



**Academia de Ciencias Matemáticas,
Físico-Químicas y Naturales de Granada**

METAMERISMO: ¿UN PROBLEMA O UNA SOLUCIÓN?

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO NUMERARIO POR EL

ILMO. SR. D. LUIS MIGUEL JIMÉNEZ DEL BARCO JALDO

Granada, 2020



**Academia de Ciencias Matemáticas,
Físico-Químicas y Naturales de Granada**

METAMERISMO: ¿UN PROBLEMA O UNA SOLUCIÓN?

**DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO NUMERARIO POR EL**

ILMO. SR. D. LUIS MIGUEL JIMÉNEZ DEL BARCO JALDO

Granada, 2020

METAMERISMO: ¿UN PROBLEMA O UNA SOLUCIÓN?

LUIS MIGUEL JIMÉNEZ DEL BARCO JALDO

**Rectora Magnífica de la Universidad de Granada,
Excelentísimo Señor Presidente de la Academia,
Ilustrísimas Sras. y Sres. Académicos,
Excelentísimas e Ilustrísimas autoridades académicas,
Señoras y Señores, queridos amigos, compañeros y
familiares,**

Preámbulo.

Quiero comenzar este discurso manifestando mi más profundo agradecimiento a esta Academia por haberme aceptado en el seno de la misma, lo cual ha supuesto para mí un gran honor pero, sobre todo, a la hora de integrarme en ella, me invade una fuerte inquietud y compromiso ante el reto de

saber contribuir a los objetivos que la fundamentan: el cultivo, fomento y difusión de las ciencias y sus aplicaciones, así como prestar servicio consultivo a las instituciones públicas o privadas acerca de cualquier asunto de carácter científico de su competencia.

No puedo más que agradecer profundamente a todos aquellos que han hecho posible estas circunstancias, a su Excmo. Presidente profesor Hita, querido maestro, compañero y amigo en las andaduras científicas y académicas, a su Presidente de Honor profesor Pardo, al Presidente de la Sección de Físico-Químicas profesor Prieto, a la Junta de Gobierno, a su Secretario General profesor Capitán Vallvey y, por supuesto, a todos los miembros de esta Academia que han contribuido como profesores a mi formación como físico por la Universidad de Granada. Gracias también a todos los compañeros y colaboradores del Departamento de Óptica con los que he venido compartiendo y aprendiendo en la apasionante labor científica y académica.

Han sido diversas las tentativas temáticas a la hora de elegir el trabajo original acerca de alguna de las materias propias de la Sección de Ciencias Físico-Químicas relacionadas con mi labor científica e investigadora. Van

desde los fundamentos y logros de uno de los campos que se han erigido como ciencia básica y aplicada, relativamente joven dentro del devenir histórico de la Ciencia, la Colorimetría y la Visión del Color, hasta los retos y últimos logros dentro de la Óptica Visual y la Óptica Fisiológica; todos han sido francamente tentadores. Finalmente he optado por elaborar este discurso dentro del campo en el que, ya hace cuarenta años, inicie mis investigaciones y que viene a fundamentar la mayor parte de los desarrollos posteriores que hoy son de amplia aplicación, con carácter multidisciplinar, en diversas ramas de la Ciencia: el metamerismo como base de la Visión del Color y de la Colorimetría.

Son más de nueve mil millones de registros los que con el término “color” se encuentra disponibles en las redes informáticas de buscadores, dentro de los cuales, cerca de setecientos dos millones corresponde con la visión del color y unos doscientos treinta mil con el término “metamerism” o “metameric”. Sirva como referencia que son mil trescientos millones los registros que aparecen para uno de los mayores logros científicos y técnicos de las últimas décadas como es el láser.

Introducción.

Uno de los aspectos que históricamente mayor interés ha despertado por el saber y conocer, en la búsqueda de explicaciones encaminadas a la elaboración de modelos con capacidad predictiva, ha sido el fenómeno de la visión. Este objetivo, desde sus orígenes, ha ido apareado al conocimiento de la naturaleza de la luz, temática ésta que ha abierto capítulos apasionantes en la historia de la Ciencia que van desde la etapa pre-científica hasta su naturaleza dual onda-partícula, ampliamente aceptada y corroborada dentro del paradigma científico actual¹.

Desde la Grecia antigua, la luz y la visión han sido centro de interés y objeto de elaboración de teorías por filósofos como Pitágoras (Samos, 569 a.C.), Epicuro (Samos, 341 a.C.-270 a.C.), Empédocles (Sicilia, 495 a.C.-435 a.C.), Demócrito (Abdera, Tracia, 460 a.C.- 370 a.C.), Euclídes (Alejandría, 325 a.C.-265 a.C.), Aristóteles (Estagira, Macedonia, Grecia, 384 a.C. C.-Calcis, isla de Eubea, Grecia, 322 a.C.) y Ptolomeo (Tebas, 100-170).

¹ Vasco Ronchi, "Storia della luce: da Euclídes a Einstein". Roma, Laterza 1983

La influencia de las diversas teorías, a veces contrapuestas, sobre intromisión y extramisión de la interacción luz-objeto-ojo, llegó hasta la ciencia moderna de Isaac Newton (1643-1727).

Con anterioridad a la ciencia moderna, en el florecimiento de la ciencia árabe, en la conocida Edad de Oro islámica (siglo VIII a mitad del siglo XII), se realizaron contribuciones importantes a las teorías de la luz y la visión. Según algunos autores se puede considerar al matemático, físico y astrónomo Alhacén (Basora, actual Irak, 965-El Cairo, Egipto, 1040) como el padre de la Óptica, de la Oftalmología y de la Física Moderna, llegó a afirmar que *“desde cada punto de un cuerpo coloreado, iluminado por una luz, salen luz y color en cada línea recta que pueda ser trazada desde ese punto”*². Alhacén formula por primera vez la síntesis de las teorías de intromisión y extramisión: la luz irradiada por el sol se refleja en los objetos y llega a los ojos. Sus contribuciones en la obra *Kitab al-Manazir* (Tratado de de Óptica), sentaron las bases de desarrollos posteriores por el astrónomo y matemático alemán Johannes Kepler (Ratisbona 1571-1630). En su libro I, de los siete que componen la obra,

² Manuel de León y Ágata Timón, “Las matemáticas de la Luz”. CSIC, Catarata, 2017

Alhacén de Basora trata sobre las teorías de la luz, el color y la visión.

Son numerosos los científicos de renombre que desde la Edad Media europea han desfilado por este apasionante capítulo de la historia de la ciencia: Robert Grosseteste, Roger Bacon, Johannes Kepler, René Descartes, Pierre Fermat, Galileo Galilei, Isaac Newton, Christian Huygens, Thomas Young, A. Fresnel, D.F. Arago, James Clerk Maxwell, Michel Faraday, Edward Morley, Albert A. Michelson, R. Kohlrausch, W. Weber, H. Hertz, Rayleigh, William Thomson Kelvin, Albert Einstein, Planck, Louis-Victor De Broglie, Heisemberg y Erwin Schrödinger.

Las teorías y los modelos sobre la Visión y el Color, cuyos progresos han ido apareados en una cierta etapa con el desarrollo de la Colorimetría, se han visto acompañados y retroalimentados en sus avances con los progresos de la Radiometría, de la Fotometría, de la instrumentación fotorradiométrica de medida, y de los logros de la Óptica Fisiológica, la Psicofísica y las Ciencias Neurobiológicas.

Históricamente han destacado en este campo las figuras de Newton, Thomas Young, Hermann Ludwig Ferdinand von

Helmholtz con su teoría tricromática sobre la visión del color basada en la trivarianza visual de la retina, teoría que se vio reforzada con los trabajos experimentales de James Clerk Maxwell y de Hermann Günther Grassmann. Con esta teoría y con la fisiológica de Müller polemizó el fisiólogo alemán Ewald Hering, que junto a König y Von Kries, condujeron a la elaboración de teorías zonales específicas que combinan una primera fase tricromática a nivel receptoral con un segundo estadio de procesamiento neuronal regido por mecanismos de colores oponentes. Cada uno de los tres tipos de conos postulados en la primera etapa tiene su propio fotorpigmento con propiedades específicas de absorción espectral y vienen caracterizados por funciones de respuesta que, en el modelo de Judd pueden ser expresadas como combinación lineal de las funciones de mezcla CIE-1931 del tricrómata normal.

La teoría de colores oponentes, con el establecimiento de tres canales, dos cromáticos oponentes y un canal acromático se asentó fuertemente a partir de los experimentos de cancelación de tono junto con el concepto de valencia cromática establecido por Jameson y Hurvich; sus resultados han sido, y siguen siendo, fundamentales para las propuestas de otros modelos de visión cromática cuyos contenidos sobrepasan lo que pretende ser una breve reseña histórica en

este discurso y que se encuentran ampliamente descritos en la literatura científica³.

