático escocés, comenzó en 1849 sus estudios acerca del color. Maxwell demostró que cualquier color natural podía ser producido por tres colores primarios, el rojo, verde y azul, además fue el primero en especificar las 3 variables que caracterizan un color: el tono (matiz), tinte y sombra.

Friedrich Ostwald: estudió el color como un fenómeno físico-químico. Elaboro una nueva teoría del color, estableciendo las primeras relaciones sólidas entre los colores básicos y las sensaciones o percepciones del color, propuso que son 4 los colores básicos, el rojo, verde y azul, más el amarillo.

Isaac Newton: newton concluyó que la luz blanca no era luz pura sino luz compuesta, es decir, que en la luz blanca estaban contenidos todos los demás colores. Como se muestra en la figura 4-3, Newton realizó un experimento con un prisma donde la luz incidía directamente en una de las caras de este. El prisma refractaba la luz y los colores que la componen solo que en diferentes direcciones y según su longitud de onda.

Aunque la mayor parte de las observaciones de newton se refieren a la luz de prisma, también efectuó experimentos mezclando polvos de colores: cuando mezcló polvo amarillo con polvo azul obtuvo polvo aparentemente verde, sin embargo, al observarlo con más cuidado se podía determinar que este seguía siendo formado por granos de ambos colores.



Figura 4-3:Newton y la descomposicion de la luz [14]

Thomas Young: físico inglés, postuló la teoría de la visión tricromática, determinó, por investigación que todos los colores del espectro pueden quedar reducidos a tres colores básicos, el verde, el rojo y el azul intenso, tomó entonces 3 linternas y proyectó 3 haces de luz a través de filtros, haciéndolos coincidir en un mismo espacio, los haces verdes, rojo y azul se convertían en luz blanca, a esto se le llama en la actualidad *Aditividad de los colores*. [7]

4.5 Aspectos generales de la colorimetría.

La colorimetría se define como la ciencia de medir el color. Uno de los aspectos generales de la colorimetría es la mezcla y concordancia del color.

Cualquier color puede ser igualado por proporciones apropiadas de colores de 3 componentes. Esto sujeto a las restricciones de que ninguna de estas componentes puede ser emparejada por una combinación de las otras 2 y que en algunos casos puede ser necesario añadir una de las 3 componentes al color que se quiere igualar.

Los colores de los 3 componentes son llamados primarios y se muestran en la figura 4-4, el primero es un sistema aditivo en donde sus primarios más comunes son el rojo, azul y verde. Una combinación adecuada de los 3 primarios genera el blanco. [7]

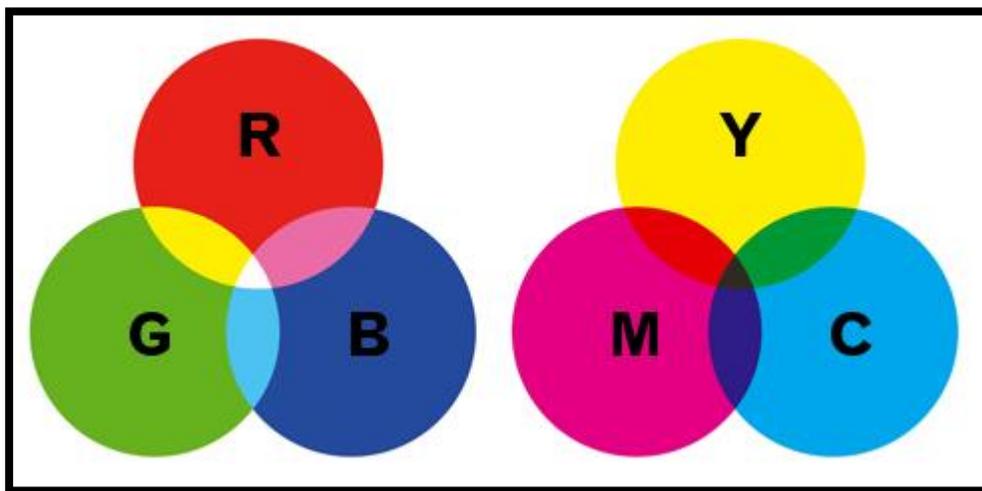


Figura 4-4: Aditividad y sustractividad en la mezcla de colores. [15]

En el sistema sustractivo se utiliza en amarillo, cyan y magenta, una combinación de estos 3 primarios genera el negro.

4.6 Coeficientes tricromáticos.

El estímulo habitual para la sensación del color es la potencia radiante, la cual se especifica por su curva espectral, la cual da los $\frac{\text{watt}}{\text{cm}^2}$ por cada delta o ancho de banda en función de su longitud de onda, la especificación de una radiación dada se puede hacer en términos de 3 cantidades primarias, estos 3 números pueden ser llamados *coeficientes tricromáticos*, al método se le llama comúnmente especificación tricromática.

La curva espectral es la base para la especificación, esta curva representa la potencia radiante de una fuente, la transmitida por un filtro o reflejada por una superficie.

La figura 4-5 muestra la distribución espectral de la luz del medio día, también se muestra la distribución de la misma luz después de haber pasado a través de un vidrio de ámbar. Se sabe que las 2 sensaciones producidas por las radiaciones serán distintas. [3]

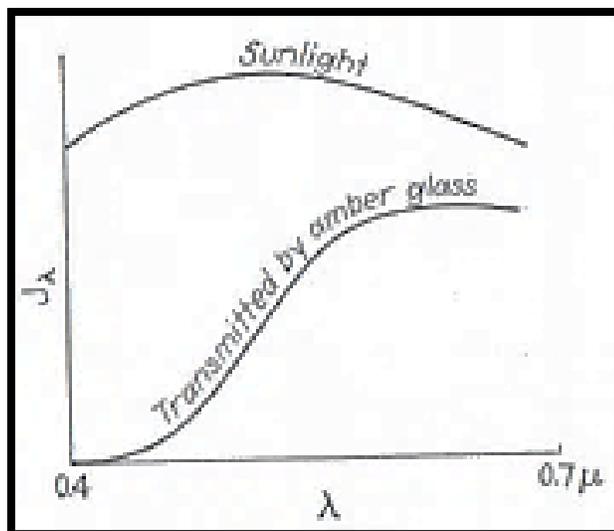


Figura 4-5: Distribución espectral de la luz solar. [3]

La distribución espectral también cambia al reflejarse en una superficie. La figura 4-6 muestra nuevamente la distribución espectral de la luz del sol del mediodía, también se muestra la curva de radiación después de haber sido reflejada desde una cascara de naranja, esta tiene la propiedad de absorber una parte de la energía a longitud de ondas cortas y refleja bien las longitudes de ondas más largas, por lo tanto, la curva de radiación reflejada por la naranja no es muy diferente a la del vidrio.

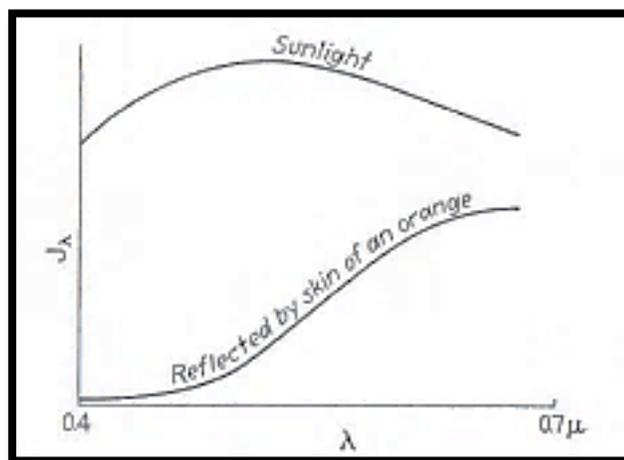


Figura 4-6: Distribución espectral de la luz solar y su reflejo en una superficie naranja. [3]

Viendo las figuras 4-5 y 4-6 puede notarse que la misma sensación puede producir una distribución dada, independiente si esta radiación se produce directamente desde una fuente de luz, si se obtiene por transmisión o por reflejo.

Un estímulo de color está completamente especificado por su curva espectro-radiométrica, sin embargo, la curva propiamente tal dice muy poco acerca de la sensación que producirá. Por ejemplo, puede haber un número infinito de curvas las cuales pueden generar una misma sensación.

Considerando una pared blanca como en la figura 4-7, la cual está siendo irradiada en el campo izquierdo por una radiación cualquiera pero visible, en tanto la pared derecha es irradiada por 3 fuentes que tienen longitud de onda fijas, pero magnitud variable.

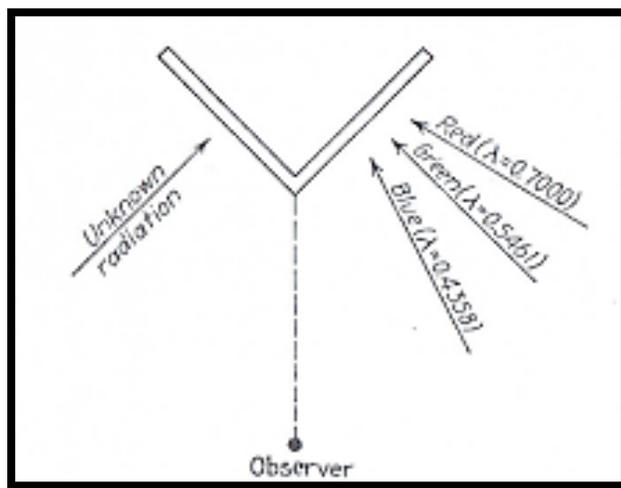


Figura 4-7: diagrama del experimento de emparejamiento de colores [3]

El observador ajusta la potencia de las 3 fuentes de la derecha hasta que los 2 lados parezcan iguales.

La ley fundamental del emparejamiento de los colores, basada en estos experimentos, es que cualquier distribución espectral en el campo izquierdo puede ser igualada perfectamente por el lado derecho sin la necesidad de ajustar más de tres componentes, en algunos casos bastaba un número menor de ajustes, pero tres son siempre suficientes, en algunos casos una o dos componentes se transferían al lado izquierdo para obtener la similitud de los colores.

A estas 3 componentes se les llama a menudo estímulos primarios, o primarias.

Suponiendo que se utilizan colores primarios de longitudes de onda, λ_1 , λ_2 , y λ_3 . Y suponiendo que cuando se logra el emparejamiento con el campo izquierdo, las radiancias del lado derecho son J_1 , J_2 y J_3 ($\frac{\text{watts}}{\text{m}^2\text{sr}}$).

Luego las luminancias de cada componente del lado derecho debido a estas 3 radiaciones son $v_1 \times J_1$, $v_2 \times J_2$, y $v_3 \times J_3$ ($\frac{\text{lumen}}{\text{m}^2\text{sr}}$), en donde v_1 , v_2 y v_3 representan los valores de la función de visibilidad, en las respectivas longitudes de onda de cada fuente primaria, luego la luminancia total de la pared es la suma de las 3 componentes, esto es:

$$L = v_1 J_1 + v_2 J_2 + v_3 J_3$$

Puesto que se logra una concordancia con la pared izquierda, entonces esta tiene el mismo valor de luminancia que la ecuación anterior.

Ya que cualquier estímulo de color puede obtenerse por cantidades adecuadas de estas 3 fuentes primarias, cada radiación puede ser representada por un punto en el espacio tridimensional como se observa en la figura 4-8.

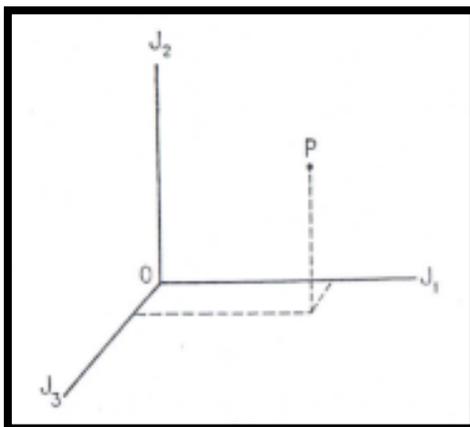


Figura 4-8: representación de un estímulo en términos de sus radiaciones. [3]

En donde J_1, J_2 y J_3 representan las componentes de cada primaria y P es una radiación arbitraria.

A medida que aumenta la magnitud de la radiación arbitraria, el punto P se mueve hacia afuera, lejos del origen, el origen representa la oscuridad, si la calidad del estímulo cambia (cambia su color) pero la magnitud es constante, el punto P se mueve manteniendo su distancia hasta el origen.

Cuando fue necesario cambiar una o dos componentes al campo izquierdo los valores entonces se consideraron negativos y el punto P se desplaza a otro cuadrante. [3]

La pregunta es cómo poder obtener un conjunto de curvas para la correspondencia del color similar a la curva de visibilidad presentada en la figura 2-9 del capítulo 2. El proceso es similar al que se usa para obtener la curva de visibilidad, excepto es que se utilizaron 3 radiaciones en el lado derecho y que se busca una coincidencia exacta, esto es, luminancia y color.

Una radiación de longitud de onda λ es usada en la pared izquierda con una irradiancia constante de un miliwatt por centímetro cuadrado. A la derecha se utilizaron 3 radiaciones de longitud de onda fija y magnitud variable, de $0.700\mu m$, $0.5461\mu m$ y $0.435\mu m$. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4-9.

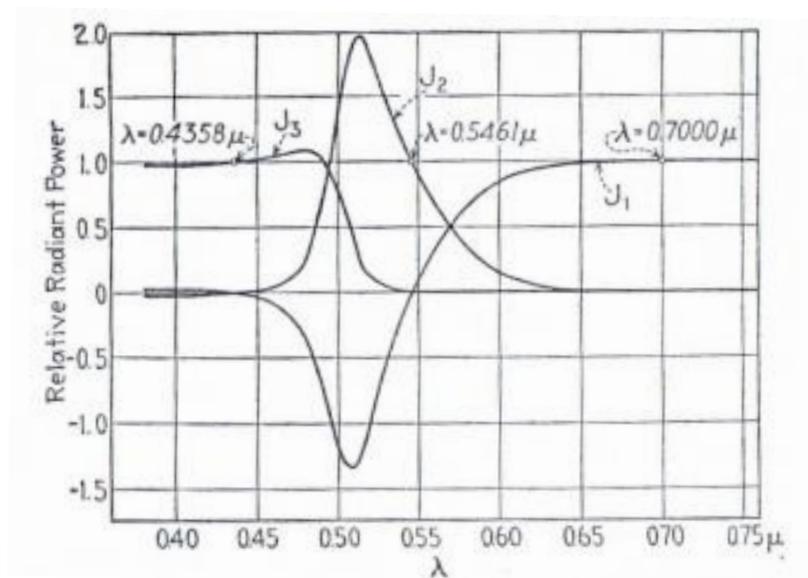


Figura 4-9: Resultados del experimento de concordancia del color (en valores relativos) [3]

Se ve que cuando en el campo izquierdo hay una radiación de $0.4358 \mu m$, en el lado derecho se requiere 0 de rojo, 0 de verde y 1 milliwatts por centímetro cuadrado de irradiancia de azul.

Por lo tanto $J_1 = 0$, $J_2 = 0$ y $J_3 = 1$, como se muestra en la figura 4-9, se obtiene resultados similares a $0.5461 \mu m$ y $0.700 \mu m$, los valores negativos indican que se ha transferido una de las 3 fuentes primarias al lado izquierdo de la pared. Mediante algunas transformaciones o arreglos matemáticos se obtienen los valores de la figura 4-10.

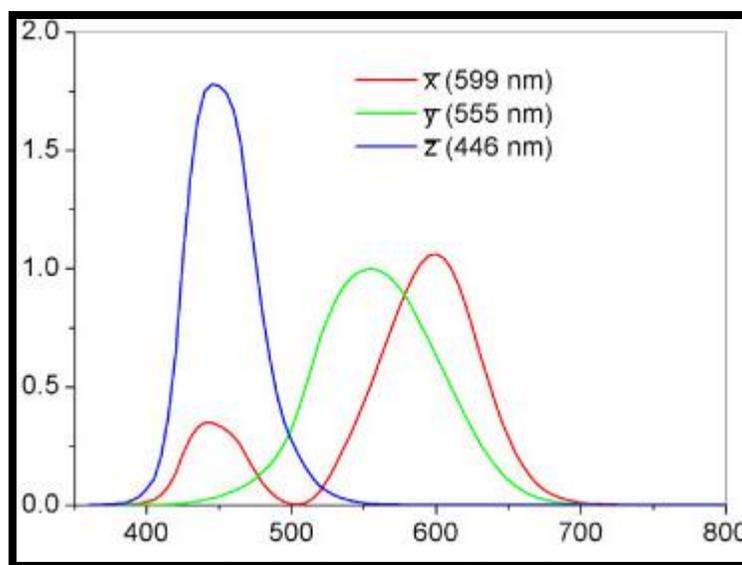


Figura 4-10: coeficientes \bar{x} , \bar{y} y \bar{z} derivados de la figura 4-8. [16]

Las ordenadas de la figura 4-10 son designadas por \bar{x} , \bar{y} y \bar{z} . Lo que destaca de estas nuevas curvas es que los valores negativos de \bar{x} desaparecen, además la curva \bar{y} corresponde a la curva de visibilidad estándar (para visión fotópica) que se mencionó el capítulo anterior.

Se puede especificar una determinada radiación leyendo los valores apropiados de la figura 4-7 y multiplicando cada valor por los watts por centímetro cuadrado de irradiancia que se requieren en el campo izquierdo en su correspondiente longitud de onda. Para espectros continuos, se requiere otro grupo de ecuaciones:

$$\acute{x} = \int \bar{x} J_{\lambda} d\lambda$$

$$\acute{y} = \int \bar{y} J_{\lambda} d\lambda$$

$$\acute{z} = \int \bar{z} J_{\lambda} d\lambda$$

Donde J_{λ} es la función de irradiancia del espectro continuo.