En el dominio estrictamente óptico son numerosas las investigaciones en la actualidad tendentes a conocer mejor el proceso dinámico del ojo vivo. Son también muy relevantes las investigaciones en psicofísica de la Visión, principalmente en la visión del color. Los modelos y teorías, brevemente referenciados con anterioridad, pretenden establecer la relación entre energía radiante y sensación de color, a partir de cual se puede medir el color, calcular diferencias de color con bastante precisión y predecir la sensación visual producida.

Cabe aclarar que, a día de la fecha, gran parte de los modelos y teorías no proporcionan una explicación completa y general de la visión del color, muchos de ellos han sido modelos *had oc*, elaborados en el intento de explicar determinados fenómenos y efectos visuales. No obstante, en todos subyace una base metodológica teórico-experimental común: la realización de igualaciones colorimétricas a partir de estímulos físicos (energía radiante capaz de producir sensación luminosa) con diferentes composiciones espectrales,

³ Javier Romero Mora y Luis M. Jiménez del Barco, "Teorías y Modelos de la Visión del Color" (cap. de libro), en "Óptica Fisiológica, Psicofísica de la Visión", McGraw Hill-Interamericana de España, Madrid 1995.

así como el comportamiento trivariante del sistema visual humano, que lo es para la amplia mayoría de los seres humanos. Esto último es objeto del tema que tratamos de abordar: el metamerismo.

El sistema visual humano, y el ojo como parte fundamental del mismo, constituye un detector maravilloso de energía radiante visible, aún no igualado, a pesar de los esfuerzos de investigación realizados. Es un complejo mecanismo en el que para comprender el fenómeno de la Visión se conjugan la Física, la Fisiología, la Neurología y la Psicología. El sistema óptico del ojo forma una imagen del campo visual sobre la retina en un complejo mosaico de diminutos fotorreceptores capaces de convertir la energía radiante en impulsos eléctricos que, a través del nervio óptico, llegan al cerebro, el cual se encarga de interpretar la información y completar el fenómeno de la Visión.

En palabras de David Marr⁴: "*¿Qué significa «ver»? La respuesta del hombre sencillo (y la de Aristóteles también) sería: mirar y saber qué es lo que está ahí y dónde. En otras palabras, la visión es el proceso por el que se descubre a partir de las imágenes lo que está presente en el mundo y donde está.*

⁴ David Marr: "La Visión". Alianza Editorial, 1985.

Por tanto, en primer lugar y fundamentalmente, la Visión es una tarea de procesamiento de información. Empero, no podemos concebirla simplemente como un proceso, porque para que podamos conocer lo que hay en el mundo, de algún modo nuestros cerebros han de ser capaces de representar esta información en toda su profusión de color y forma, con toda su belleza, movimiento y detalle. Por consiguiente, el estudio de la Visión debe incluir no solo el estudio de cómo extraemos a partir de las imágenes los diferentes aspectos del mundo que son útiles para nosotros, sino que también ha de incorporar una exploración de la naturaleza de las representaciones internas mediante las que captamos esta información, disponiendo así de una base para decidir sobre nuestros pensamientos y acciones.

Esta dualidad -la representación y el procesamiento de la información- constituye el soporte de la mayor parte de las tareas de procesamiento de información y va a influir profundamente en nuestra investigación de los problemas concretos planteados por la Visión.

..... En cuanto a la Visión, no hay una simple ecuación o enfoque que lo explique todo. Es preciso abordar cada problema desde varios puntos de vista: como un problema de

representación de la información, como un cálculo que permita derivar esta representación y como un problema de arquitectura de un ordenador capaz de llevar a cabo ambas cosas de modo rápido y fiable.

..... La Visión es un proceso que a partir de las imágenes del mundo externo produce una descripción que es útil al observador y no está ensombrecida por información irrelevante. no hay duda acerca de la representación inicial: consiste en la distribución de valores de intensidad de imagen detectados por los fotorreceptores de la retina."

Los párrafos anteriores son una muestra del intento de sistematizar el estudio del complejo fenómeno de la Visión. David Marr, en su magnífica y densa obra publicada en 1982, establece el marco teórico y las bases de lo que se ha venido a denominar *Teoría Computacional de la Visión*, abriendo las puertas al apasionante mundo de la Visión Artificial. Conseguir dispositivos capaces de realizar los mismos procesos que los de la secuencia *luz - retina - nervio óptico - cerebro*, es la solución necesaria para hacer "ver" a los robots, objetivo éste de máxima actualidad y de tal importancia económica y social que produce una sensación entre admiración y temor.

David Marr, en su tesis de que la representación inicial consiste en la distribución de valores de intensidad de imagen detectados por los fotorreceptores de la retina, no considera explícitamente la distribución espectral de los valores de la intensidad en las imágenes, aspecto éste fundamental en todo el proceso de la visión humana, y que sigue siendo un reto en las pretensiones de implementar algorítmicamente aquellos aspectos de la visión del color que han de emular los procesos robotizados. En este sentido, en la actualidad se están realizando importantes avances en el procesamiento de imágenes y en las ciencias de la computación para evaluar los límites tolerables en el metamerismo dentro del análisis y captura de imágenes hiperespectrales ^{5,6,7,8}. El gran número de publicaciones en revistas especializadas, así como las frecuentes reuniones científicas de grupos y sociedades científicas - International Colour Association (AIC), International Commission on Illumination (CIE), European Conference on Visual Perception, Group of Color Vision Deficiencies, etc.- ponen de manifiesto el interés que cada día más adquiere el

⁵ A. D. Logvinenko, B. Funt, and C. Godau, "Metamer mismatching". IEEE Trans. Image Process. 23, 34–43 (2014).

⁶ Xiandou Zhang, Brian Funt and Hamidreza Mirzaei, "Metamer mismatching in practice versus theory". J. Opt. Soc. Am., 33(3), A238-A247 (2016).

⁷ D. H. Foster, K. Amano, S. M. C. Nascimento, and M. J. Foster, "Frequency of metamerism in natural scenes," J. Opt. Soc. Am. A23, 2359–2372 (2006).

⁸ G. Y. Feng and D. H. Foster, "Predicting frequency of metamerism in natural scenes by entropy of colors," J. Opt. Soc. Am. A 29, A200–A208 (2012).

tema.

En lo que sigue, estableciendo previamente el concepto de color, trataré del fenómeno en sí del metamerismo, sus bases, tipos, los índices de medida del mismo, la problemática científico-técnica que conlleva y algunos de los logros alcanzados con relación a este tema.

Sobre el color.

Según el Vocabulario Internacional de Iluminación, standard S017/E:2011 de la CIE (Commission Internationale de L'Eclairage)⁹ – adoptado por el Comité Español del Color de la Sociedad Española de Óptica¹⁰ en sus ediciones anteriores - son diversas las acepciones del término color atendiendo a los aspectos involucrados en el mismo, así podemos hablar de color percibido, color-objeto, color-superficie, color-apertura, color-luminoso, color-dependiente, color-independiente, color-acromático y color-cromático.

⁹ "ILV: International Lighting Vocabulary". Standard CIE S 017/E:2011. Versión electrónica en <http://eilv.cie.co.at/>. "Photometry – The CIE System of Physical Photometry". Joint ISO/CIE Standard. ISO 23539:2005(E)/CIE S 010/E:2004.

¹⁰ Vocabulario del Color (traducido por el Prof. Antonio de la Cruz Castillo), Comité Español del Color de la Sociedad Española de Óptica (http://www.sedoptica.es/comites_SEDO/color/docs/publicaciones/vocabulario-del-color.pdf)

A lo largo de este discurso optaré, no por estas acepciones que enfatizan particularmente en el aspecto perceptivo del color, sino por las definiciones propuestas por la Sociedad Americana de Óptica (OSA) y por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE). Entiendo que son más descriptivas de los procesos asociados al color, tanto desde la perspectiva física, como psicofísica. La OSA define el color como *“aquellas características de la luz distintas de sus heterogeneidades espaciales y temporales, siendo la luz el aspecto de la energía radiante que el observador humano es capaz de percibir por la estimulación que produce en su retina”*¹¹. En palabras de Judd¹², *“si dos objetos de igual forma y textura iluminados con la misma luz y en iguales condiciones de observación pueden diferenciarse, el atributo de esos objetos que produce esa diferenciación es el color”*.

La CIE define el *color psicofísico* como la característica de la radiación visible que permite al observador distinguir las diferencias entre dos objetos de las mismas dimensiones, forma y estructura, siendo estas diferencias de la misma naturaleza que las producidas por una diferencia en la composición espectral de

¹¹ Committee on Colorimetry, “The Psychophysics of Color”, J. Opt. Soc. Am., 34 (5), 245-266 (1944)

¹² Judd D.B., “Problemas actuales del color”. Traducido por Lorenzo Plaza Montero y editado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Óptica Daza de Valdés, Madrid (1954)

la radiación que interviene en la observación. Estas diferencias pueden especificarse en términos de los valores triestímulo que los describen en un determinado sistema de representación del color¹³.

Estos conceptos son inherentes a lo que podríamos entender como percepción visual simple, pero, como se verá, hay que circunscribirlos a unas determinadas condiciones de medida y observación. Se hace necesario, pues, caracterizar el estímulo físico que lo origina: la energía radiante (radiación electromagnética, o fotones, con longitudes de onda dentro del espectro visible, 380nm-780nm, figura 1), procedente de una determinada fuente luminosa, el objeto en sí a partir de su reflectancia o transmitancia espectral, y la sensibilidad espectral del detector de radiación, el ojo en el caso de la visión humana. En la actualidad, los modelos más avanzados que pretenden no solo la medición del color, sino predecir los atributos perceptivos del mismo, introducen multitud de parámetros relacionados con las condiciones de observación, no solo del estímulo en sí, sino con su entorno en escenas visuales complejas; son los llamados Modelos de Apariencia del Color que han sido y están siendo objeto de evaluación y estudio por el Comité Técnico de la CIE TC8-01 para realizar

¹³ Hita Villaverde, E., "El mundo del color, desde lo perceptivo y artístico a lo científico", Editorial Universidad de Granada (2001)

recomendaciones de uso en diferentes aplicaciones científico-técnicas e industriales¹⁴.

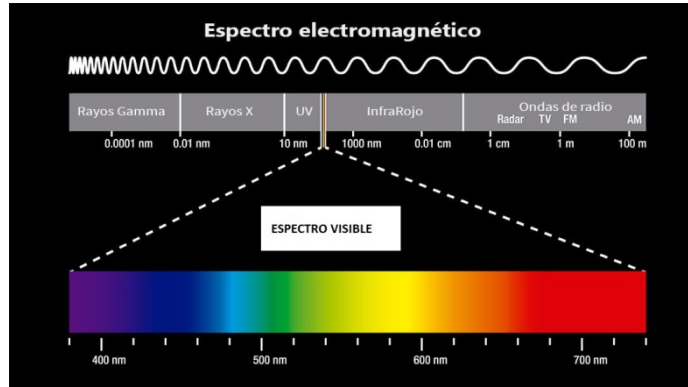


Figura 1. Espectro electromagnético con realce del espectro visible (380 nm- 780 nm).

El metamerismo como término científico.

En la tentativa de una primera aproximación al metamerismo, cabe hacer una primera consulta, dirigida al lector ajeno a esta temática como campo de investigación, del significado del mismo. Son diversas las acepciones científicas de este término en diferentes campos de las Ciencias de la Naturaleza; el significado del término “*metamería*” en el Diccionario de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, bajo su acepción morfológica-animal es el de “*repetición lineal externa, interna o simultánea, de la*

¹⁴ Mark D. Fairchild, “Color Appearance Models” (John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England, second edition (2005)

constitución de un organismo, p. ej., ciertos anélidos, artrópodos, etc.”. Wikipedia recoge el término “*metámero*” como cada uno de los segmentos que se repiten en ciertos grupos de 4, celomados de simetría bilateral (bilateria), considerando la metamerización como una de las principales modificaciones del celoma. Cada metámero tienen cavidades celómicas separadas de las de otros metámeros por tabiques, y las estructuras internas (ganglios nerviosos, nefridios, gónadas, etc.) y externas (patas, branquias, etc.) están repetidas en cada metámero.

En su acepción química, la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales establece el término metámero como “*cada uno de los compuestos químicos isómeros entre sí*”.

La acepción física del término “*metámero*”, queda establecida por la Real Academia de Ciencias como “*Cada uno de los estímulos luminosos con diferentes distribuciones espectrales de energía, capaces de producir en la visión foveal sensaciones idénticas de color*”, esta es la acepción sobre la que, en un contexto más amplio, trataremos de profundizar.

Recurriendo al Vocabulario Internacional de Iluminación de la CIE (Commision Internationale de L'Eclairaige)⁹ - standard S017/E:2011- se denominan “*estímulos de color metámeros*” a los estímulos de color de distribuciones espectrales que tienen los mismos valores triestímulo en un sistema colorimétrico específico. A la propiedad correspondiente se le denomina *metamerismo*.

Cabe señalar que, curiosamente, estos términos no están registrados en el diccionario de la Real Academia Española de la Lengua, y sí encontramos en Wikipedia el término “metamerismo” como un fenómeno psicofísico definido generalmente como la situación en la cual dos muestras de color coinciden bajo unas condiciones determinadas (fuente de luz, observador, geometría...) pero no bajo otras diferentes.

Fue Friedrich Wilhelm Ostwald (Riga, Letonia, 1853 - Grossbothen, 1932), químico y filósofo alemán, premio Nobel de Química en 1909 por sus estudios sobre la catálisis y los principios que rigen los equilibrios químicos, quien acuñó por primera vez el término metamerismo¹⁵. Parte de su prolífica actividad científica estuvo centrada en el estudio del

¹⁵ Ostwald W. Die Farbenlehre, Vol. 2: Physikalische Farbenlehre. Leipzig: Unesma; 1918. p111.

color dando lugar, entre otros, al conocido Sistema Ostwald de ordenación del color ¹⁶.

Surge pues, la tentativa de proponer a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, la inclusión en su Diccionario, del término metamerismo como “*el fenómeno de la visión por el cual estímulos luminosos, con diferentes distribuciones espectrales de energía, son capaces de producir idénticas sensaciones de color bajo determinadas condiciones de observación*”.

En la figura 2.a, a modo de ejemplo, se presentan diferentes distribuciones espectrales de potencia de fuentes luminosas metámeras: una lámpara de wolframio y un tubo de rayos catódicos que producen la misma sensación visual al observarlas bajo las mismas condiciones experimentales. En la figura 2.b se presentan otros casos similares para CRT, para lámpara fluorescente y para iluminante D50. En la figura 2.c fuentes de luz blanca LED e iluminantes A y D65.

¹⁶ Carl E. Foss, Dorothy Nickerson, and Walter C. Granville, “Analysis of the Ostwald Color System”, J. Opt. Soc. Am. 34(7), 361-381 (1944)

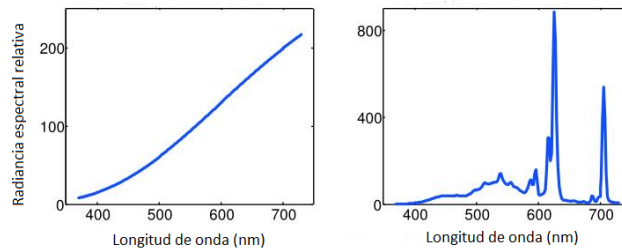


Figura 2.a. Radiancia espectral de una lámpara de incandescencia (filamento de wolframio) y de una pantalla de televisión que son observadas idénticas bajo las mismas condiciones experimentales.

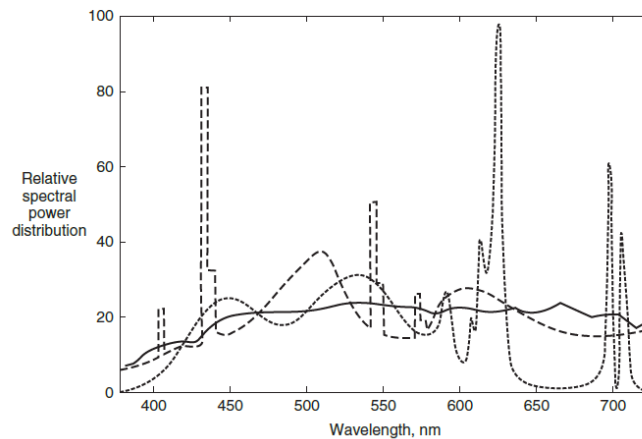


Figura 2.b. Distribuciones de potencia espectral relativa de tres grises metámeros. En trazo discontinuo mezcla de la luz emitida por los fósforos rojos, verdes y azules típicos de una pantalla de rayos catódicos (CRT). En línea punteada transparencia fotográfica iluminada por una lámpara fluorescente de temperatura correlacionada de color 5000 K. En trazo continuo un gris no selectivo iluminado por el iluminante D50¹⁷.