Estas ecuaciones determinan 3 valores los cuales son llamados, *coeficientes tricromáticos*. Es importante destacar que la curva \bar{y} es igual a la curva de visibilidad, luego, la segunda integral está relacionada con el nivel de luminosidad.

Los coeficientes tricromáticos se pueden representar en un sistema de 3 coordenadas, pero una representación bidimensional es mucho más conveniente, aunque por supuesto no puede dar toda la información que con 3 coordenadas.

Los coeficientes tricromáticos se expresan en términos de su suma, definiéndose los siguientes coeficientes o coordenadas tricromáticas:

$$x = \frac{\acute{x}}{\acute{x} + \acute{y} + \acute{z}}$$

$$y = \frac{\acute{y}}{\acute{x} + \acute{y} + \acute{z}}$$

$$z = \frac{\acute{z}}{\acute{x} + \acute{y} + \acute{z}}$$

Por lo que,

$$x + y + z = 1$$

De las cuales se utilizan x e y para representarlos en coordenadas rectangulares, donde cada radiación en particular se simboliza por un punto, como se muestra en la figura 4-11.

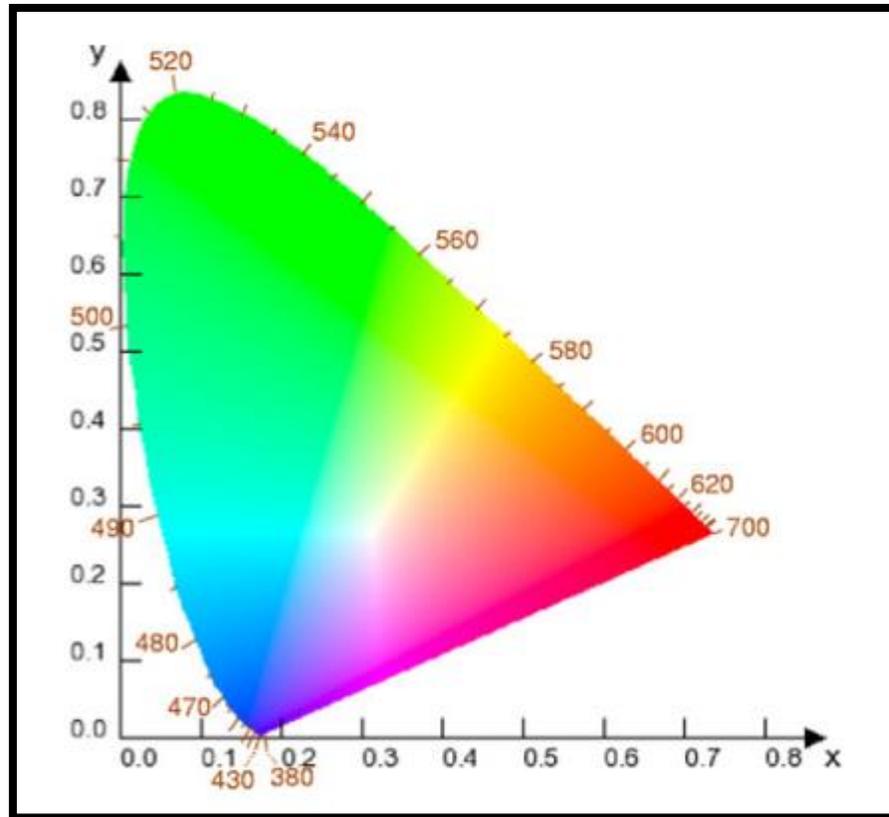


Figura 4-11: diagrama de especificación del color. [16]

El punto superior del triángulo representa 100% de verde, la esquina derecha es 100% rojo y la esquina inferior izquierda es 100% azul.

Las porciones exteriores al triángulo no tienen significado físico y están presentes solamente a causa de las 3 fuentes primarias que no pueden obtenerse en la realidad, pero se utilizan para eliminar los valores negativos de las gráficas.

Una aplicación interesante del método tricromático de especificación del color es la determinación en el triángulo de un radiador planckiano a diversas temperaturas. Como se ve en la figura 4-12, a 2000 K, la luz de un radiador, aunque no es naranja saturado, estaría distintivamente en la zona naranja del triángulo, a medida que se eleva la temperatura del radiador, el color se acerca a blanco y por encima de los 6000 K se vuelve azulado como la luz de algunas estrellas.

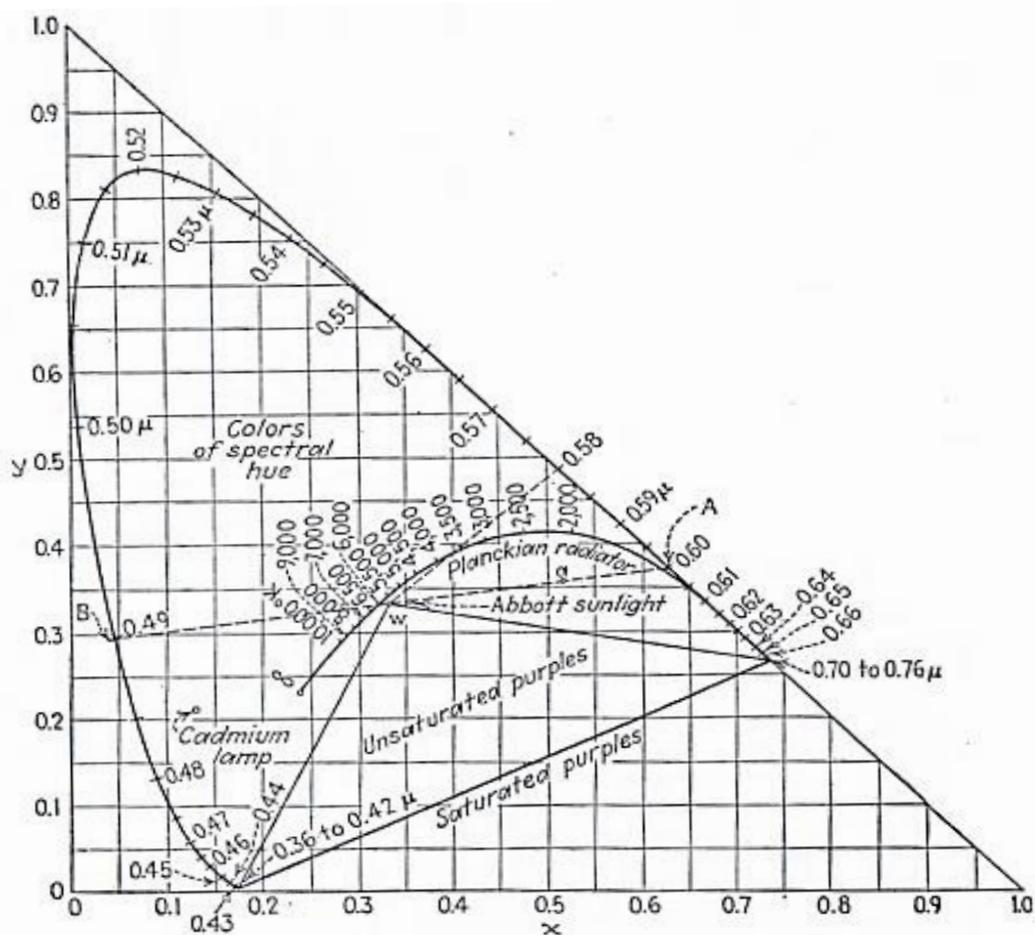


Figura 4-12: Diagrama especificación del color con detalles de temperatura color. [3]

4.7 Fotorreceptores.

Son neuronas especializadas para detectar la luz. Hay dos tipos principales de foto-receptores en la mayoría de los ojos de los vertebrados, bastones y conos. Los bastones son muy sensibles pero lentos y su respuesta se satura a niveles de luz donde los conos funcionan óptimamente. Los bastones no se utilizan mucho en la sociedad moderna donde la iluminación artificial está adecuada para la visión del cono principalmente.

Mientras que los conos son menos sensibles, pero son rápidos en su respuesta a los cambios de luz y pueden adaptarse a entornos muy luminosos, siendo difíciles de saturar.

Detectar objetos sólo por la energía reflejada de sus superficies puede fallar cuando los objetos reflejan una cantidad similar de energía como su fondo. Aquí es donde la visión del color se convierte en importante. El contraste de longitud de onda permite detectar objetos cuando el contraste de energía es ausente o mínimo. Un objeto puede reflejar la misma energía, pero rara vez refleja la misma

composición de longitud de onda que su fondo. La visión del color combina la energía y los contrastes de longitud de onda para detectar objetos.

Para detectar objetos por diferencias en la reflectancia espectral, se necesitan dos o más tipos diferentes de conos. Este es un concepto importante para entender la visión del color. [17]

4.8 Vision de 3 conos.

En la Figura 5 -1, se ve que un sistema de visión de color de 2 conos puede detectar contrastes espectrales que reflejan más en un extremo que en el otro extremo del espectro; estas reflectancias tienden a inclinar el espectro solar.

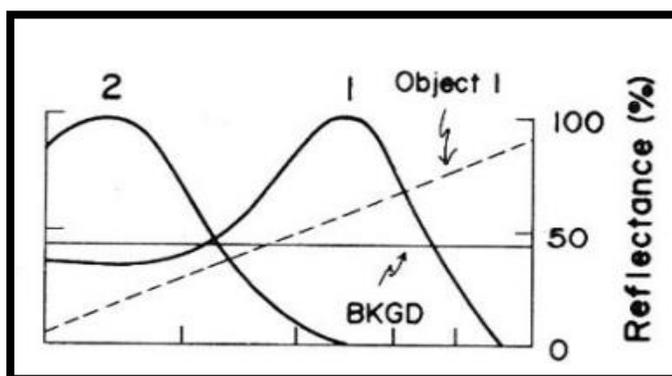


Figura 4-13: Sistema de visión de 2 conos. [17]

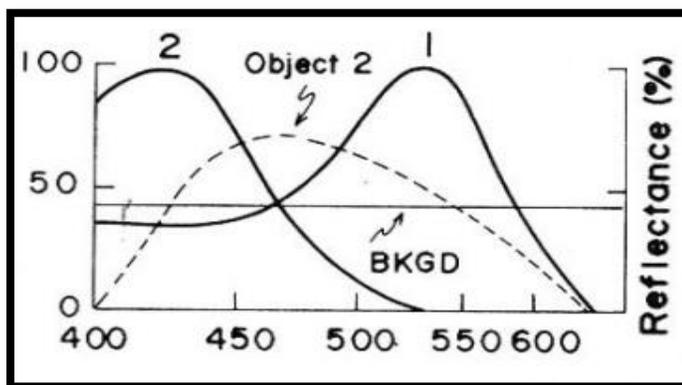


Figura 4-14: Sistema de visión de 2 conos. [17]

Sin embargo, si una superficie se refleja menos de ambos lados del espectro visible, es decir, doblando el espectro solar como la figura 5-2, podría ser invisible para un sistema divisor porque ambos tipos de conos podrían absorber la misma cantidad de luz del objeto y su fondo. Un sistema de 3 conos es capaz de adaptarse a este tipo de tareas, ya que es imposible que los tres conos absorban la misma cantidad

de luz del objeto y su fondo (ver figura 5-3). Superficies reflectantes más complejas pueden confundir incluso un sistema de 3 conos, pero son muy raras en el mundo natural. [17]

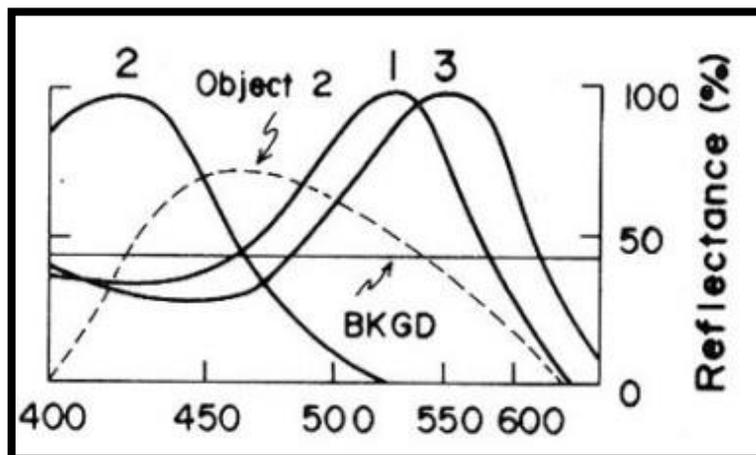


Figura 4-15: sistema de visión de 3 conos. [17]

El cambio de 2 conos a 3, divide la región amarilla del espectro original y crea dos nuevas percepciones cromáticas, el rojo y verde como se ve en la figura 5-4. Es de notar que un aumento en la absorción de este nuevo pigmento de cono L también proporciona una influencia en la región de longitud de onda corta del espectro.

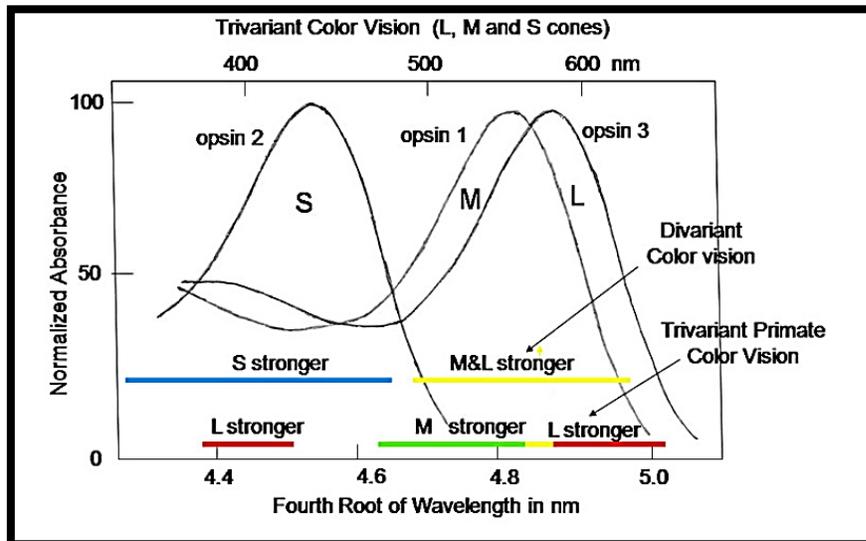


Figura 4-16: Es bien sabido que las longitudes de onda cortas pueden producir una sensación rojiza que hace que el azul aparezca violeta. Este efecto parece surgir del nuevo cono L el cual se hace más sensible a la luz que M en esta región del espectro. [17]

Un sistema trivariante facilita la distinción de objetos rojos y verdes que permanecerían indistinguibles para un observador divariante. La visión trivariante del color distingue el rojo del verde, ampliando el

repertorio de colores. La evolución de la visión de los colores trivariante en los primates superiores aumentó el repertorio de colores que percibimos y el poder del contraste espectral para detectar objetos. La forma original azul – amarilla de la visión de color fue acompañada ahora por un sistema paralelo de colores rojo-verde. [17]

4.9 sensibilidad del sistema trivariante o tricromático.

El procesamiento de la visión del color en el sistema visual de los primates se inicia mediante la absorción de la luz por tres clases espectrales diferentes de conos. Consecuentemente, la visión del color se describe como trivariante o tricromática, y los estudios psicofísicos iniciales demostraron que los colores pueden ser igualados por el uso de tres primarias diferentes. En 1802, Thomas Young propuso un modelo que la percepción del color puede ser codificado por tres receptores principales del color.

La sensibilidad espectral de los conos se puede determinar a través de varios métodos. La técnica del *micro-espectrómetro* consiste en aislar un solo cono y pasar luz a través de él. El cambio en la transmisión de diferentes longitudes de onda se puede utilizar para calcular la absorción espectral del cono o determinar el cambio en la respuesta eléctrica. La *densitometría* de reflexión implica dirigir la luz en la retina y determinar el cambio en la absorción en función de la longitud de onda. Estos resultados se utilizan posteriormente para calcular la absorción espectral de cada cono. [18]

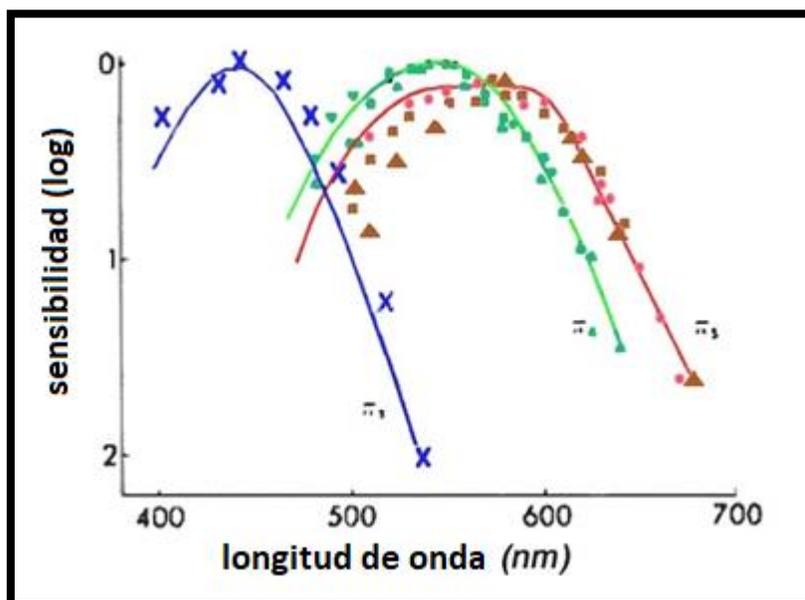


Figura 4-17: Sensibilidad espectral del cono S, del cono M y del cono L. Los resultados combinados de diversos autores utilizando diferentes métodos incluyendo densitometría retinal y micro-espectrometría. [18]

Las tres clases de conos en la retina humana se han aislado con las técnicas anteriormente mencionadas. Estas tres clases de conos son sensibles a la longitud de onda corta (conos S), a la longitud de onda media (conos M) y longitudes de onda largas (conos L), y todas tienen sensibilidades espectrales diferentes y superpuestas. El peak de sensibilidad espectral de conos S se alcanza a aproximadamente 440nm , el peak de los conos M a 545nm y el peak de los conos L a 565nm , esto

Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here.

después de la corrección de la pérdida de luz pre-retiniana, en general las diversas técnicas de medición dan lugar a valores de sensibilidad máximos ligeramente diferentes. [18]

5 La identificación del color.

En el presente capítulo se revisarán 2 estudios en que se trabaja con niveles de iluminación en los cuales ya existe cierta percepción de los colores, pero el nivel de confiabilidad en la identificación no está del todo claro.