¹⁷ Hunt, R.W.G and Pointer, M. R, "Measuring Colour", (John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8S, United Kingdom, fourth edition (2011))

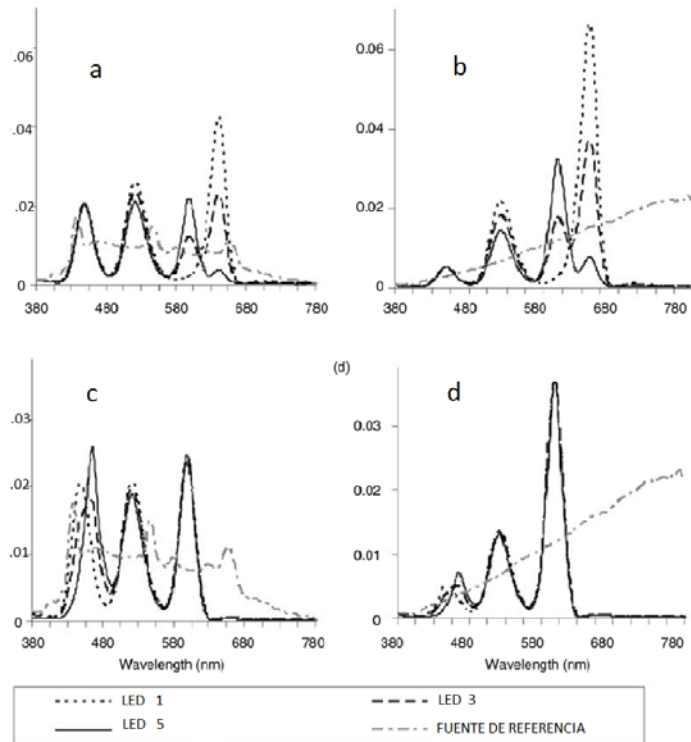


Figura 2.c. Distribuciones espectrales relativas de potencia de dos conjuntos de fuentes LEDS blancas metámeras y de las fuentes de luz blanca de referencia correspondientes. Los conjuntos de LED son metámeros con luz día (a y c) y con una lámpara de incandescencia (b y d)¹⁸.

Sobre las igualaciones de color, la trivarianza visual y el metamerismo.

El metamerismo, fenómeno visual por el cual diferentes distribuciones energéticas espectrales pueden producir la misma respuesta visual, constituye la base y el aspecto más importante de la visión del color y de la tecnología del color (sistemas de televisión, fotografía, pantallas visualizadoras,

¹⁸ Vili V et al., "LED-based metameric light sources: Rendering the colours of objects and other colour quality criteria", *Lighting Research and Technology*, 43(3):321-330 (2011)

dispositivos multimedia, artes gráficas, industria textil y de la automoción, colorantes, etc.)¹⁹. Esta propiedad es esencial y fundamenta las mezclas e igualaciones de colores sobre las que versa lo que inmediatamente sigue.

La luz blanca y los púrpuras son los únicos estímulos visuales que no existen como tales en el espectro visible. Según Le Grand²⁰, la ley fundamental de las mezclas de colores, de la que pueden derivarse las leyes de Grassmann, puede enunciarse como sigue: *los estímulos luminosos producidos por suma de dos radiaciones monocromáticas cualquiera es **metámera** con un estímulo obtenido mediante la mezcla aditiva de una luz púrpura y una luz monocromática convenientemente elegida:*

$$L_1+L_2 \equiv L_W + L_\lambda \quad [1]$$

siendo λ la *longitud de onda* dominante de la mezcla L_1+L_2 . En la expresión anterior se plasma una de las propiedades más relevantes del sistema visual: *la trivarianza visual*

¹⁹ Berns, R.S., Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, 3rd Ed., p. 66, Wiley, New York, USA (2000).

²⁰ Le Grand, Yves, "Optique physiologique. Tome II, Lumière et couleurs" , Paris (France), Masson et Cie (1972)

evidenciada experimentalmente por Helmholtz y Maxwell²¹. El primer miembro depende de cuatro variables (dos longitudes de onda λ_1 , λ_2 y dos radiancias), el segundo, que es visualmente idéntico, es función de tan solo tres variables (la longitud de onda dominante λ y las radiancias L_W y L_λ). La generalización de este comportamiento conlleva a que, en principio, puedan igualarse infinitas composiciones espectrales empleando tres variables. También es consecuencia de ello, bajo el punto de vista perceptivo, la especificación de un estímulo de color mediante el tono, la claridad y la saturación.

Las leyes de Grassmann²² establecen las bases del algebra del color (simetría, transitividad, proporcionalidad y aditividad) y regulan las mezclas de colores en un amplio abanico de condiciones experimentales; constituyen pues, la formulación teórica del comportamiento empírico del sistema visual en los procesos de igualación del color. Las igualaciones de color son la manifestación empírica más clara del metamerismo en la cual interacciona la fuente luminosa con el objeto y el observador. Resultados recientes de diferentes autores han puesto de manifiesto fallos de aditividad

²¹ Maxwell J.C., "On the Theory of Three Primary Colours", Proc. Roy. Inst. 3, 1858-52, 370-375.

²² Grassmann, H.G., "Zur theorie der farbenmischung", Annalen der Physik, 89, 69-84 (1853)

en ciertas condiciones experimentales²³. Algunos apuntan a la conjunción de tres factores como la causa principal de los fallos en las leyes de Grassmann: la falta de homogeneidad espacial en la distribución del pigmento macular, las distribuciones espacialmente diferentes de conos y un cambio en las ponderaciones de los mecanismos post-receptores que intervienen en la discriminación cromática²⁴.

Un determinado estímulo de color **C**, puede ser igualado por mezcla aditiva de tres primarios **R**, **G**, **B** de color en las cantidades **R**, **G** y **B** (ecuación tricromática).

$$C = R(\mathbf{R}) \pm G(\mathbf{G}) \pm B(\mathbf{B}) \quad [2]$$

En la ecuación tricromática [2], **C** es un color cualquiera de radiancia espectral dada y **R**, **G** y **B** son las cantidades de las luces primarias, o colores primarios **R**, **G** y **B** (figura 3). El signo “ = ” representa una igualdad metamérica, el sentido del signo “ ± ” es puramente algebraico y los tres primarios deben de cumplir que ninguno de ellos se pueda obtener como mezcla de los otros dos. El estímulo **C** puede producirse por

²³ CIE Publication 185:2009, “Reappraisal of colour matching and Grassmann’s Laws”, Commission Internationale de l’Eclairage, Vienna, Austria (2009)

²⁴Joel Pokorny, Vivianne C. Smith, and Jun Xu, “Quantal and non-quantal color matches: failure of Grassmann’s laws at short wavelengths”, J. Opt. Soc. Am. A, 29(2), 324-336 (2012)

estímulos cuya distribución espectral sea cualquiera, dentro de ciertos límites, y no por ello se perciben infinitas sensaciones. Este comportamiento del sistema visual es una clara consecuencia del **metamerismo** y una evidencia de que el sistema visual humano, a diferencia de lo que ocurre con el sentido del oído, no es “analítico” a efectos de detectar qué radiaciones espectrales intervienen en la mezcla que da origen a la sensación de color producida por el estímulo C. Empíricamente el sistema visual es un magnífico “instrumento de cero” que actúa comparativamente frente al conjunto de estímulos visuales, evaluando la sensación final independientemente de cómo se produce.

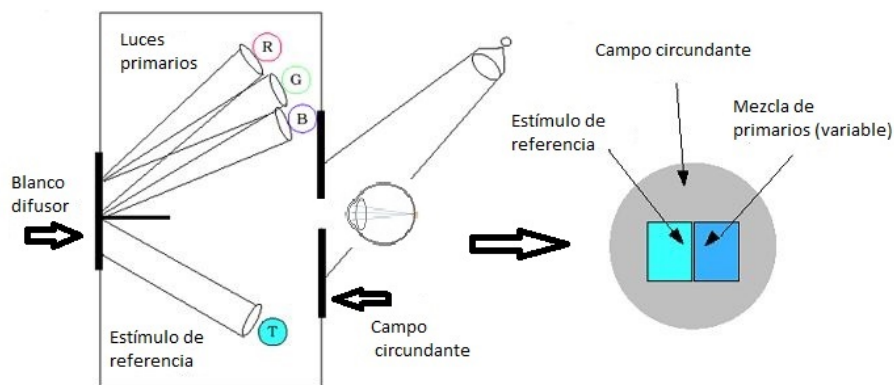


Figura 3. Esquema de un experimento de mezcla e igualación de color.