Por esta razón se hace necesario una definición del umbral de iluminación por *aquel que pueda asegurar la detección de cierto color por parte de un grupo de personas, con un determinado nivel de confianza.*

Se espera poder establecer ciertos umbrales de iluminación con la idea de utilizarlos correctamente como una ayuda en el diseño de iluminación para ciertas tareas visuales, para poder definir estos umbrales es necesario saber cómo las personas identifican los colores bajo diversos entornos iluminados.

Por esta razón es que se analizaran 2 experimentos con la idea de poder darles una visión práctica y útil en la ingeniería de iluminación.

5.1 Experimento N°1: "Identificación del color a niveles fotópicos hasta mesópicos".

Este experimento de identificación del color, elaborado por el ingeniero Taiichiro Ishida, de la universidad Kyoto en Japón, se realizó identificando superficies de colores que eran presentadas a los observadores en un espacio cerrado y a distintos niveles de iluminación, se les daba la posibilidad de poder usar un conjunto de colores preseleccionados.

Este conjunto fijo de categorías de color utilizadas para nombrar las superficies eran las siguientes: rojo, naranja, amarillo, amarillo verdoso, verde, verde azulado, azul, morado, rosa, marrón, blanco, gris y negro.

Otra forma posible de seleccionar las categorías de color era emplear solo 11 términos de colores básicos, dejando fuera el, amarillo verdoso y el verde azulado. Sin embargo, las observaciones preliminares indicaron que había regiones de color para las cuales a los observadores les resultaba difícil usar cualquiera de los términos de color básicos. Por ejemplo, algunos colores entre las regiones amarilla y verde se nombraron más fácilmente como "amarillo-verde" que como "amarillo" o "verde". Por lo tanto, se decidió agregar "amarillo verdoso" y "azul verdoso" al listado quedando en 13 colores.

Las superficies de color utilizados en el experimento se seleccionaron sistemáticamente a partir de un conjunto de colores del sistema Munsell, a continuación, se presenta una breve explicación del sistema Munsell.

En el sistema de colores de Munsell todos los colores se pueden especificar por completo en términos de matiz, valor y saturación. Estas tres dimensiones corresponden a los tres atributos perceptivos de la visión del color humana, cada muestra puede ser ubicada en un punto específico del sistema el cual se determina por medio de coordenadas cilíndricas.

El tono o matiz está relacionado con la longitud de onda dominante, el tono cambia según la coordenada angular del sistema de coordenadas cilíndricas, el valor está especificado en una escala numérica de 1 (negro) a 10 (blanco), este atributo está relacionado con la reflectancia y la luminosidad de la superficie y se vincula con la coordenada Z de las coordenadas cilíndricas, y el croma en términos de Munsell, corresponde al nivel de saturación de la muestra y está relacionado con la distancia radial entre el origen del sistema y la ubicación de la muestra, Se indica numéricamente en una escala de 0 a varios máximos, dependiendo de la saturación que se puede obtener con los pigmentos disponibles. [18]

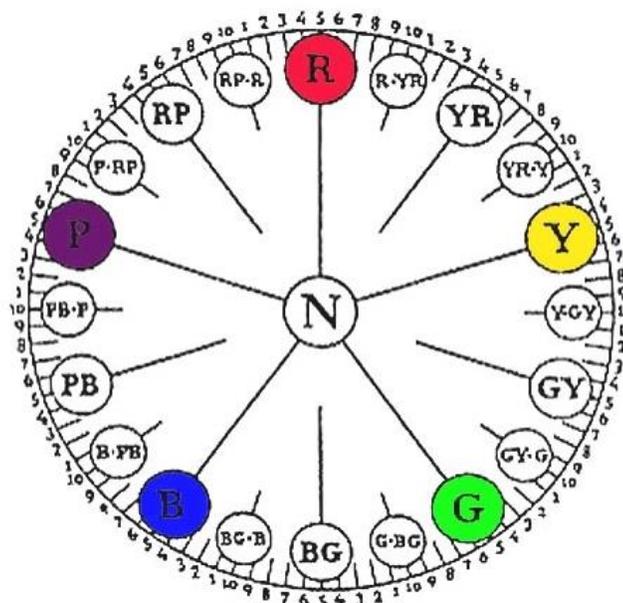


Figura 5-1: Se presenta un ejemplo de los distintos matices que se pueden obtener en la coordenada angular, esto para un valor específico (coordenada Z constante). [18]

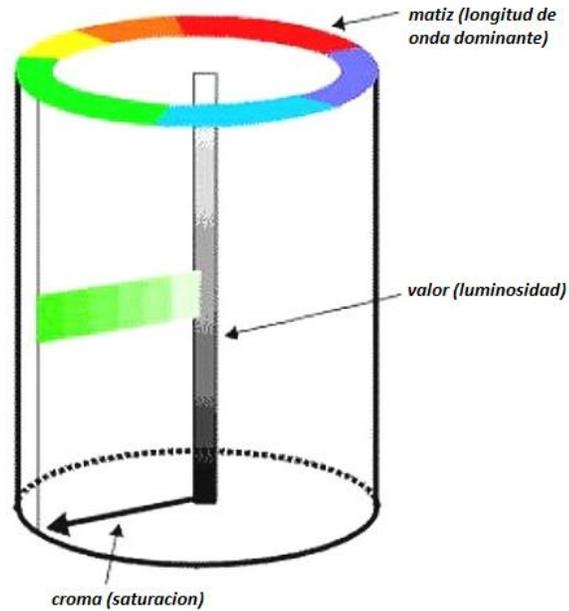


Figura 5-2: Representación esquemática del sistema Munsell. La escala de valores se determina por medio de la coordenada z del sistema de coordenadas cilíndricas, la escala de matices se obtiene por medio de la coordenada angular, y la croma está determinada por la coordenada radial. [18]

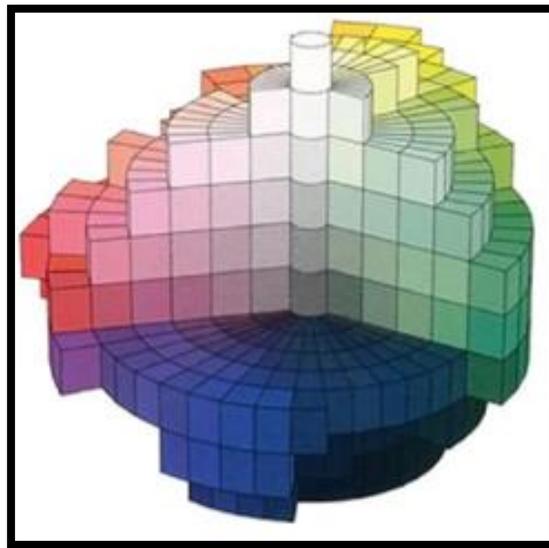


Figura 5-3: Vista tridimensional del sistema Munsell [19]

La selección de los colores del experimento se hizo de la siguiente manera, se eligieron tres niveles de luminosidad también llamado valor, estos niveles fueron, $V= 4, 6$ y 8 , en cada valor se escogieron 20 matices. Además, se eligieron los niveles cromaticidad (saturación) de 2, 6, 10 y 14 para cada uno de los 20 matices, siempre y cuando estén disponibles.

La figura 6-4 presenta otra vista tridimensional con los valores $V=2$ a $V=9$ y la figura 6-5 indica los 3 valores utilizados en el experimento.

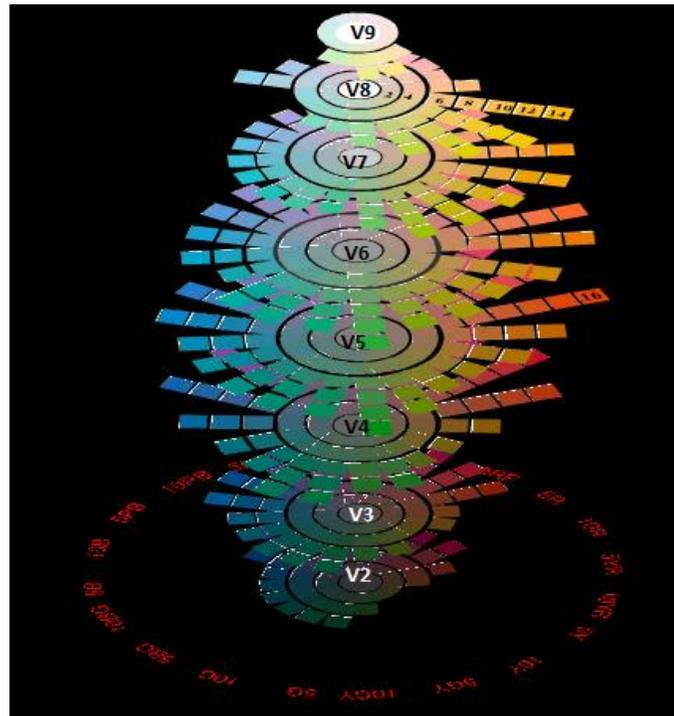


Figura 5-4: vista tridimensional con la escala de valores 2 al 9 [20]

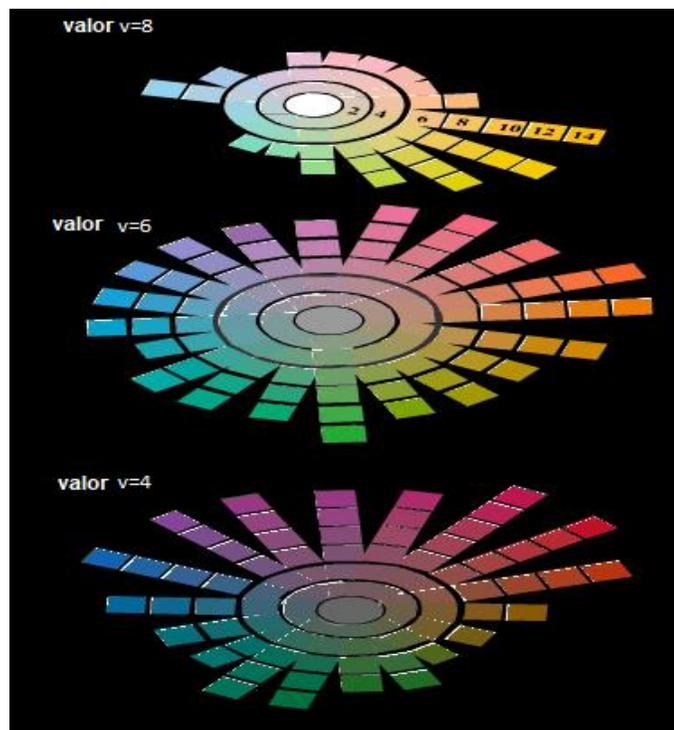


Figura 5-5: vista de los 3 valores de muestras utilizados en el experimento. [20]

La prueba se llevó a cabo en un puesto experimental en el que la iluminancia podía controlarse con precisión. Se colocaban las superficies de color en el centro de una pared y la muestra era vista a través de una abertura a una distancia de aproximadamente 70 cm del observador, como se muestra en la figura 6-6. La abertura de forma cuadrada era de 3cm cada lado.

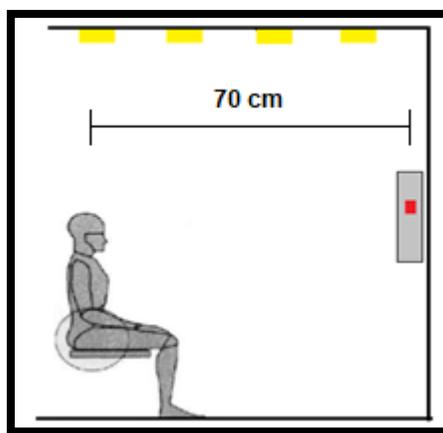


Figura 5-6: diagrama del puesto experimental. [15]

La iluminación se ajustó por medio de 11 lámparas fluorescentes (modelo: FLR40S – N – EDL/M, con un alto índice de reproducción de los colores) para llegar a los niveles de iluminación requeridos, se cambiaba la potencia de las lámparas o se quitaban algunas de las lámparas. Se usaron cuatro niveles de iluminancia, 1000, 10, 1 y 0.1 lux, las lámparas se ubicaron en el techo a una altura de 2.4 metros de altura. [21]

Los niveles de luz con los que se trabaja en este experimento van desde la iluminación producida en un día nublado que corresponden a unos 1000 lux aproximadamente, a niveles de luz utilizados en la iluminación del tránsito peatonal (ver tabla 6-1), esto es importante ya que aquellas conclusiones que se puedan obtener en este documento podrían ser aplicadas en un futuro al alumbrado de calles, finalmente se llega a niveles de luz que se asemejan a condiciones de iluminación producida por la luz de la luna en condiciones particular (ver tabla 6-2), por lo que los resultados obtenidos podrían utilizarse en aquellas tareas específicas en que solo se trabaje con dicha fuente de luz natural, en ejemplo de esto serían operaciones militares.

Tabla 5-1: Iluminancias horizontales exigidas en Chile para el tránsito peatonal [22]

Clase alumbrado	Media (lux)	Mínima puntual (lux)
P1	20	7.5
P2	10	3.0
P3	7.5	1.5

P4	5.0	1.0
P5	3.0	0.6
P6	2.0	0.4

Tabla 5-2: iluminancias horizontales y verticales generadas por la luna llena [8]

Angulo elevación de la luna (°)	Iluminancia horizontal (lux)	Iluminancia vertical (lux)
30	0.101	0.175
40	0.143	0.170
50	0.183	0.154
60	0.219	0.126
70	0.243	-
90	0.267	-

Procedimiento del experimento:

Lo que se hizo fue examinar cómo cambiaba la identificación de los colores vistos inicialmente en una iluminación claramente fotópica (1000 lux) hasta rangos de iluminación mesópica, usando un tamaño de estímulo típico en situaciones prácticas.

Los colores seleccionados se dividieron en cuatro grupos en orden aleatorio; cada grupo consistió en 39 colores. Una sesión experimental consistió en cuatro bloques correspondientes a las cuatro condiciones de iluminancia. Dentro de cada bloque, los colores de uno de los cuatro grupos se presentaron uno a la vez bajo una de las cuatro iluminancias. Los sujetos recibieron instrucciones antes del experimento; su tarea era dar un nombre de color a cada superficie mediante el uso de uno de los 13 términos de color descritos anteriormente. Además, el tiempo de respuesta fue medido por un experimentador. No se impuso límite de tiempo.

Los sujetos se adaptaban a la iluminancia del siguiente bloque durante 5 minutos antes de comenzar los ensayos. Quince personas (7 hombres, 8 mujeres) participaron en el experimento. Los sujetos tenían edades comprendidas entre 22 y 36 años. [21]

Resultados:

Las figuras 6-11 a 6-22 muestran los resultados de la identificación del color para las muestras de color del valor $V=4$, $V=6$ y $V=8$, cada figura corresponde a un nivel de iluminancia. Cada símbolo denota una superficie de color probada en el experimento, los resultados de todos los sujetos se promediaron en las figuras, se proporciona cuatro tipos de información en cada panel:

1.- Cada símbolo tiene una abreviatura para un término de color, que significa el término de color que se responde con más frecuencia para esa muestra de color. Por ejemplo, un símbolo de R indica que la muestra se identificó mayormente como "rojo". Los símbolos utilizados son: R=rojo; O=naranja; Y=amarillo; YG= amarillo-verdoso; G=verde; BG=azul-verdoso; P=púrpura; Pk=rosa; Bn=marrón; W=blanco; N=gris; Bk= negro.

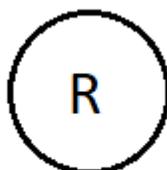


Figura 5-7: Ejemplo de muestra con respuestas de mayor frecuencia roja (elaboración propia).

2.- Si un símbolo se llena con el color identificado, significa que la identificación fue consistente en más del 50% de todos los ensayos.

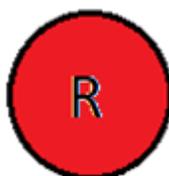


Figura 5-8: Ejemplo de muestra con más de un 50% de respuestas coincidentes roja (elaboración propia).

3.- En tercer lugar, si un símbolo tiene un borde color blanco, indica que la identificación fue consistente en más del 90% de todos los ensayos.

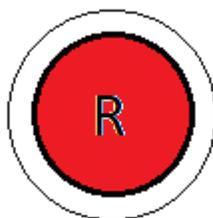


Figura 5-9: Ejemplo de muestra con más de un 90% de respuestas coincidentes roja (elaboración propia).

4.- Si un símbolo tiene un borde negro, indica que el tiempo de respuesta promedio para ese color fue menor a 1.5 segundos.

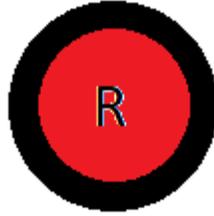


Figura 5-10: Ejemplo de muestra con más de 90% de respuestas coincidentes y nombradas en menos de 1.5 segundos roja (elaboración propia).

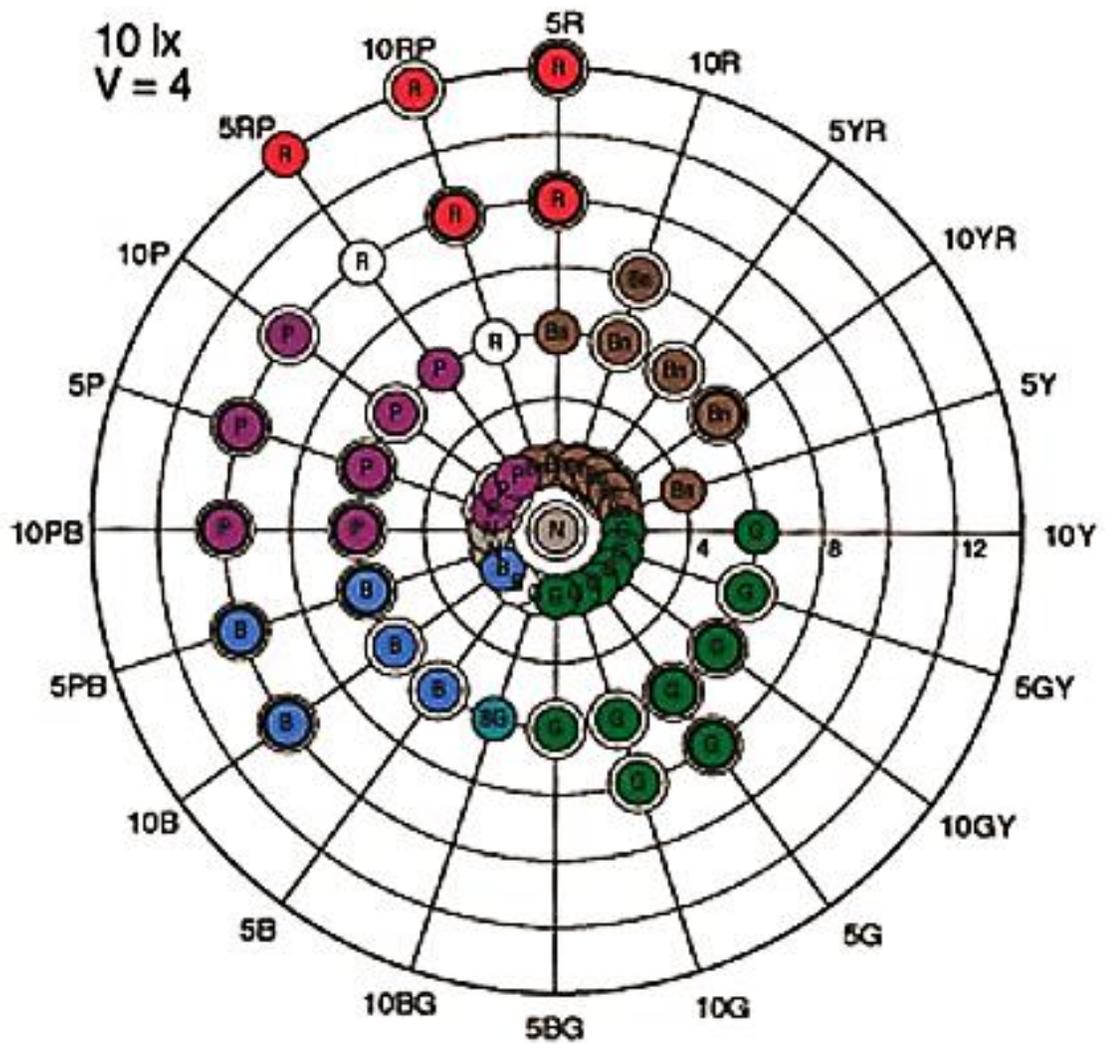


Figura 5-12: resultados para la identificación de las muestras del Valor $v=4$ con iluminancia de 10 lux [21]

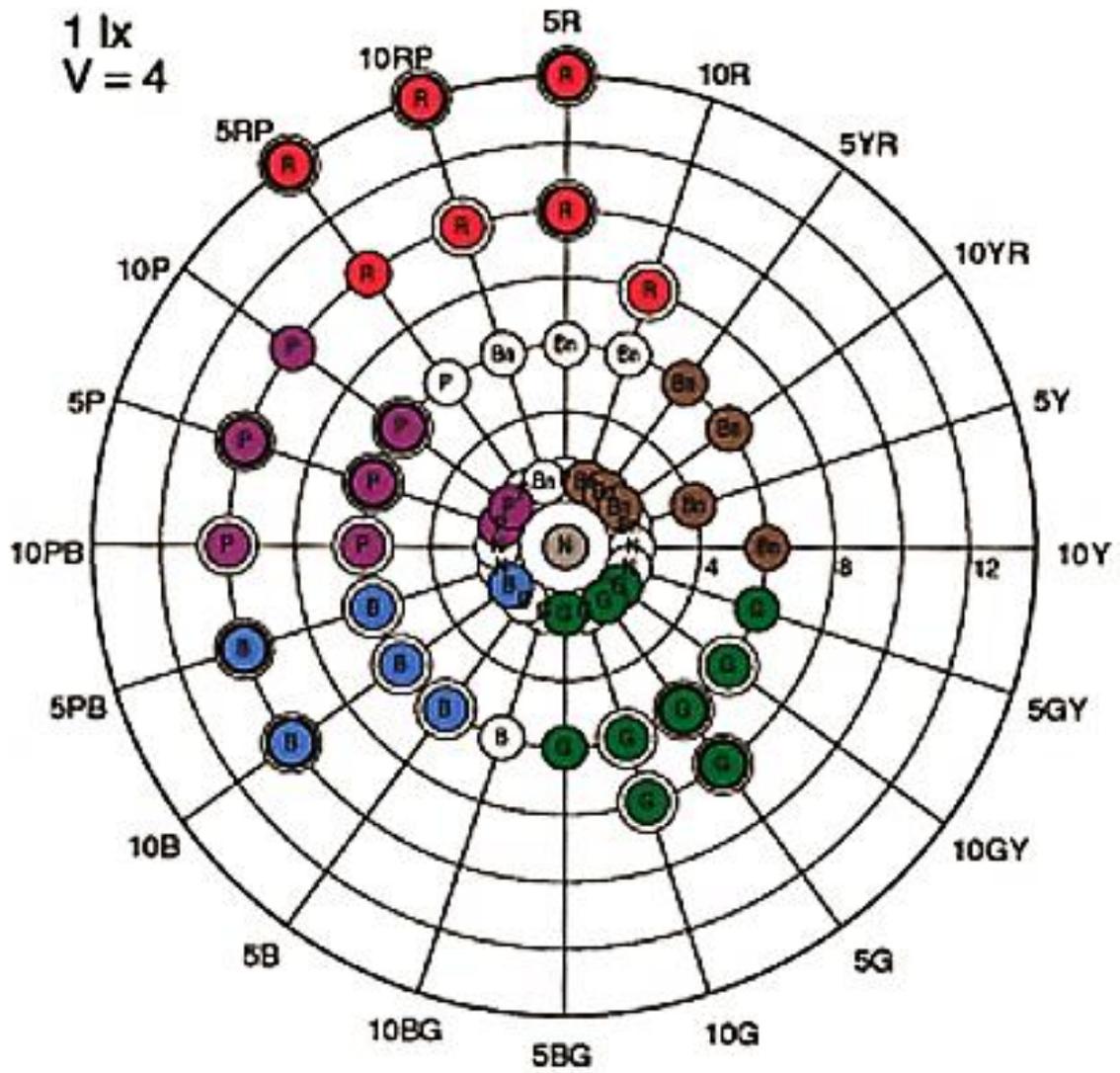


Figura 5-13: resultados para la identificación de las muestras del Valor $v=4$ con iluminancia de 1 lux [21]

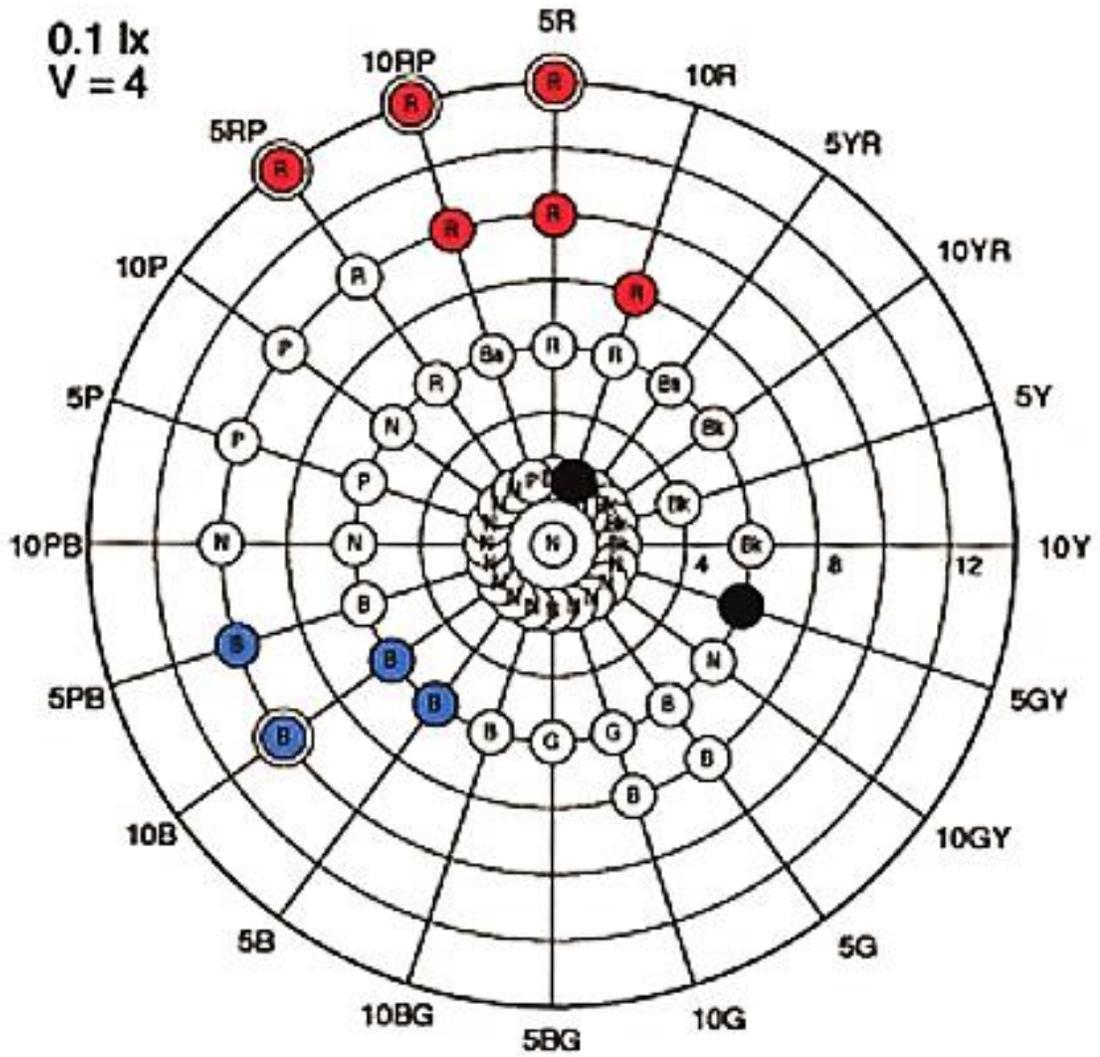


Figura 5-14: resultados para la identificación de las muestras del Valor v=4 con iluminancia de 0.1 lux. [21]

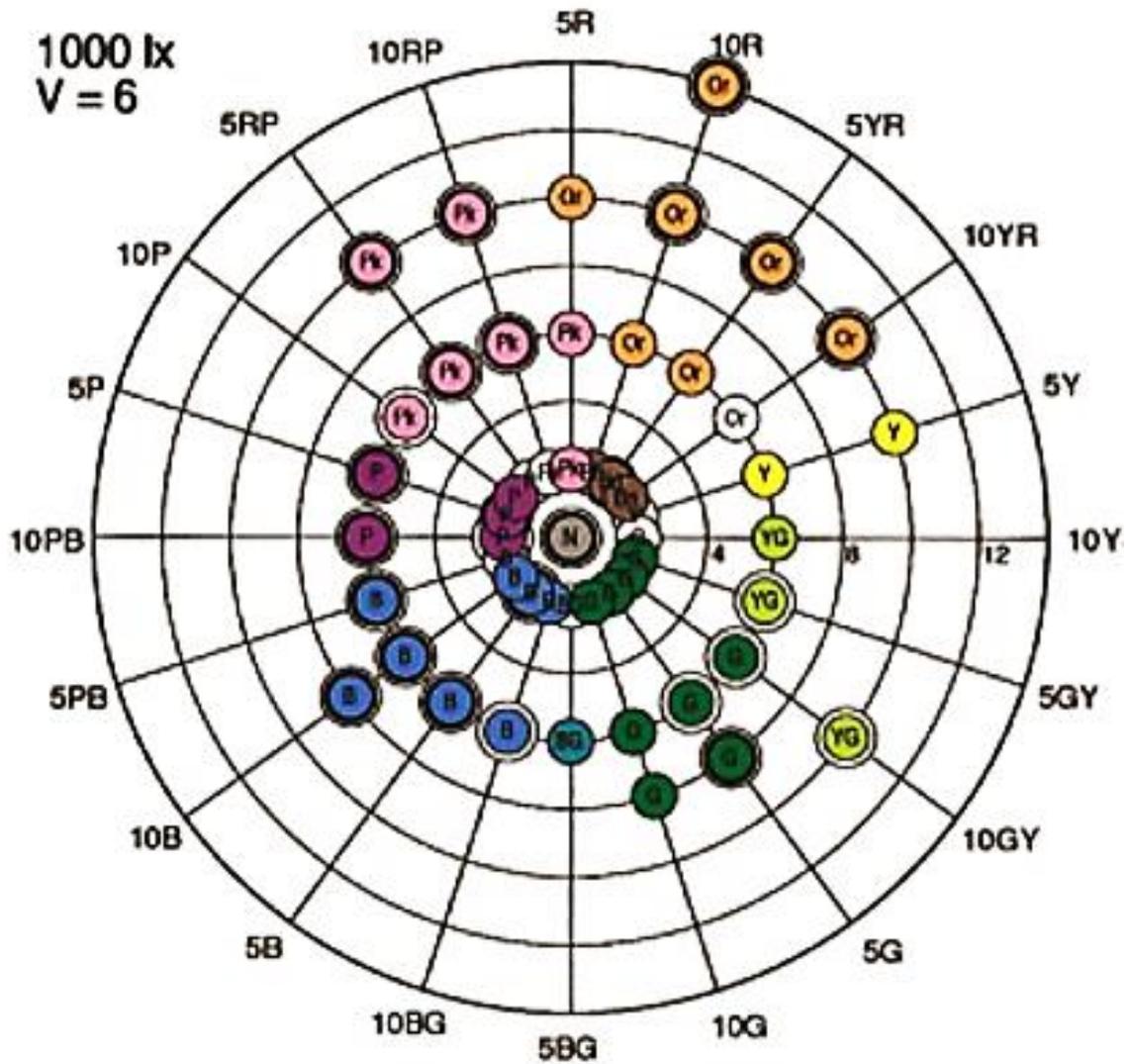


Figura 5-15: Resultado para la identificación de las muestras del Valor $v=6$ con iluminancia de 1000 lux [21]

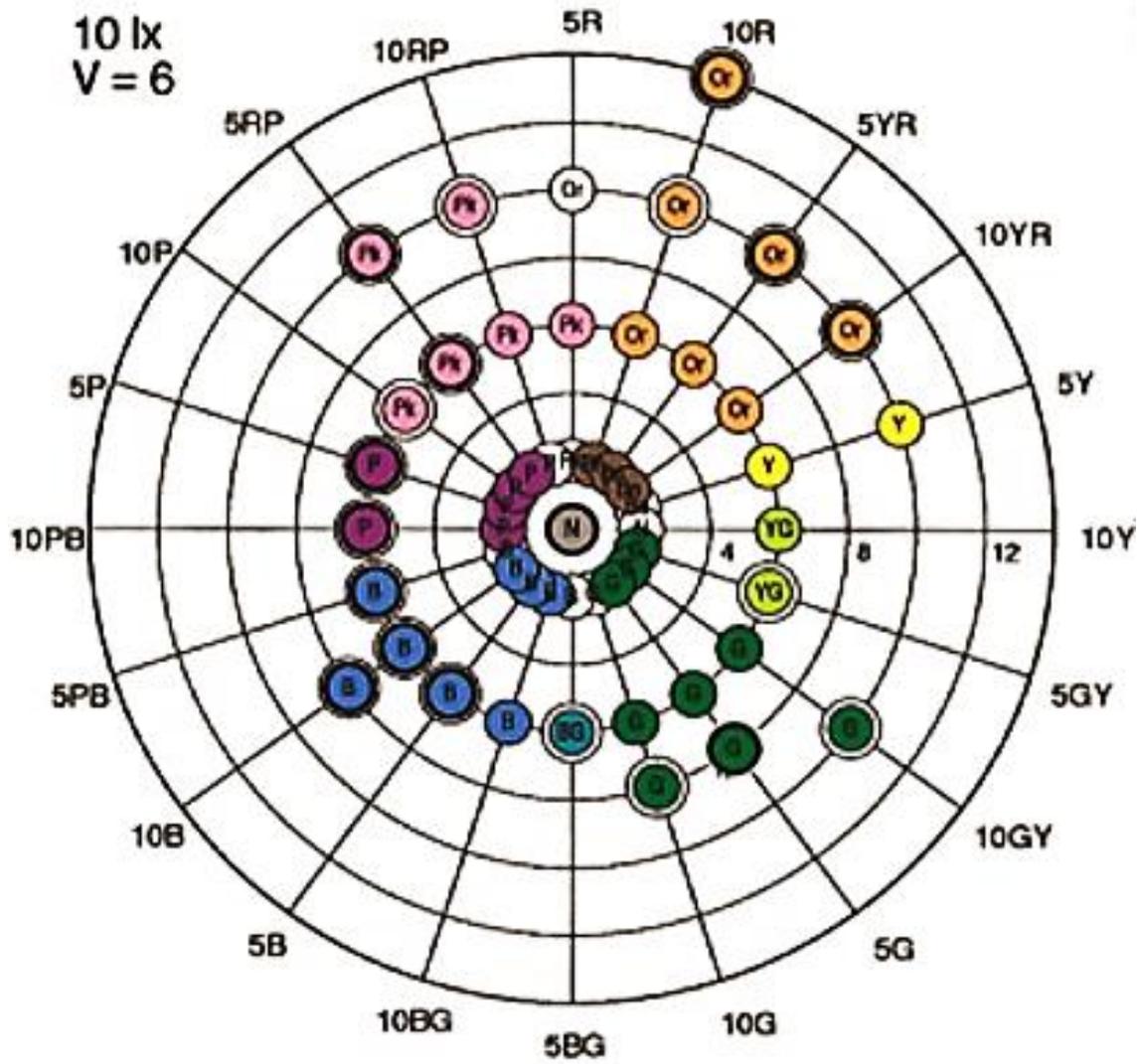


Figura 5-16: Resultado para la identificación de las muestras del Valor $v=6$ con iluminancia de 10 lux [21]