Las cantidades R, G y B son los valores triestímulo, cuyo cálculo, salvo constantes, viene dado por las expresiones:

$$R = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{r}_\lambda d\lambda$$

$$G = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{g}_\lambda d\lambda \quad [3]$$

$$B = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{b}_\lambda d\lambda$$

donde $L_{e\lambda}$ es la radiancia de los estímulos monocromáticos que componen el estímulo igualado. En el caso de objetos de color, dependiendo de su naturaleza opaca o transparente, $L_{e\lambda}$ vendrá dada por el producto de la radiancia espectral del iluminante $P_{e\lambda}$ por la reflectancia espectral o por la transmitancia espectral, respectivamente, del objeto correspondiente ($L_{e\lambda} = P_{e\lambda} \cdot \rho_\lambda$ ó $L_{e\lambda} = P_{e\lambda} \cdot \tau_\lambda$).

Las funciones \bar{r}_λ , \bar{g}_λ y \bar{b}_λ son las denominadas funciones de mezcla del color (Colour Matching Functions, CMF) , o coeficientes de igualación espectral que caracterizan la responsividad espectral del observador en los procesos de igualación del color. El establecimiento por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) de estas funciones en los llamados “observadores colorimétricos patrón” u “observadores colorimétricos de referencia”, supuso un importante avance que ha permitido el desarrollo científico de

la Colorimetría²⁵. En ellos se pretende modelizar la responsividad espectral del sistema visual humano, promediada para un amplio conjunto de observadores tricrómatas normales, en los procesos de igualación de color. Constituyen la clave en el intento de obtener, y generalizar, la relación entre un determinado estímulo visual y la respuesta al mismo por el sistema visual humano. En las ecuaciones [3] se encuentran pues, las bases de la Colorimetría. En ellas se relacionan los tres aspectos esenciales de los que depende la especificación y medida del color: la fuente luminosa, el objeto y el observador. Los valores triestímulo están a su vez relacionados con los atributos perceptivos del color: claridad tono y saturación; sus dependencias cuantitativas pueden encontrarse en la literatura específica, especialmente dentro de los diferentes modelos de apariencia del color^{13,14}.

A partir de los valores triestímulo R, G, B se definen las coordenadas de cromaticidad como:

$$r = \frac{R}{R+G+B} ; g = \frac{G}{R+G+B} ; b = \frac{B}{R+G+B} \quad [4]$$

verificándose que $r+g+b=1$.

²⁵ Colorimétrie — Partie 1: Observateurs CIE de référence pour la colorimétrie ISO/CIE 11664-1:2019(F)

Por motivos de naturaleza práctica, entre otros para obtener valores positivos de las coordenadas de cromaticidad, la CIE propuso transformaciones lineales del sistema RGB a un sistema ideal de primarios XYZ, en el cual los valores triestímulos vienen dados por:

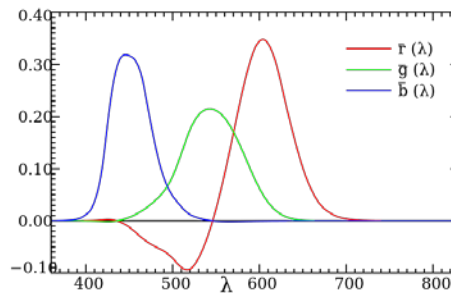
$$\begin{aligned}
 X &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda \\
 Y &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda \\
 Z &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

y las coordenadas de cromaticidad por:

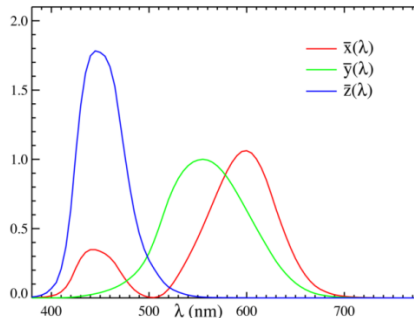
$$x = \frac{X}{X+Y+Z} ; y = \frac{Y}{X+Y+Z}
 \tag{6}$$

En la figura 4 se presentan las funciones espectrales de igualación (funciones de mezcla) en cada uno de los sistemas referidos y en la figura 5 el diagrama de cromaticidad asociado al observador de referencia CIE-1931. En este sistema de representación del color el valor triestímulo Y se corresponde con la magnitud fotométrica luminancia, quedando especificado un estímulo por los valores (x,y,Y). Posteriormente han surgido otros sistemas y espacios de

representación del color que pretenden uniformizar la métrica euclídea asociada a las diferencias de color y las elipses de discriminación cromática representativas de los umbrales diferenciales de cromaticidad²⁶. Tal es el caso de los sistemas CIELUV y CIELAB, específicamente recomendados para determinados usos, si bien todos derivan de transformaciones de los valores triestímulo XYZ expresados en las ecuaciones 5.



(a)



(b)

Figura 4. Funciones de espectrales de igualación: a) en el sistema RGB; b) en el sistema CIE-1931 (2°).

²⁶ Jiménez J.R., Hita E., Romero J and Jiménez del Barco L., “Scalar curvature of color space as a source of information of new uniformity aspects concerning to color representation systems”, J. Optics, 24 (6), 243-249 (1993).

En principio, en términos colorimétricos, la población con visión tricromática normal, debería percibir iguales aquellos estímulos que tienen idénticos valores triestímulo.

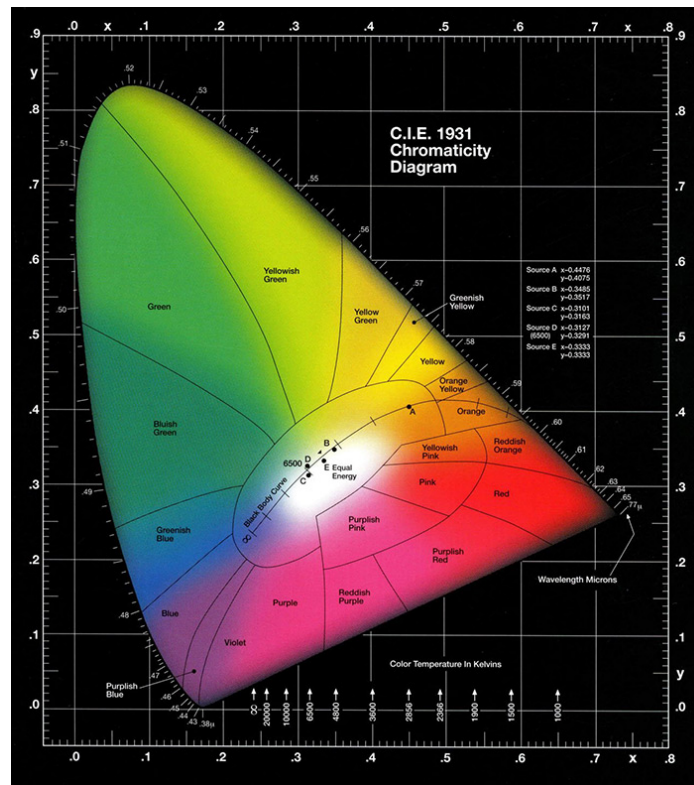


Figura 5. Diagrama de cromaticidad CIE-1931 (2°).

Cabe destacar el elevado número de posibilidades, bajo el punto de vista matemático, pero finito en la práctica, para las diferentes combinaciones de las funciones espectrales que intervienen en las ecuaciones 3 y 5 que conducen a idénticos valores triestímulo y, por lo tanto, a un mismo punto del

diagrama de cromaticidad ^{17,27}.

Las causas del metamerismo.

En la etapa receptora del sistema visual, la radiación electromagnética (380 nm-780 nm) estimula las células que componen el mosaico de fotorreceptores retinianos: los conos y los bastones. Como es bien conocido, son los conos los responsables de la visión del color, si bien, en determinadas condiciones experimentales (bajos niveles de luminancia, campos visuales periféricos) se puede presentar “intrusión” de bastones en los mecanismos de la visión del color ^{28,29,30,31}.