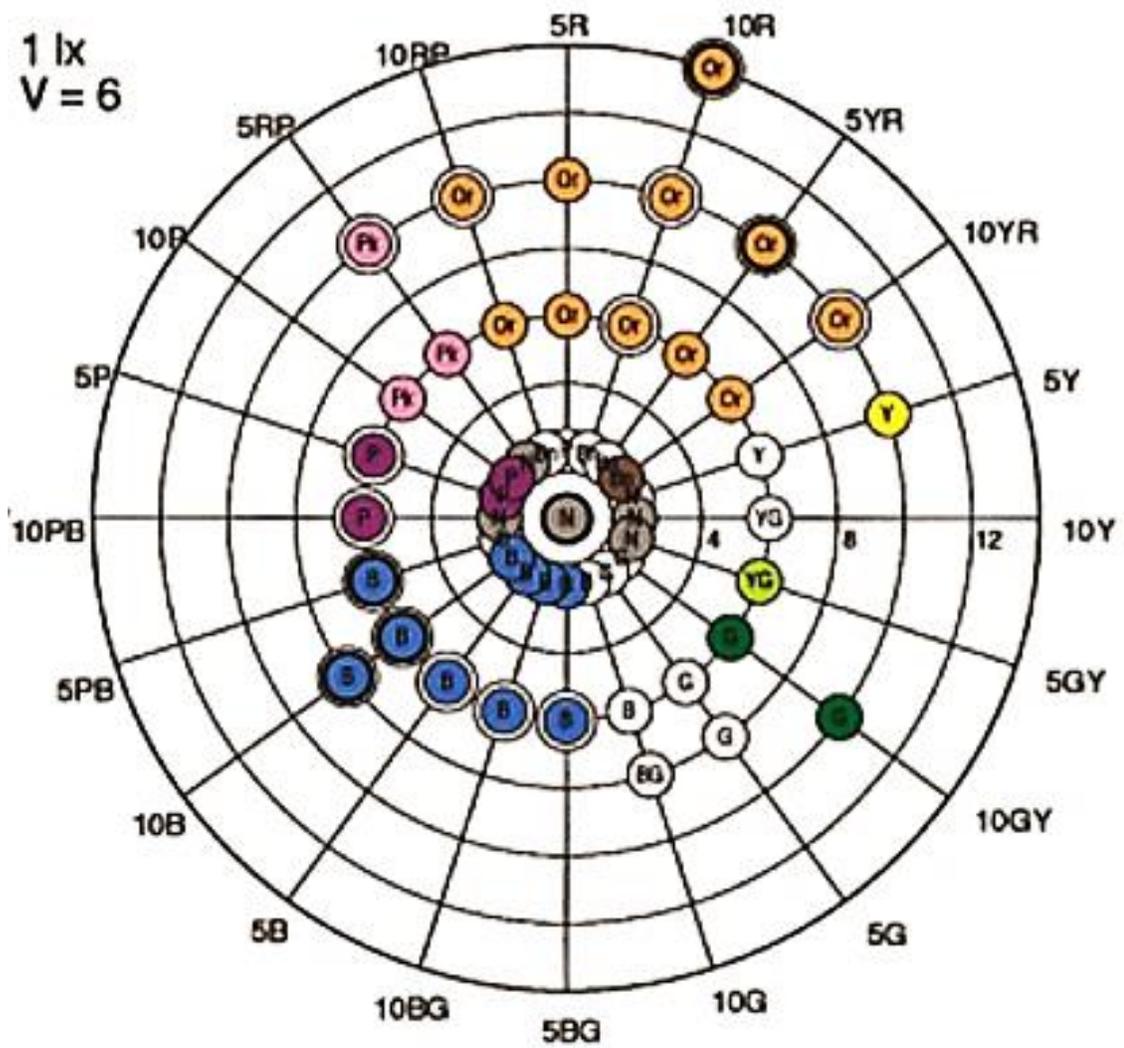


Figura 5-17: Resultado para la identificación de las muestras del Valor $v=6$ con iluminancia de 1 lux [21]

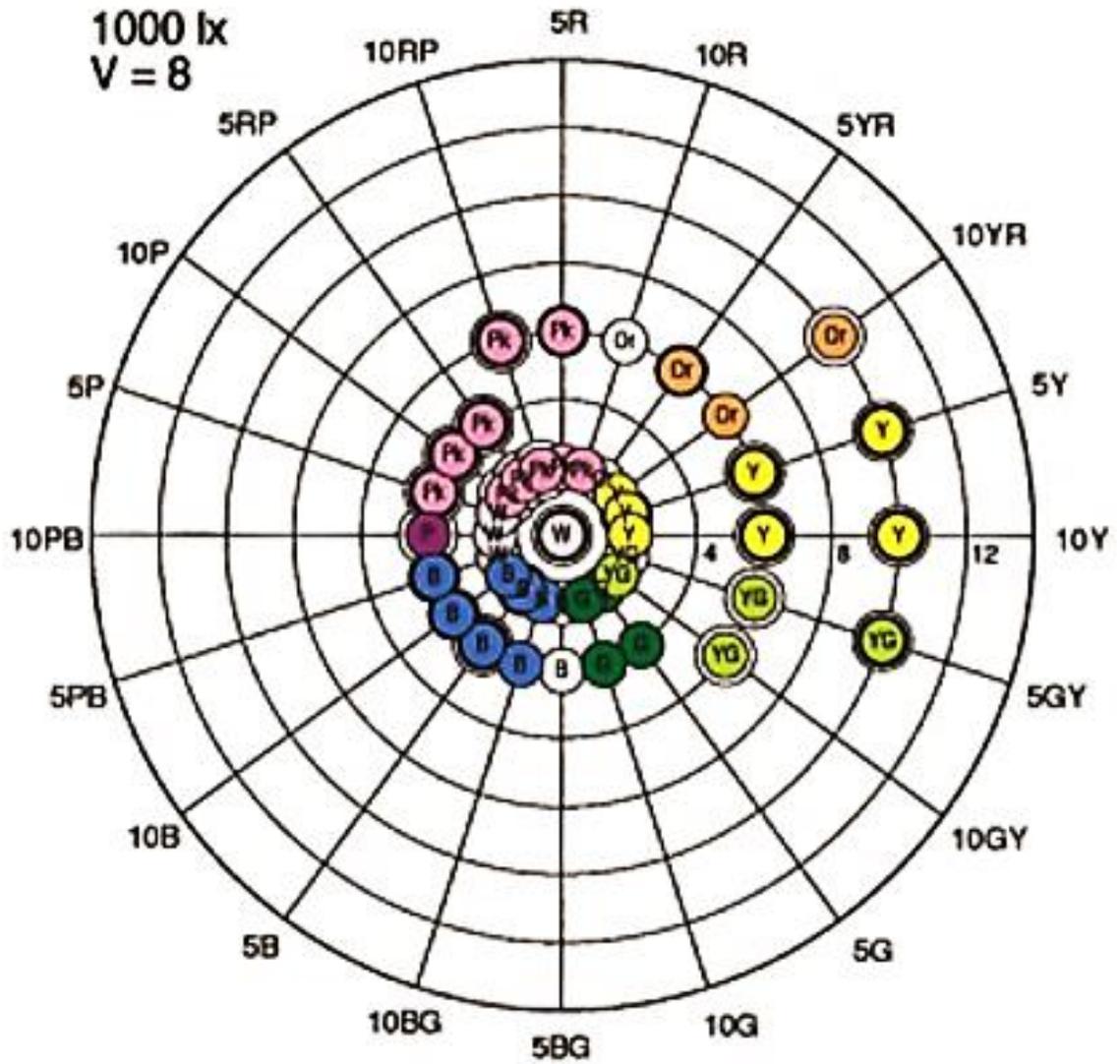


Figura 5-19: Resultado para la identificación de las muestras del Valor $v=8$ con iluminancia de 1000 lux [21]

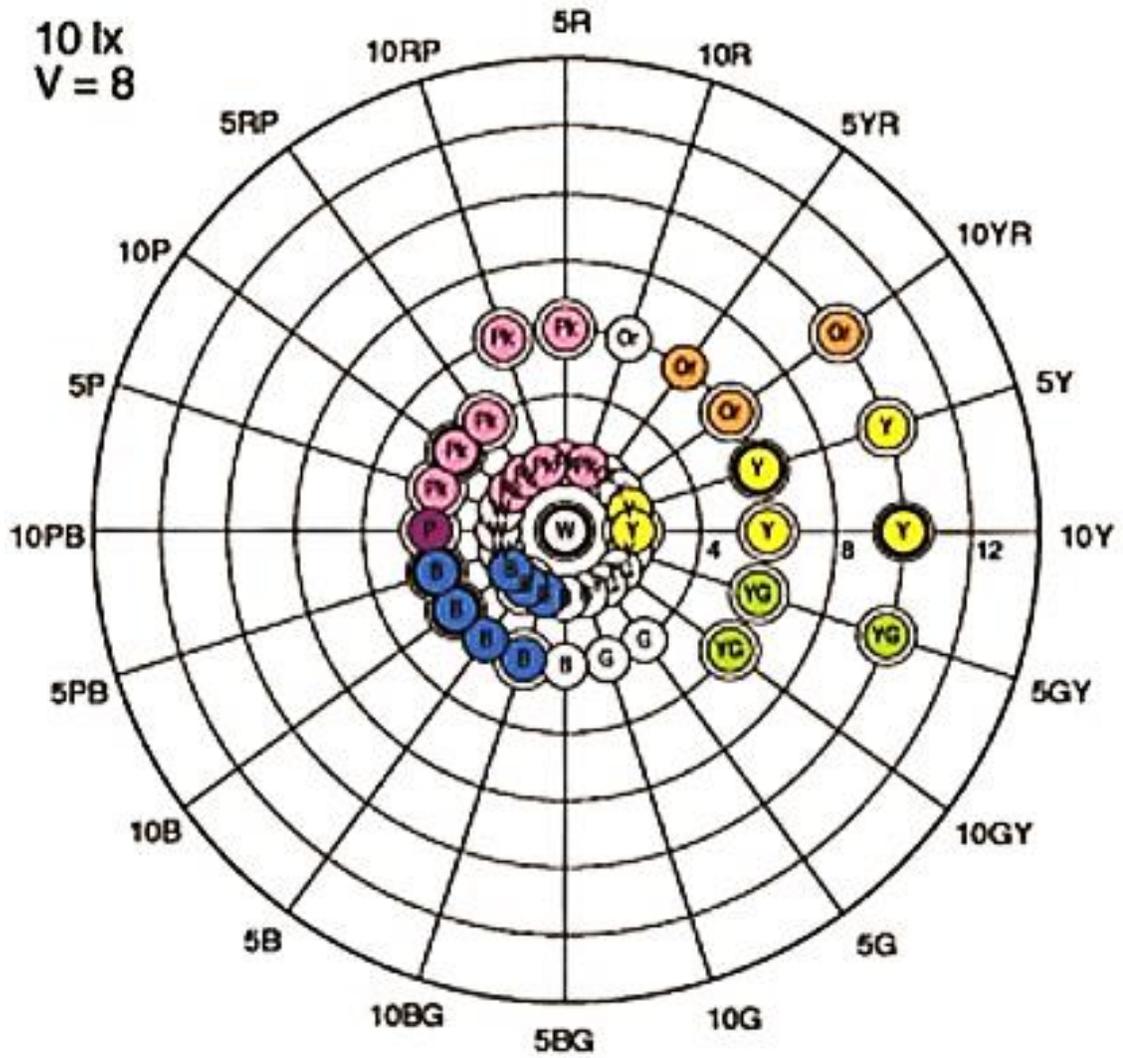


Figura 5-20: Resultado para la identificación de las muestras del Valor v=8 con iluminancia de 10 lux [21]

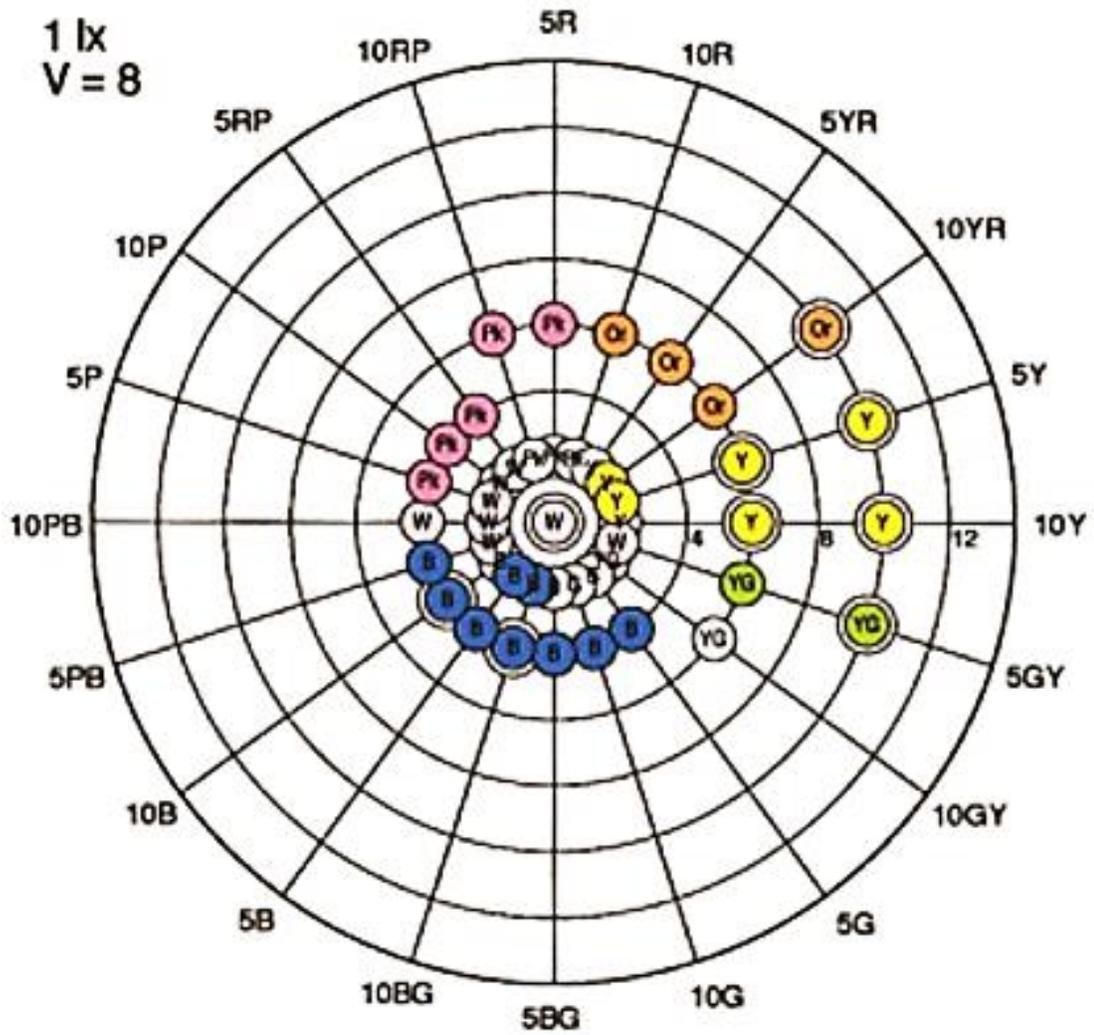


Figura 5-21: Resultado para la identificación de las muestras del Valor $v=8$ con iluminancia de 1 lux [21]