Las medidas realizadas mediante técnicas de microespectrofotometría, de reflectodensitometría, de

²⁷ Ibraheem N.A, Hasan, M.H., Khan R.Z., and Mishra P.K., “Understanding Color Models: A Review” ARPN Journal of Science and Technology 2 (3), 265-275 (2012)

²⁸ Tikidji-Hamburyan et al, “Rods progressively escape saturation to drive visual responses in daylight conditions”, Nature Communications (Open). DOI: 10.1038/s41467-017-01816-6), en www.nature.com/naturecommunications (2017)

²⁹ Stabell, B. and Stabell, U., “Peripheral Colour Vision: Effects of Rod Intrusion at Different Eccentricities”, Vision Res., 36 (21), pp.3407–3414 (1996)

³⁰ Jiménez del Barco L, Hita E, Romero J and Vida J., “Color-Prediction Discrepancies and Differential Chromaticity Thresholds with Photopigment Bleaching”, J. Opt. Soc. Am. "A", 5 (3), 432-437 (1988)

³¹ Pérez-Ocón F., Hita E., Jiménez del Barco L, and Nieves J.L., “Contribution to the Experimental Review of the Colorimetric Standard Observer”, Color Res. Appl., 24 (5), 377-388 (1999).

electrofisiología y con métodos psicofísicos³², ponen de manifiesto que todos los fotorreceptores poseen una sensibilidad proporcional a su absorbancia espectral. En cada uno de ellos se presenta un máximo para diferentes zonas del espectro visible: los conos tipo L tienen su máxima sensibilidad en la región de altas longitudes de onda (564 nm), los conos M en la región intermedia (534 nm), los conos S en la zona de bajas longitudes de onda (420 nm) y los bastones, activados a niveles mesópicos y escotópicos de luminancia (498 nm)^{33,34}. La densidad de distribución espacial de los mismos se encuentra aproximadamente en la relación L:M:S≅12:6:1³⁵. En la figura 6 se representa la densidad de conos y bastones en la retina y en la figura 7 una imagen pseudocolorada del mosaico de fotorreceptores.

³² Stockman A., , MacLeod D.I.A., and Johnson N.E., "Spectral sensitivities of the human cones", J. Opt. Soc. Am. A, 10 (12), 2491-2521 (1993)

³³ Bowmaker J.K. and Dartnall H.J.A., "Visual pigments of rods and cones in a human retina", J. Physiol., 298,501-511 (1980)

³⁴ Dartnall H.J.A., Bowmaker J.K. and Mollon, J.D., "Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons", Proc. R. Soc. Lond. B 220, 115-130 (1983)

³⁵ Hofer H., Carroll J., Neitz J., Neitz M. and Williams D.R., "Organization of the Human Trichromatic Cone Mosaic"., J. Neurosci., 25(42), 9669 –9679 (2005)

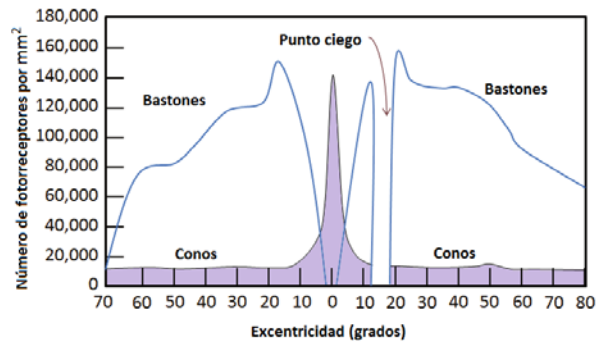


Figura 6. Distribución espacial de conos y bastones en la retina para diferentes excentricidades.

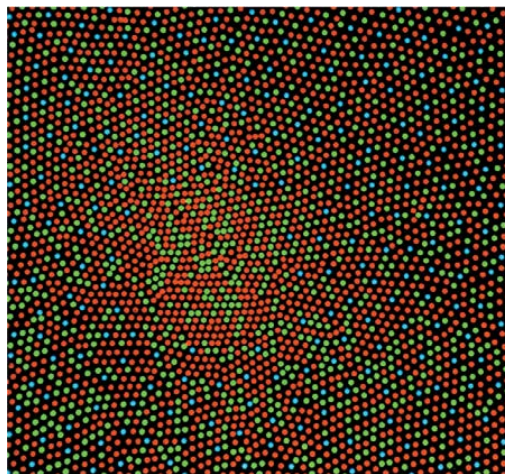


Figura 7. Mosaico de fotorreceptores de la retina humana, coloreado artificialmente para representar las proporciones relativas de los conos L (color rojo), M (verde) y S (azul). Modelado a partir de Williams et al. (1991)³⁶.

Las curvas de sensibilidad espectral de los fotorreceptores dependen de las propiedades de los fotopigmentos asociados a cada uno de ellos (cianolabe, conos S; clorolabe, conos M, eritrolabe, conos L y rodopsina en los

³⁶ Williams D.R, Sekiguchi N., Haake W., Brainard D.H., and Packer O., "The cost of trichromacy for spatial vision. In: From pigments to perception: advances in understanding visual processes" (Lee BB, Valberg A, eds), pp 11–22. New York: Plenum. (1991)

bastones).

En las figuras 8 y 9 se presentan las curvas de absorción espectral medidas por Bowmaker y Dartnall²⁵, con el ruido asociadas a su medida (figura7).

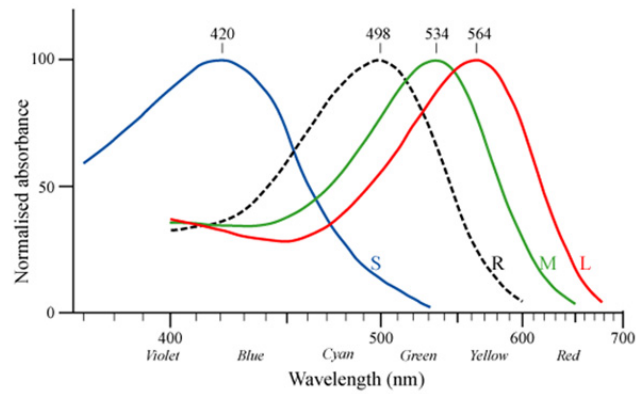


Figura 8. Curvas de absorción espectral normalizada de los fotorreceptores retinianos conos y bastones con indicación de las longitudes de onda de máxima sensibilidad.

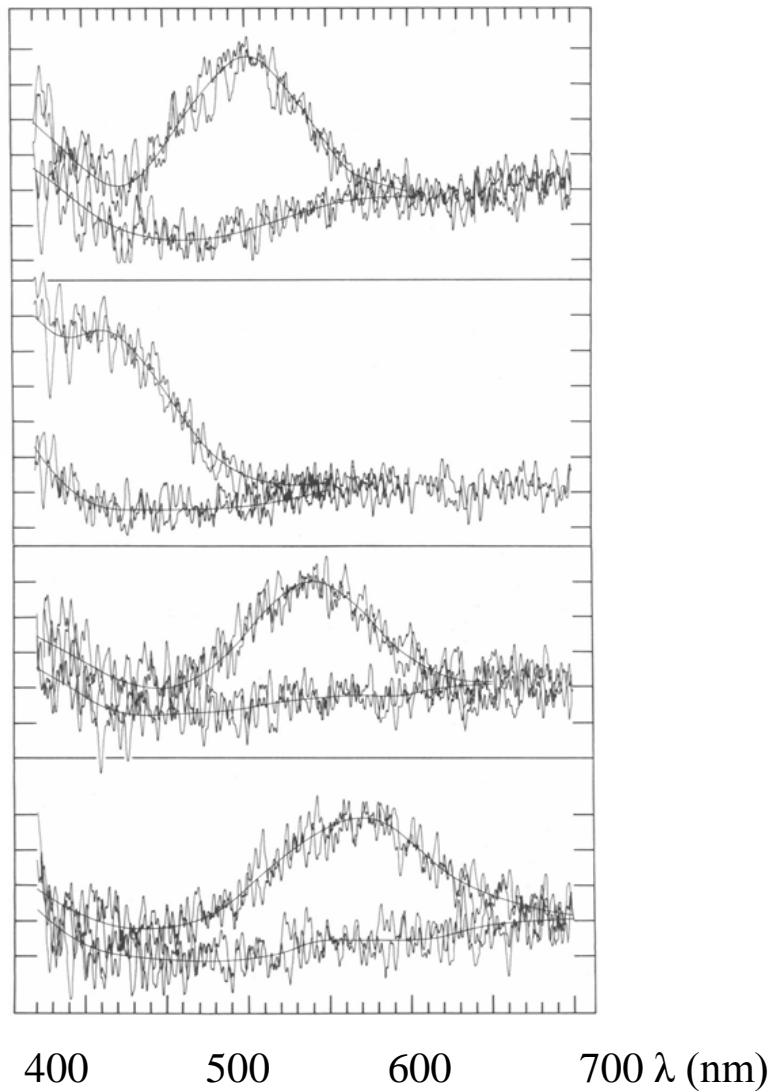


Figura 9. Registro microespectrofotométrico de las medidas de absorbancia relativa de conos y bastones (Bowmaker J.K. and Dartnall³⁰).

La respuesta espectral de los fotorreceptores - espectro de acción de conos- está representada, entre otras, en las funciones propuestas por Smith y Pokorny³⁷ (variaciones de las mismas han sido propuestas por Stockman y Sharpe³⁸):

³⁷Smith VC, Pokorny J., "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm.", *Vision Res.* 15(2), 161-71 (1975)

³⁸ Human cone spectral sensitivities: a progress report
Stockman and Sharpe, L.T., *Vision Res.* 38, 3193-3206 (1998)

$$\begin{aligned}
L(\lambda) &= 0.15514 \bar{x}_\lambda + 0.5412 \bar{y}_\lambda - 0.03286 \bar{z}_\lambda \\
M(\lambda) &= 0.15514 \bar{x}_\lambda + 0.4584 \bar{y}_\lambda - 0.03286 \bar{z}_\lambda \\
S(\lambda) &= 0.00801 \bar{z}_\lambda
\end{aligned}
\tag{7}$$

donde \bar{x}_λ , \bar{y}_λ y \bar{z}_λ son las funciones de mezcla de Judd, modificadas por Vos, verificándose que la función de eficiencia luminosa viene dada por:

$$L(\lambda) + M(\lambda) = V(\lambda) \tag{8}$$

Hasta la fecha se han propuesto diferentes modificaciones de las funciones de mezcla con objeto de ajustar mejor su comportamiento a diferentes condiciones experimentales y para determinadas regiones espectrales³⁹. En la figura 10 se presenta la sensibilidad espectral logarítmica de los conos L, M y S implementada en diferentes modelos actuales de visión del color basados en la excitación de conos y en las teorías de canales oponentes.

³⁹ Lindsay T. Sharpe, Andrew Stockman, Wolfgang Jagla and Herbert Jägle, "A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation", *Journal of Vision*, 5(3), 948-968 (2005)

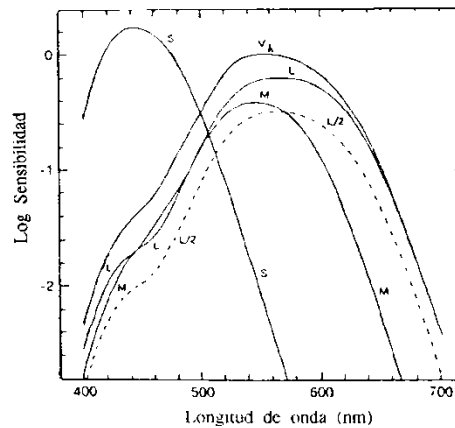


Figura 10. Curvas de sensibilidad espectral en el espacio de excitación de conos.

En el espacio de excitación de conos, las señales de los mismos vienen dadas por las ecuaciones [9]:

$$\begin{aligned}
 L &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L(\lambda) P(\lambda) d\lambda \\
 M &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} M(\lambda) P(\lambda) d\lambda \\
 S &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L(\lambda) P(\lambda) d\lambda
 \end{aligned}
 \quad [9]$$

donde $L(\lambda)$, $M(\lambda)$ y $S(\lambda)$ provienen de las ecuaciones [7] y $P(\lambda)$ representa la radiancia espectral del estímulo.

La sensibilidad espectral juega un papel fundamental en el proceso fotoquímico de transducción luminosa – fototransducción- que se produce en la retina para transmitir las señales excitatorias a niveles neuronales superiores y dar lugar a la correspondiente sensación visual. La estimulación de la rodopsina de los bastones y las opsinas de los conos activan

una compleja cascada de reacciones enzimáticas y bioquímicas como respuesta a la luz, induciendo el cierre de los canales catiónicos de las membranas de los fotorreceptores ⁴⁰.

En esta temática, de indudable interés para la comprensión biológica del fenómeno de la visión, es muy recomendable la lectura de la obra de James T. Fulton⁴¹ sobre los procesos biológicos de la visión y la electroquímica de las neuronas, así como los trabajos de George Wald por sus contribuciones a la fotoquímica de la visión que le hicieron merecedor del Premio Nobel en 1968⁴², cuya amplitud sobrepasa la extensión que ocupa este discurso.

Una de las consecuencias más relevantes de la fototransducción es el *Principio de Univarianza* establecido por Rushton ⁴³ y fisiológicamente confirmado por Dennis Baylor ⁴⁴, quienes midieron las respuestas eléctricas en conos de primates. El principio de univarianza establece que una

⁴⁰ Burns M.E. and Arshavsky, V.Y., "Beyond Counting Photons: Review Trials and Trends in Vertebrate Visual Transduction", *Neuron*, Vol. 48, 387–401 (2005)

⁴¹ Fulton J.T., "Processes in Biological Vision", edición on-Line publicado en <http://neuronresearch.net/vision> (2006)

⁴² Wald, G., "Molecular Basis of Visual Excitation", *Science*, Vol. 162, Issue 3850, pp. 230-239 (1968)

⁴³ Rushton A.H., "Review Lecture: Pigments and signals in colour vision", *J. Physiol.*, 220, Pp. 1-31 P (1972)

⁴⁴ Baylor D.A., "Photoreceptor signals and vision. Proctor lecture.", *Invest Ophthalmol Vis Sci.*, 28(1), 34-49 (1987)

misma célula receptora visual puede ser excitada de igual forma por diferentes distribuciones espectrales (diferentes radiancias y longitudes de onda), de modo que el cerebro no puede conocer el color de un determinado punto de la imagen retiniana. En términos del modelo corpuscular, un fotorreceptor es esencialmente un “contador” sofisticado de fotones, cuya salida varía según el número de fotones que absorbe, independientemente de sus longitudes de onda⁴⁵. Por lo tanto, un solo tipo de fotorreceptor no puede diferenciar entre un cambio en la longitud de onda y un cambio en la intensidad. Es decir, la información asociada a la longitud de onda solo se puede extraer comparando las respuestas a través de diferentes tipos de receptores.

La teoría de la visión del color de Young puede, pues, expresarse en términos de los pigmentos de los conos: *“hay tres clases de conos, cada una con un pigmento visual diferente. La señal de salida de cada cono es univariante, dependiendo simplemente de la captura cuántica de su pigmento. Nuestra sensación de color depende de las proporciones de estas tres señales de salida de los conos”*³².

⁴⁵ Stockman A. and Sharpe L., “Color Vision: From Genes to Perception”, Cambridge University Press, chap. *Cone spectral sensitivities and color matching*, pp. 53–88. Cambridge, (2001)

Por tanto, si los estímulos visuales asociados a dos igualaciones o mezclas de color, conllevan el mismo número de cuantos de luz para los conos L, y también para los conos M y para los S, entonces las entradas serán idénticas en cuanto a la cantidad capturada por cada cono, y por lo tanto, según el principio de univariancia, los resultados deben ser iguales y el ojo no tiene medios para distinguir entre estas mezclas de luces.

Para ilustrar lo dicho, siguiendo a Hunt y Pointer¹⁷, sean dos estímulos cuyas distribuciones relativas de radiancia espectral corresponden con una muestra N de un gris no selectivo, iluminada con una lámpara de wolframio, y la misma muestra P con otro iluminante y que son metámeras respecto del observador patrón CIE-1931. En la figura 11 se presentan dichas muestras junto con las curvas de sensibilidad espectral de los conos L, M y S (líneas discontinuas).

La radiancia espectral del estímulo P es mayor que la del estímulo N en la región de altas longitudes de onda de la banda ancha de los conos L y más pequeña en las λ cortas de esa misma banda, por lo que el efecto total del estímulo P en los conos S, podría ser el mismo que el del estímulo N. De igual manera ocurre para el estímulo P y del mismo

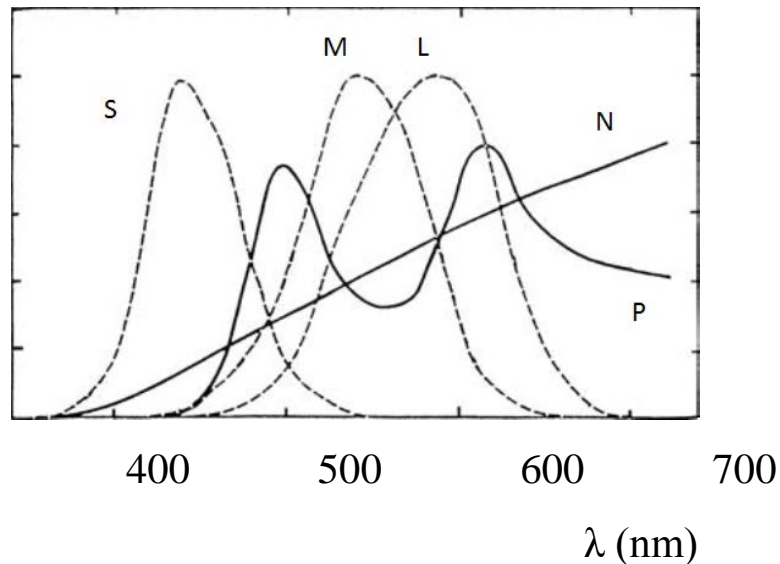


Figura 11. En línea continua las distribuciones de potencia espectral relativa de dos estímulos N y P que son metámeros para el observador colorimétrico estándar CIE 1931. En líneas discontinua las sensibilidades representativas de los tres tipos de conos, L, M y S de la retina del ojo.