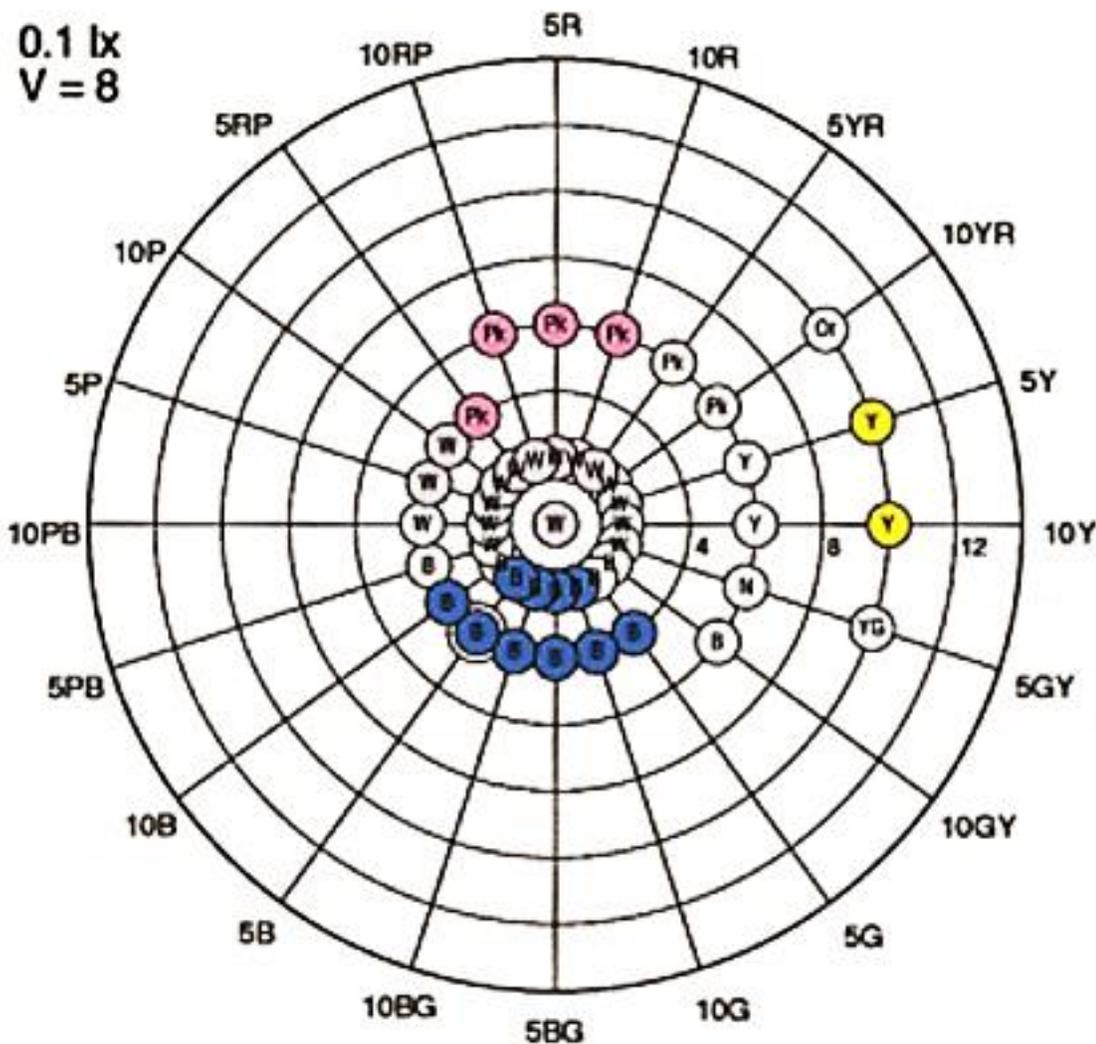


Figura 5-22: Resultado para la identificación de las muestras del Valor $v=8$ con iluminancia de 0.1 lux [21]

En 1000 lux hay distintas regiones que corresponden a cada uno de los términos de color. En el valor de $V = 4$, "rojo", "marrón", "verde", "azul" y "violeta" se usaron consistentemente para nombrar grupos de colores definidos. En el valor de $V=6$, aparecieron respuestas consistentes de "rosa" y "naranja", En el valor de $V = 8$, la respuesta "amarilla" ocupó un área considerable. La región nombrada como "azul" estaba entre 5B y 5PB en cada uno de los 3 valores. El término "Amarillo-verde" se les dio constantemente a algunos chips de color entre el rango amarillo y verde, no se identificó ningún color como "azul verdoso" con más del 90% de consistencia. Además, el borde entre "azul" y "púrpura" es muy marcado, mientras que el de "azul" y "verde" era bastante ambiguo.

La variación en la identificación de los colores entre 1000 lux y 10 lux no fue tan notoria, pero a una iluminancia de 1 lux aparecieron cambios notables en la identificación del color. En general Hubo una disminución en la consistencia de identificación del color, especialmente a menor saturación (anillos interiores de las figuras).

En el valor de $V=4$, "rosa" fue reemplazado por "rojo" y "marrón" ocasionalmente se confundió con "rojo".

En el valor $V=6$, la región "rosa" fue reducida y reemplazada por "naranja". Además, los colores que fueron consistentemente identificados como "verde" o "amarillo-verdoso" casi desaparecieron, y la respuesta "azul" entró en el Región "verde".

Esta tendencia también se vio en el $V= 8$, la identificación "verde" fue reemplazada por "azul". Por otro lado, el límite entre "azul" y "púrpura" fue casi estable de 1000 lx a 1 lx.

En 0.1 lux se pudo ver que los colores ya no se identificaban de manera confiable. prácticamente no se identificó con más de 90% de consistencia. A pesar de la falta de confiabilidad, la respuesta "azul" aún se mantuvo y cubrió la región "verde".

Es interesante que el juicio de "rojo" fue bastante estable en todas las condiciones de iluminancia.

Para ver el patrón de cambios en la identificación del color en detalle, se analizaron las respuestas de los observadores en las 20 muestras del valor $V=6$ y cromaticidad $C=6$.

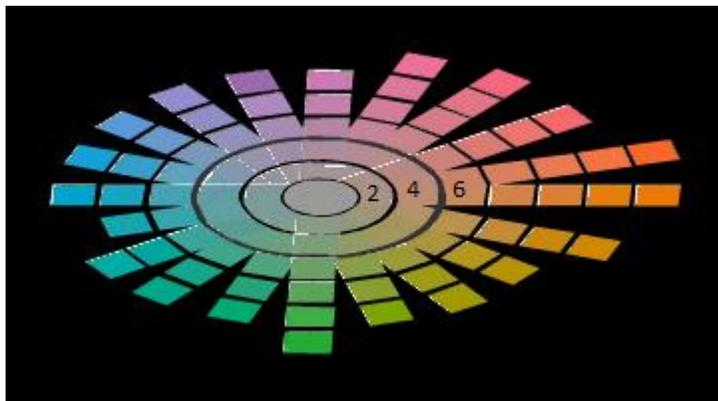


Figura 5-23: vista de las muestras del valor $V=6$ y cromaticidades 2, 4 y 6. [20]

Las funciones de identificación del color extraídas del círculo de tonos de los valores $V = 6$ y $C = 6$ se trazaron en las figuras 6-24 ,6-25 y 6-26:

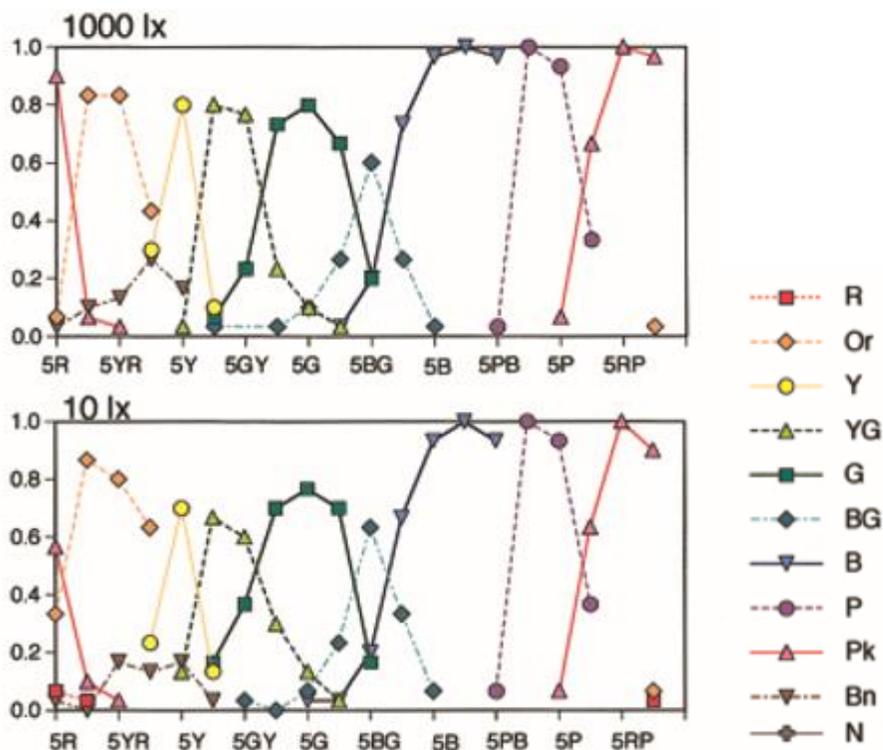


Figura 5-24: variación en las respuestas para las iluminancias 1000 a 10 lux. [21]

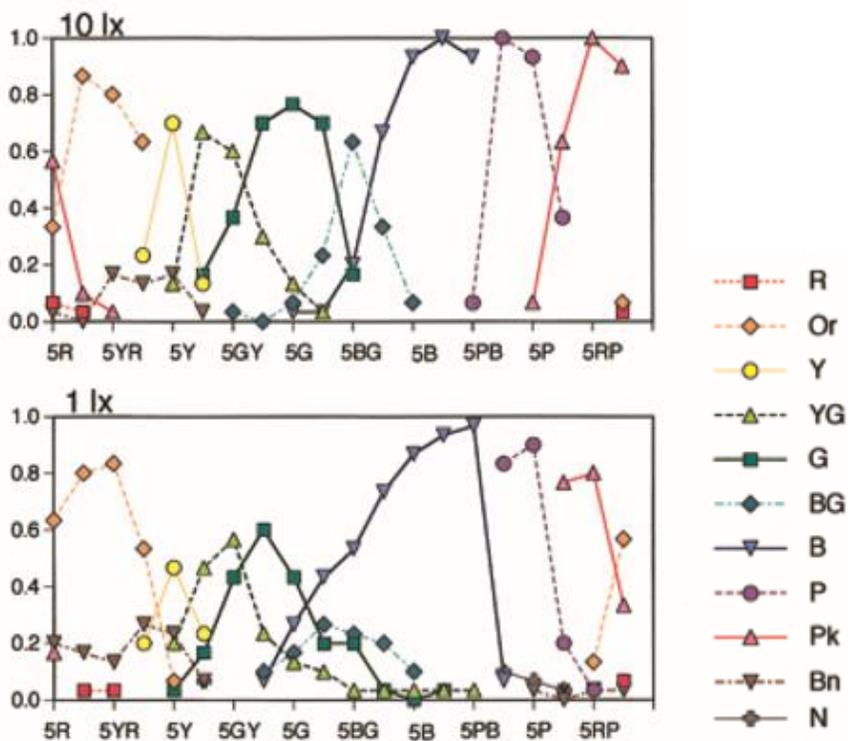


Figura 5-25: variación en las respuestas para las iluminancias 10 a 1 lux. [21]

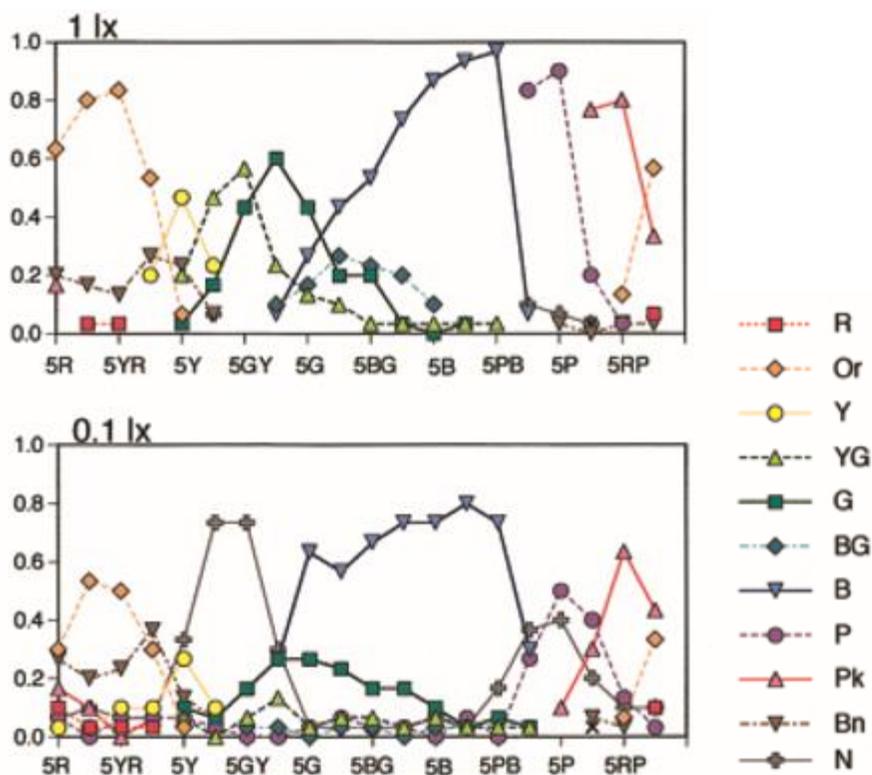


Figura 5-26: variación en las respuestas para las iluminancias 1 a 0.1 lux. [21]

Las funciones indican el porcentaje de ensayos en que cada uno de los 13 términos de color se les dio a las superficies de color a lo largo del círculo $V=6, C=6$.

Los datos se trazan por separado para las 4 condiciones de iluminancia. Se puede ver a partir de los resultados de 1000 lux que los colores se dividieron en varias categorías distintas; hubo pocas superposiciones de las funciones de identificación del color, excepto por "azul-verde". Las funciones de identificación del color a 10 lux fueron bastante similares a las de 1000 lx.

Al bajar aún más la iluminancia, hubo una gran cantidad de cambios en la función de identificación; el "verde" disminuyó rápidamente, y el "azul" avanzó hacia la región "verde". Además, el "naranja" pareció expandirse a la región "roja". Vale la pena señalar que el rango de la "púrpura" apenas cambió con la disminución de las iluminancias.

Por otra parte, las apariencias de los colores que van desde verde a amarillo-verde, casi se neutralizaron a la menor iluminancia. La misma neutralización se produjo para la región púrpura.

libre, y aparecía como se muestra en la Fig. 6-28, El borde oscuro fue provisto para que el observador no tenga que buscar el color de prueba a bajas luminancias.

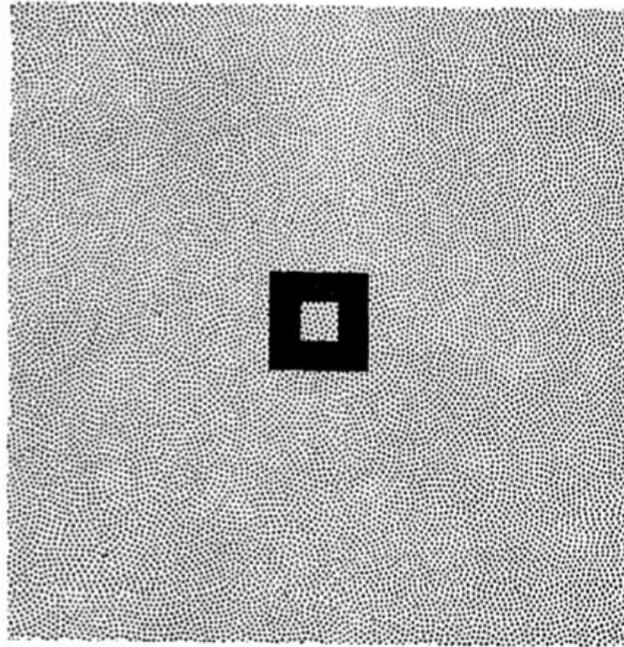


Figura 5-28: esquema del campo de visión [23]

El ángulo visual del color de prueba era de $2^\circ \times 2^\circ$, el envolvente negro de $5^\circ \times 5^\circ$, y el campo de adaptación de aproximadamente $40^\circ \times 40^\circ$. Se proporcionó un interruptor giratorio de ocho puntos mediante el cual el observador podía indicar si observó: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, púrpura o gris.

Solo al final de toda la serie de experimentos los observadores vieron los colores en un nivel claramente fotópico. Su denominación de ellos a una luminancia de $23 \frac{\text{candelas}}{\text{m}^2}$ se muestra en la figura 6-29. [23]

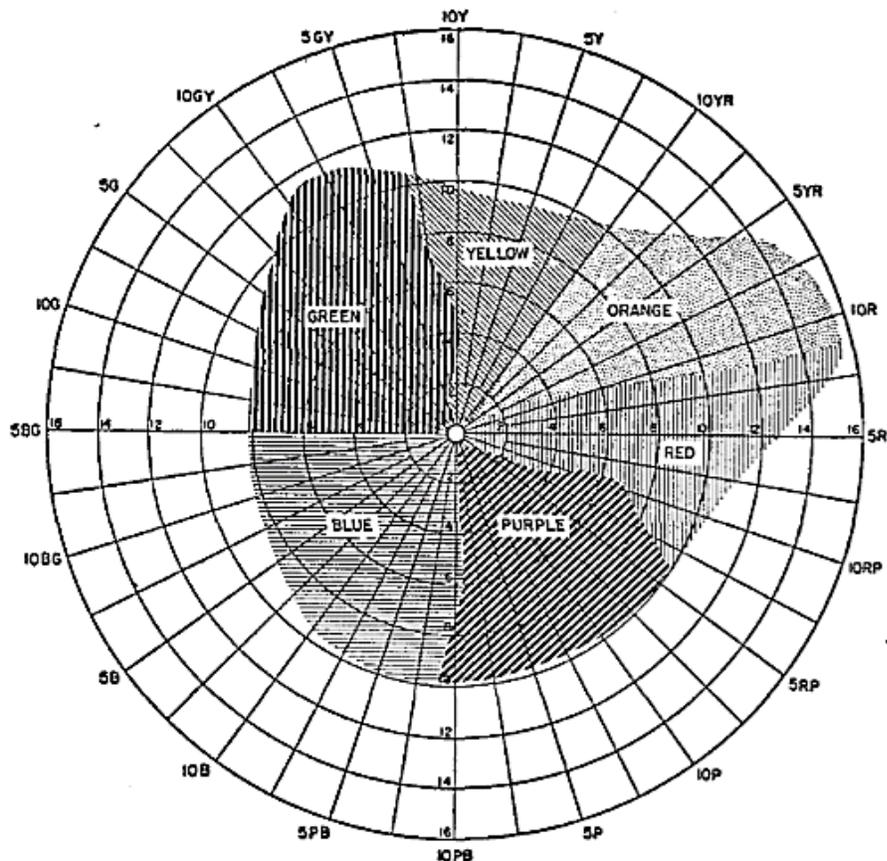


Figura 5-29: Denominación de los colores de los observadores a una luminancia de $23 \frac{\text{candelas}}{\text{m}^2}$ [23]

La luminancia del campo de adaptación se midió directamente con un fotómetro de baja luminancia que había sido cuidadosamente estandarizado con luz de 2360K por los propios observadores.

La Tabla 6-3 muestra cada uno de los seis niveles de iluminación utilizados en la superficie de prueba, estos valores estaban originalmente en logaritmo de lux, pero se han pasado a lux.

Estos valores cubren la mayor parte de la región mesópica. También cubren condiciones naturales en las últimas etapas del crepúsculo y en la luz de la luna, hasta aproximadamente la iluminación producida en una superficie horizontal por el cielo nocturno y estrellas. [23]

Tabla 5-3: Niveles de iluminación utilizados en las superficies de prueba [23]

Nivel	Iluminancia (log lux)	Iluminancia (lux)
A	-2.32	0.01
B	-1.84	0.02
C	-1.35	0.04

Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here.

D	-0.86	0.2
E	-0.36	0.5
F	+0.14	1.4

Los resultados se muestran con dos tipos de información o regiones en cada figura. Las regiones en que las muestras se consideran cromáticas, es decir, que no sean grises, se remarcaron , se usó una línea sólida para representar los que están bajo el 50 por ciento de confianza esto es, eran vistos como gris más de la mitad de las veces, y por una línea discontinua para representar los que están bajo el 100 por ciento de confianza, esto es ,eran vistos como cromáticos por más del 50% de las veces, significa que todos los colores dentro de las líneas discontinuas a veces se veían como grises pero en menos de la mitad de las observaciones, dentro de la línea continua se veían como gris más de la mitad de las veces.

Además, se ha indicado un tipo de sombreando para cada color (rojo, naranja, amarillo, verde, azul, morado), las regiones se marcaban con un tipo de sombreado según el color que se daba con mayor frecuencia. Los tipos de sombreado se muestran en la Figura 6-30.

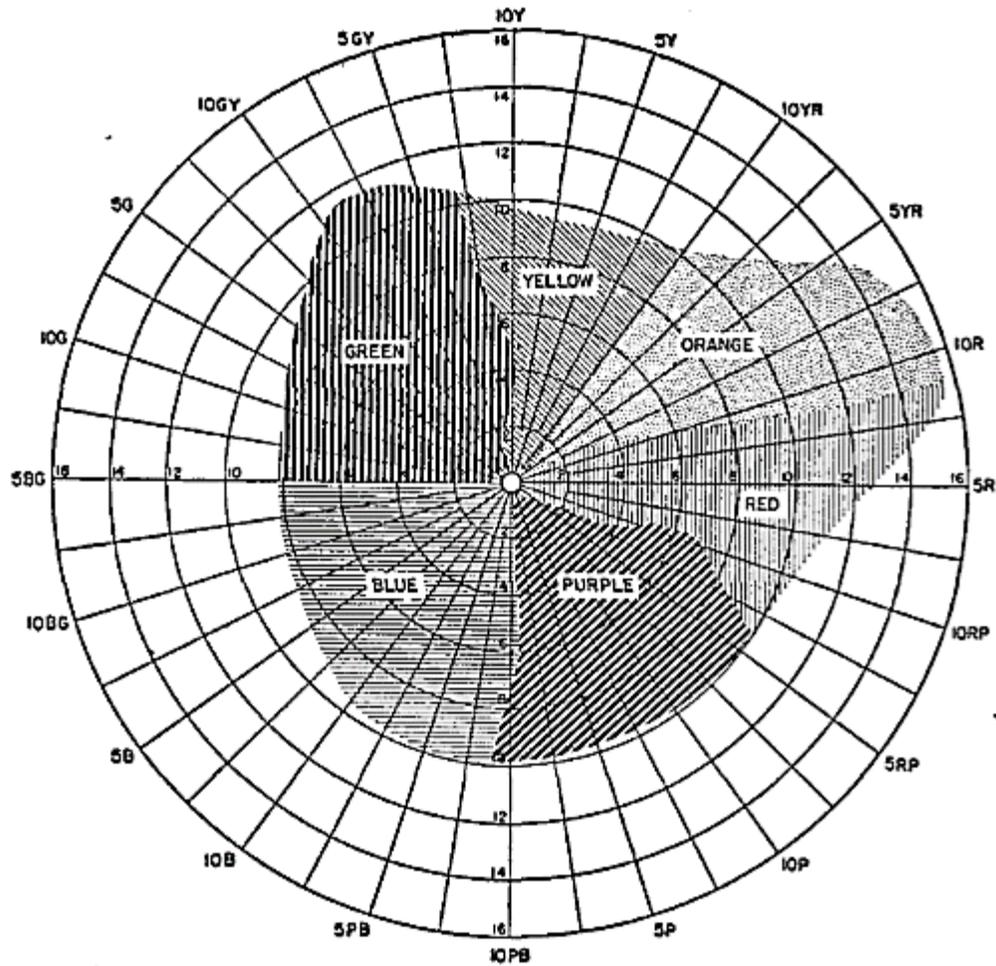


Figura 5-30: tipos de sombreado para la definición de los colores por parte de los observadores [23]

Para ilustrar los resultados, se presentan las Figuras 6-31 a 6-36, que muestra las percepciones del observador C.S.

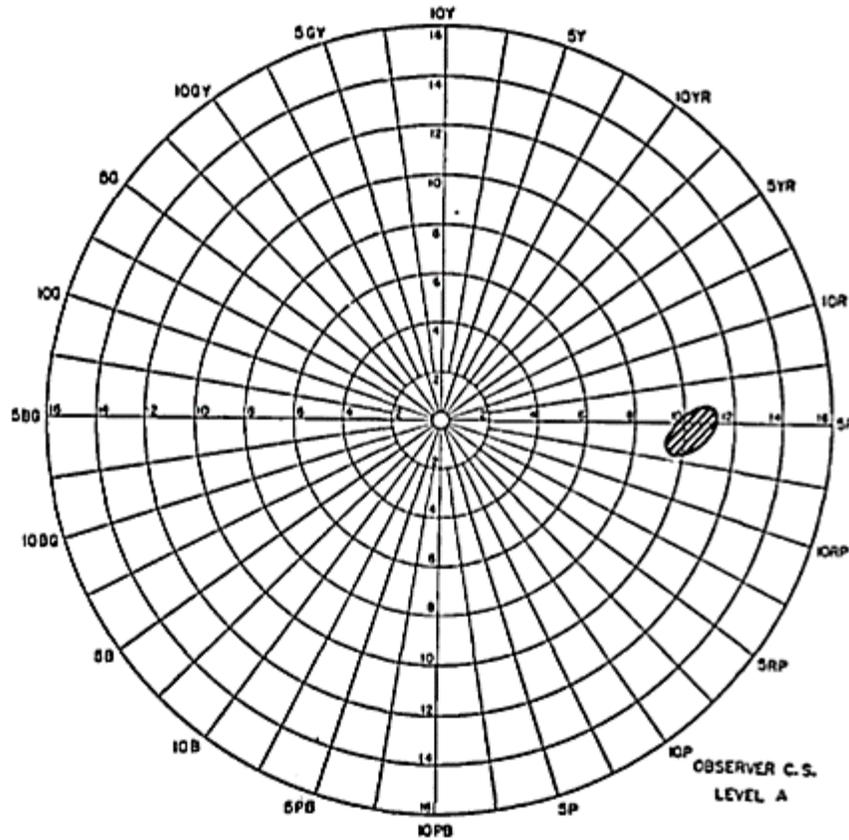


Figura 5-31: Resultados del Observador C.S. en el Nivel A (0.01 lux). La línea continua encierra la región donde se observó cromaticidad [23]

En el nivel más bajo (figura 6-31), la mayoría de las muestras de colores se ven acromáticas y solo un pequeño grupo puede verse ocasionalmente cromático (sector de muestras rojas es visto principalmente purpura).

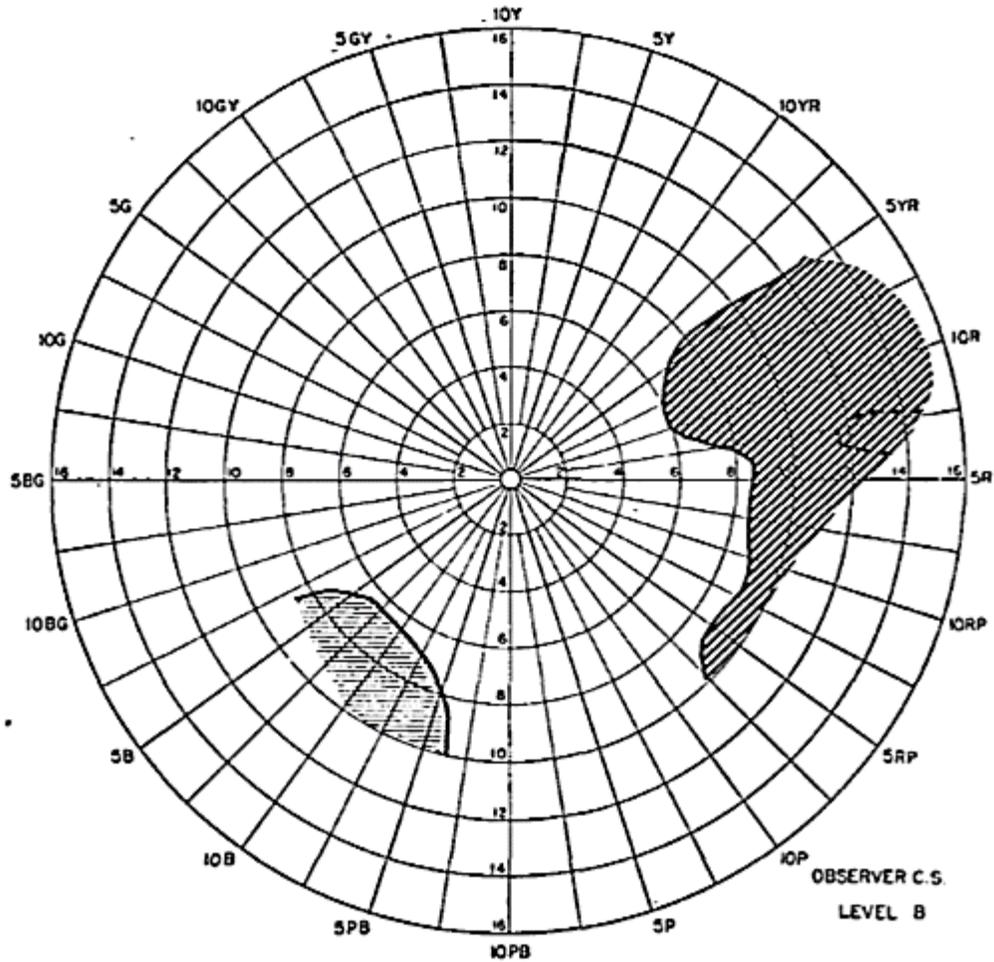


Figura 5-32: Resultados del Observador C.S. en el Nivel b (0.02 lux) [23]

Al llegar al nivel B (figura 6-32), los colores de saturaciones mayores a 9 en la región de 5RP a 5YR aparecen con frecuencia de color púrpura, y hay una pequeña región cromática en el azul.

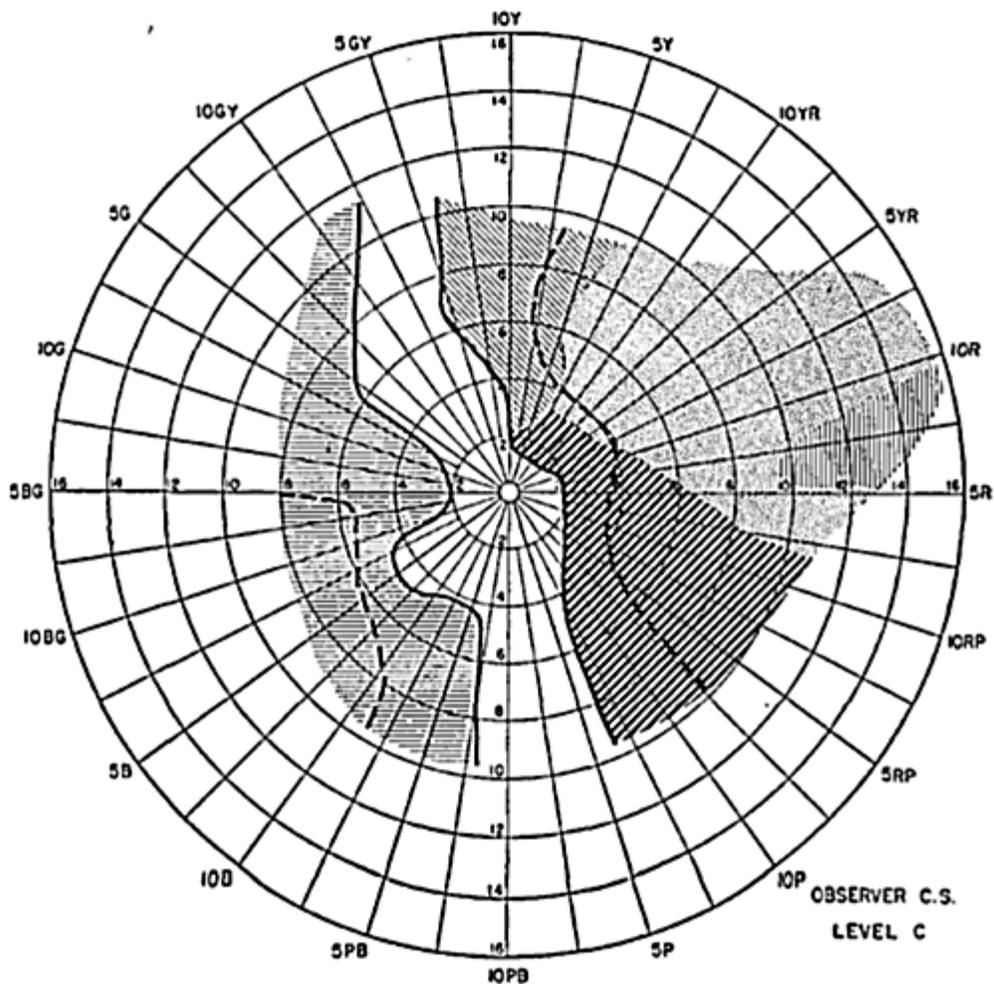


Figura 5-33: Resultados del Observador C.S. en el Nivel C (0.04 lux) [23]

El mayor cambio en la apariencia de los diagramas ocurre entre los niveles B y C (figuras 6-32 y 6-33), en el nivel C, en general, el observador C.S. considera que todas las muestras de saturación alta son cromáticas, excepto aquellas que están cerca del púrpura y el amarillo verdoso (7.5GY y 2.5P). La Figura 6-33 muestra un "eje acromático" que va del amarillo verdoso a púrpura. Es de interés que el verde aun no es nombrado en este nivel y el rojo se nombra por primera vez.

Otra característica interesante es la tendencia a ver los colores naranjas pálido como púrpura. Esto persiste hasta niveles mucho más altos, y de hecho las decisiones más difíciles para todos los observadores fueron entre púrpura pálido y naranja pálido. Aunque no se realizó en ese momento, parecía haber una resistencia a darle el nombre "rojo" a cualquier color pálido, incluso en la región de 5R.

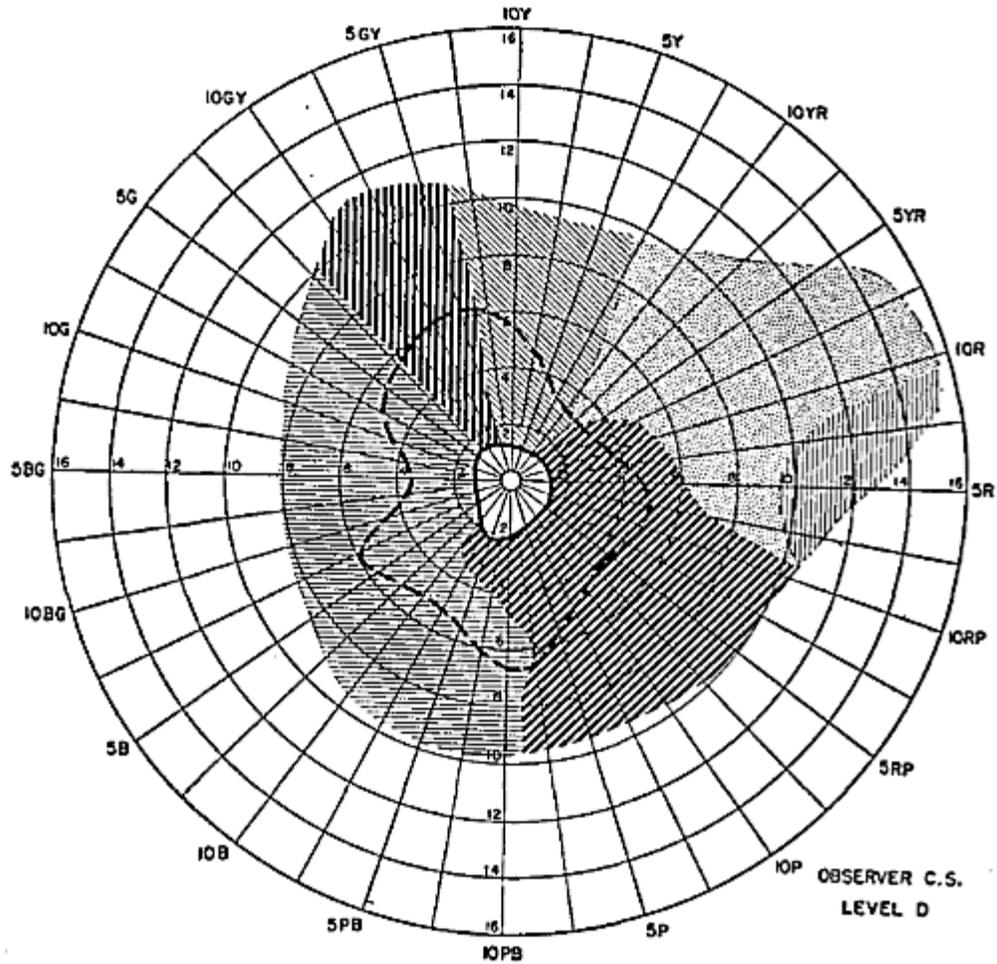


Figura 5-34: Resultados del Observador C.S. en el Nivel D (0.2 lux). [23]

Para cuando se alcanza el nivel D, la visión cromática está bien desarrollada en la mayor parte de las muestras. El verde es visto, aunque en regiones bastante diferentes por los tres observadores. En los niveles restantes, los colores observados se acercan cada vez más a los observados por la visión fotópica.

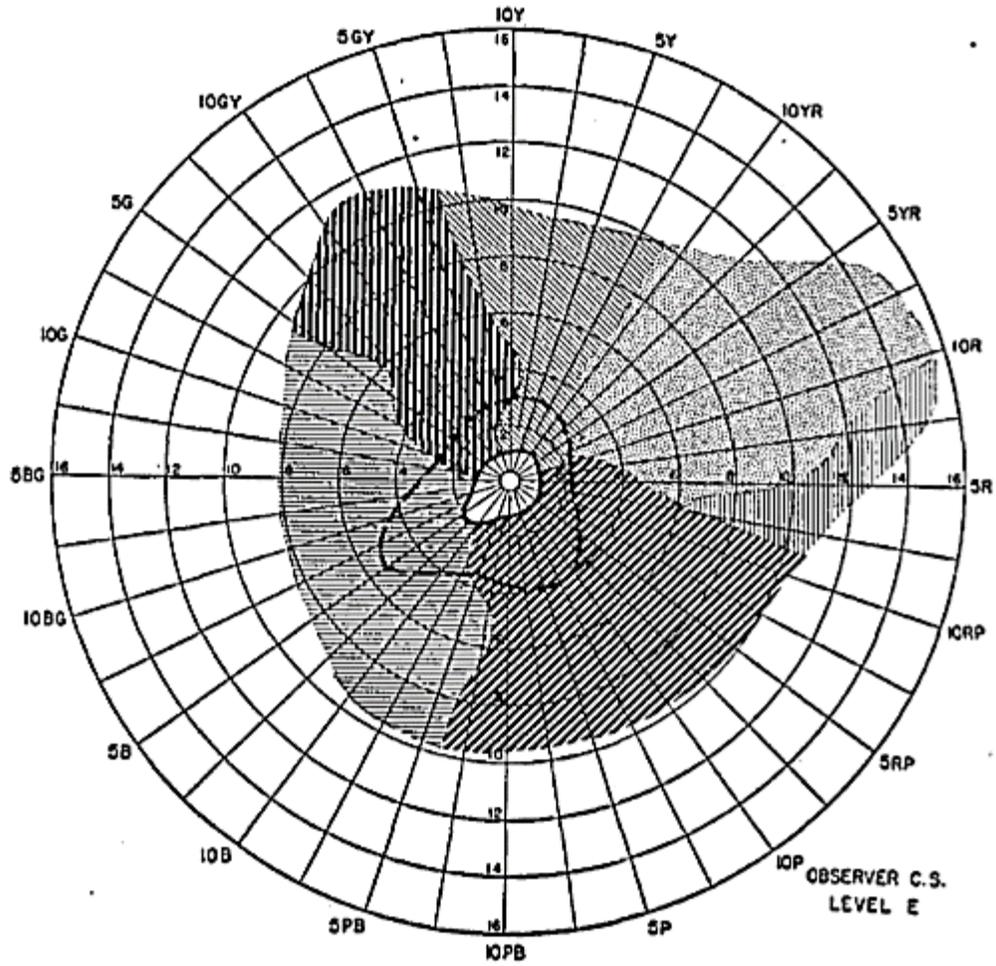


Figura 5-35: Resultados del Observador C.S. en el Nivel E (0.5 lux) [23]

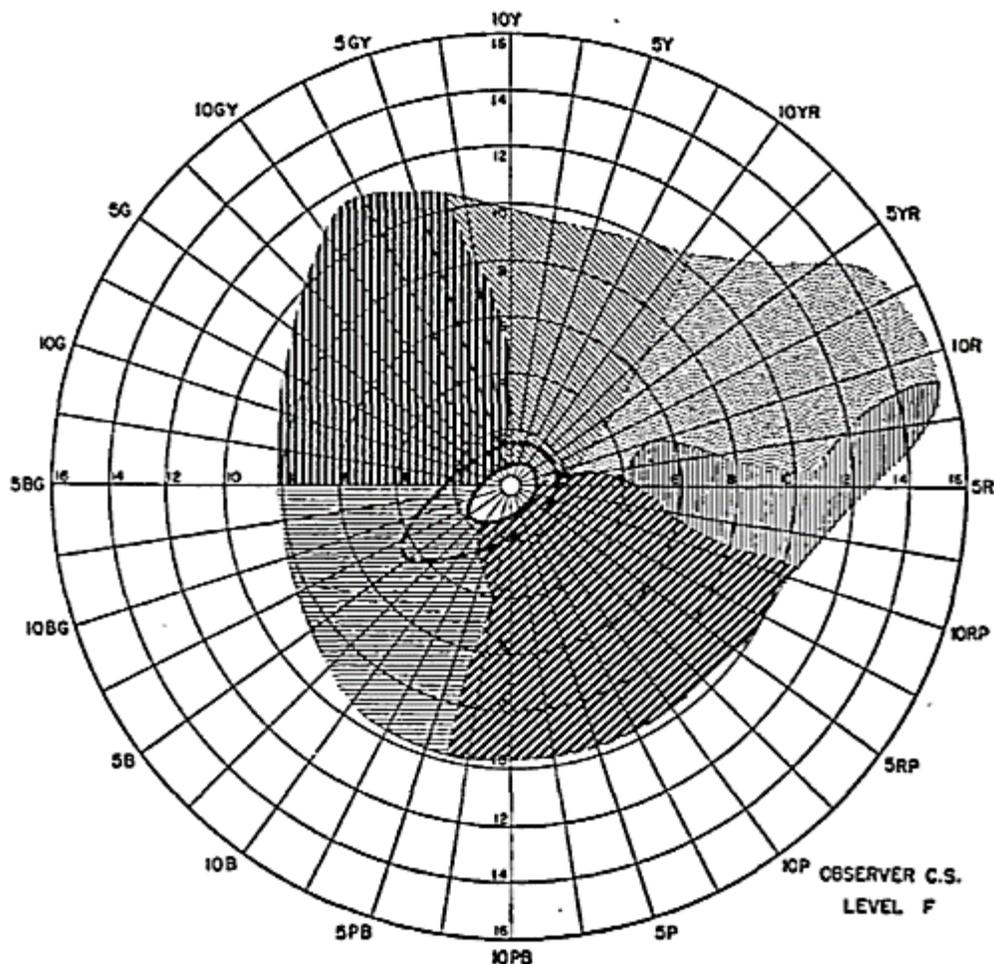


Figura 5-36: Resultados del Observador C.S. en el Nivel F (1.5 lux) [23]

La región verde aumenta constantemente a expensas del azul. En el nivel F, la visión del color ya es similar a la fotópica, con la excepción de los azules de baja cromaticidad.

En realidad, el color que se ve por primera vez es el violeta, que continúa ocupando más que su parte del plano de cromaticidad hasta niveles mesópicos bastante altos, todos los verdes se llaman azules en luz tenue.

Parecería que las señales coloreadas son bastante poco confiables en iluminaciones mucho más bajas que 0.4 lux (nivel E), excepto en situaciones muy simples donde podría ser adecuado distinguir entre, digamos, naranja y azul, e incluso entonces el nivel D (0.13 lux) probablemente sería un límite útil. Este valor de iluminación es similar a la producida por la luna llena el cual parece ser el punto final de la visión del color útil o confiable. [23]

En los dos experimentos se ve, en términos generales, que en el rango mesópico el ojo cambia a un sistema de visión tritanópico y a una visión acromática o de varilla a niveles escotópicos.

La tritanopia es una alteración genética que afecta a la visión de los colores en un pequeño porcentaje de la población. En este tipo de alteración, el cono S falta por completo y solo están presentes los conos de L y M

Las confusiones de color más comunes para los tritanopes son azules claros con grises, morados oscuros con negro, verdes medio con azules y naranjas con rojos.

Hay relativamente pocos datos cuantitativos sobre la interacción entre las distintas variables que afectan a la función de cromaticidad, pero se ha demostrado que las fuerzas de interacción (otras variables que puedan estar involucradas en el proceso de visión) son complejas en el rango mesópico.
[20]

Discusión y conclusiones

Uno de los principales factores que pueden causar cambios en la identificación del color en el nivel mesópico es la influencia de los bastoncillos. Cuando la iluminancia se reduce más allá del extremo inferior del nivel fotópico, la sensibilidad visual se desplaza hacia una longitud de onda más corta debido al aumento en la contribución de la varilla este es el antes mencionado "cambio de Purkinje". Este cambio de sensibilidad mejora la luminosidad percibida de las superficies azules. El efecto Purkinje también produce un cambio en la percepción de los colores verdosos a azules, la razón es la mayor sensibilidad que adquiere el ojo a las longitudes de onda más cortas que son reflejadas por las superficies verdes, en otras palabras, el ojo comienza a ponderar con mayor valor aquellos aportes de ondas cortas que hay en los pigmentos verdes.

- A 1000 lux se encontraron marcadas regiones correspondientes a cada uno de los 13 términos de color, excepto "azul-verde".
- A 10 lux, la identificación de los colores mostró una tendencia similar a 1000 lux, aunque la consistencia de la identificación del color, bajó en cierto grado.
- A 1 lux se produjeron grandes cambios en la identificación del color y a 0.1 lux, la identificación confiable casi se perdió.
- El cambio más importante en las iluminancias inferiores (1 lux y 0.1 lux) fueron el reemplazo de "verde" por "azul".
- las fronteras entre "amarillo" "Y" amarillo-verde "y entre" azul "y" violeta "eran casi constantes.

En principio se podría designar una iluminancia del orden de los 10 lux como un límite bajo en cual se puede asegurar el reconocimiento de los colores con un nivel de confianza muy cercano al 90%, incluso a ese nivel de iluminancia cerca de un 30% de las identificaciones se dieron en menos de 1.5 segundos, por lo que este nivel puede considerarse bastante confiable.

También se puede designar un nivel de iluminancia de 1 lux como umbral, pero bajando el nivel de confiabilidad a un valor cercano 50%.

En 0.1 lux los colores ya no se identifican de manera confiable, no se identificó ninguna muestra con más de 90% de consistencia y más de la mitad de las muestras no tenían respuestas consistentes en más 50%, por lo que este nivel de iluminancia tiene una confiabilidad bastante mediocre y sería claramente insuficiente si lo que se desea es una buena percepción y discriminación del color por parte de un gran número de personas.

Se puede identificar un conjunto de muestras que entran en la región acromática antes que el resto de las muestras, estas van desde la región verde, pasando por el centro de las muestras del sistema de Munsell, esto es, las muestras con menos saturación, llegando a las muestras purpura, este comportamiento de las muestras se presentó en los 3 valores del sistema Munsell en los cuales se realizó el experimento.

Es posible que se deban elegir niveles de iluminación más altos si lo que se desea es una percepción confiable entre los azules y verdes sin embargo no se recomienda usar estos colores en una misma tarea

visual puesto que incluso a nivel de iluminancia fotópica los observadores tienden a confundir estas muestras.

En la mayoría de los niveles se pudo ver un marcado límite en el reconocimiento de los colores púrpuras y azules también entre los amarillos y verdes.

En general los colores que darían niveles de confiabilidad más altos en todos los rangos de iluminancia estudiados son el rojo y azul. Incluso a niveles de 0.1 lux tiene un porcentaje de confianza muy cercano al 50%.

La forma que se podría utilizar estos resultados sería en todas aquellas tareas visuales en que desee utilizar la mínima cantidad de luz posible (energía) la cual permita que un grupo de observadores trabajen en la región de visión cromática, estos datos también permiten trabajar en diseño de equipamiento utilizado por personas que trabajen a niveles de luz muy bajo, como pueden ser actividades realizadas en la ,atardecer y noche, o en el diseño de señalética en calles con baja iluminación, entre otros usos.

Existen diversos factores que podrían influir en los resultados obtenidos, ya sea de manera positiva, esto es, logrando que el nivel de iluminación requerido pueda ser aún menor a los mencionados anteriormente, o de manera negativa, es decir, que se deban aumentar más niveles de luz requeridos, algunos de estos factores más importantes son los siguientes:

- luminancia de fondo.
- contraste de luminancia (entre la señalética y las paredes).
- tamaño de la señalética.
- ángulo de visión.
- tipo fuente de iluminación.
- tiempo de exposición.
- tiempo de adaptación.
- Contraste cromático.
- Factores psicológicos.

Estos factores mencionados, no fueron considerados en los 2 estudios, es decir, no se analizó su influencia en los resultados de identificación del color por lo que se hace necesaria más investigación considerando estos factores.

Bibliografía

- [1] M. Stanley Rea, *The IESNA Lighting Handbook*, New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
- [2] «LED Grow Light Hydro Blog,» [En línea]. Available: www.ledgrowlight-hydro.com. [Último acceso: 13 enero 2017].
- [3] P. Moon, *The Scientific Basis of Illuminating Engineering*, McGraw-Hill, 1936.
- [4] G. Wyszecki y W. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., 1982.
- [5] M. Boscarol, «Imagen Digital, Apuntes sobre diseño y artes graficas,» 18 octubre 2007. [En línea]. Available: http://www.gusgsm.com/curva_eficiencia_luminosa. [Último acceso: 11 enero 2018].
- [6] Efecto Led, «Blog Efecto LED,» [En línea]. Available: www.efectoled.com. [Último acceso: 4 enero 2018].
- [7] J. Murdoch, *Illuminating Engineering From Edison's Lamp To The LED*, Second Edition, Visions Communications, 2003.
- [8] G. Smith, A. Vingrys, J. Maddocks y C. Hely, «Color recognition and discrimination under full-moon light,» *Applied optics*, vol. 33, n° 21, pp. 4741-4748, 1994.
- [9] E. Hecht, *optics*, 2nd Ed., Addison Wesley, 1987.
- [10] «Foro Astronomía,» [En línea]. Available: www.astronomo.org. [Último acceso: 13 enero 2018].
- [11] «United Kingdom Association of Street Light Enthusiasts,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.ukastle.co.uk>. [Último acceso: 5 febrero 2018].

- [12] B. O'Donell y E. Colombo, iluminación eficiente, buenos aires: proyecto efficient lighting innovative, 2002.
- [13] A. De los santos, «Anibal designs,» [En línea]. Available: www.anibaldesigns.com. [Último acceso: 16 enero 2018].
- [14] Astronomía Educativa: Tierra, Sistema Solar y Universo, «Astromia,» 2018, [En línea]. Available: www.astromia.com. [Último acceso: 16 enero 2018].
- [15] M. Mattiello, «La iluminación en los ambientes de trabajo,» *Revista de la asociación argentina de luminotecnia*, vol. 9, nº 2, pp. 12-16, 1974.
- [16] L. Fugikawa y J. Pereira, «Composição de cores através da calibração radiométrica e fotométrica de LEDs: teoria e experimento,» *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 35, nº 2, 2013.
- [17] P. Gouras, «The Organization of the Retina and Visual System, color vision,» 1 julio 2009. [En línea]. Available: <http://webvision.med.utah.edu/book/part-vii-color-vision/color-vision/>. [Último acceso: 18 junio 2018].
- [18] M. Kalloniatis y C. Luu, «The Perception Of Color,» 9 julio 2005. [En línea]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11538/>. [Último acceso: 18 junio 2018].
- [19] D. Muñoz, «Teoría Del Color,» 2013. [En línea]. Available: <http://danielmunozdv.wixsite.com/teoriadelcolor/sistema-de-munsell>. [Último acceso: 14 diciembre 2017].
- [20] I. Sim, «The Characteristics Of Mesopic Vision,» *The Australian Journal Of Optometry*, pp. 3-24, 1965.
- [21] T. Ishida, «Color Identification Data Obtained from Photopic to Mesopic Illuminance Levels,» *COLOR research and application*, vol. 27, nº 4, pp. 252-259, 2002.
- [22] Ministerio De Energía, «Reglamento alumbrado público para transito peatonal,» Santiago, 2015.
- [23] W. Knowles y E. Mayo, «The Appearance of Colors in Twilight,» *Journal Of The Optical Society Of America*, vol. 42, nº 2, pp. 116-121, 1952.