modo, en la banda correspondiente a los conos M, la menor radiancia espectral del estímulo P en la zona de altas longitudes de onda, podría compensarse con su mayor valor en la zona de menor longitud de onda dentro de esa misma banda. En el caso de la banda asociada a los conos S, la mayor radiancia de P en la zona de altas λ , de esa misma banda, podría compensarse con su menor valor en la zona de bajas longitudes de onda. Por lo tanto, los estímulos N y P podrían coincidir entre sí a pesar de sus grandes diferencias en composición espectral. En términos colorimétricos, los valores X, Y, Z (ecuación 5) correspondientes a cada uno de los estímulos, serán idénticos. A los estímulos que cumplen dicha condición se les denomina estímulos metámeros.

Para que se produzca la igualdad de respuestas por los conos L, M y S a partir de dos distribuciones espectrales diferentes, es necesario que sus curvas de radiancia presenten, al menos, un punto de cruce con cada una de las bandas a las que son sensibles los conos. Las posiciones de los cruces dependerán de las composiciones espectrales de los estímulos involucrados⁴⁶. Esta misma condición ha de cumplirse respecto de las funciones de mezcla tratadas anteriormente. En este sentido, no basta con que un par metámero verifique las igualdades de sus valores triestímulo dados por las ecuaciones 3 y 5 (condición meramente matemática en el sentido de que sean iguales las áreas bajo las curvas del producto que interviene en el integrando de dichas ecuaciones), lo que llevaría a infinitas posibilidades, sino que deberá de haber, al menos, tres intercepciones entre las funciones relacionadas con la sensibilidad espectral de los conos⁴⁶.

Como apunta Fulton⁴¹, consecuencia de las propiedades de linealidad y aditividad de los mecanismos de la visión, los estímulos metámeros se han definido tradicionalmente en el contexto psicofísico que es el marco de la Colorimetría básica, es decir, espacios de color CIE e igualdad de los valores triestímulo (metámeros “psicofísicos”). Sobre el metamerismo

⁴⁶ Berns, R.S., and Kuehni, R.G., “What determines crossover wavelengths of metameric pairs with three crossovers?”, *Color Res Appl.*, 15, 23–28 (1990)

psicofísico tratan ampliamente Wyszecki y Stiles en su obra *Color Science*⁴⁷.

Frente a los metámeros “psicofísicos”, hay estímulos que con diferentes distribuciones de energía radiante se perciben visualmente idénticos a pesar de no presentar los mismos valores triestímulos, dando cabida a los llamados metámeros “perceptuales”. Thornton⁴⁸ demostró que los metámeros psicofísicos no tienen por qué ser metámeros perceptuales y viceversa, de hecho, como trataremos de forma breve más adelante, esto puede suceder en determinadas condiciones experimentales. Una clara evidencia de esto último es la limitación del sistema visual humano para discriminar estímulos de color que psicofísicamente difieran poco debido a la capacidad de discriminación cromática, así como a determinadas desviaciones de las leyes de Grassmann en ciertas condiciones experimentales mencionadas anteriormente²⁸. Los resultados obtenidos en nuestro laboratorio son una evidencia de los metámeros perceptuales, tomando mayor sentido este concepto cuando se presentan fallos de aditividad en las leyes de Grassmann y respuestas no lineales de los fotorreptores producidas por estímulos que

⁴⁷ Wyszecki G. and Stiles W.S., “Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae”, Wiley-Interscience, 2 edition, Wiley (2000)

⁴⁸ Thornton W. “Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part 1. Introduction” *Color Res Appl.* 17(2), 79-122 (1992)

presentan un alto grado de metamerismo debido a distribuciones espectrales muy diferentes y bajos niveles de luminancia, como generalmente sucede en los colorímetros visuales^{29,49,50,51} .

Tipos de metamerismo.

Teniendo en cuenta las variables que intervienen en las expresiones de los valores triestímulo (ec. 3 y 5), se puede llegar a la igualdad de los mismos tanto para diferentes iluminantes, diferentes objetos, distintos observadores e incluso geometrías y condiciones de observación, lo que conduce a considerar distintos tipos de metamerismo.

Así, cuando sucede que

$$\begin{aligned}
 X &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L'_{e\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda \\
 Y &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L'_{e\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

⁴⁹ Hita E., Jiménez del Barco L. , Romero J. y Corrons A., “Análisis colorimétrico del Observador Patrón CIE-1931” Opt. Pur. Apl., 21 (1), 13-25 (1988)

⁵⁰ Hita E., Jiménez del Barco L. and Romero J. “Differential thresholds of color from metameric matches: experimental results concerning failures of colorimetric additivity”, J. Opt. Soc. Am. "A", 3 (8), 1203-1209 (1986)

⁵¹ Pérez-Ocón F, Hita E, Jiménez del Barco L. and Díaz J.A., “Colorimetric implications of the standard observer (20) in metameric matches”. J. Opt. 29, 311-323 (1998)

$$Z = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{z}_\lambda d\lambda = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L'_{e\lambda} \bar{z}_\lambda d\lambda$$

con $L_{e\lambda} \neq L'_{e\lambda}$, hablamos de *iluminantes metámeros* ó *metamerismo de iluminante*, siendo $L_{e\lambda}$ y $L'_{e\lambda}$ las distribuciones de radiancia espectral resultantes de iluminar un mismo objeto con dos fuentes diferentes. En la figura 2 se presentaron gráficamente algunos ejemplos de este tipo de metamerismo.

Sin lugar a duda, uno de los tipos de metamerismo más trascendente por su importancia en diferentes sectores industriales es el *metamerismo de objeto*, que da lugar a pares ó conjuntos metaméros bajo un cierto iluminante. En este caso, dos superficies de materiales diferentes, caracterizados por sus curvas reflectancia espectral ρ_λ y ρ'_λ dan lugar a idénticos valores triestímulo, tomando $L_{e\lambda}$ y $L'_{e\lambda}$, para cada objeto respectivamente, los valores:

$$\begin{aligned} L_{e\lambda} &= P_{e\lambda} \cdot \rho_\lambda \\ L'_{e\lambda} &= P_{e\lambda} \cdot \rho'_\lambda \end{aligned} \quad [11]$$

donde $P_{e\lambda}$ representa la distribución espectral de potencia de la fuente luminosa. La base fisiológica del mismo reside en que las funciones de reflectancia espectral de los dos estímulos, a

pesar de diferir, las diferencias no son importantes con respecto a las funciones de mezcla del observador, quedando compensadas cuando se integra con la distribución de potencia espectral del iluminante. En la figura 12, se muestran las funciones de reflectancia espectral de tres objetos que son metámeros para luz día (iluminante D65).

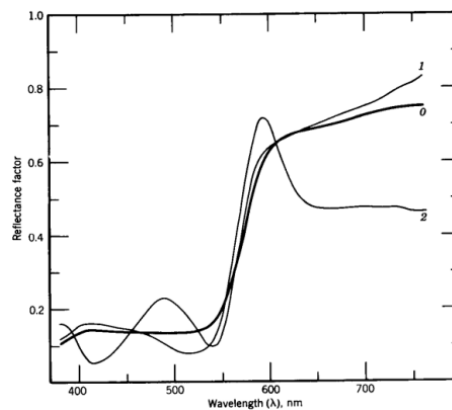


Figura 12. Curvas de reflectancia espectral de tres objetos metámeros iluminados con luz día (iluminante D65).

Son múltiples los métodos computacionales^{52,53,54,55} desarrollados en las últimas décadas que pretenden generar

⁵² Finlayson G.D. and Peter Morovic P. , “Metamer sets”, J. Opt. Soc. Am. A 22 (5) , 810-819 (2005)

⁵³ N. Ohta and G. Wyszecki, “Theoretical chromaticity mismatch limits of metamers viewed under different illuminants,” J. Opt. Soc. Am. 65, 327–333 (1975)

⁵⁴ G. D. Finlayson G.D. and Morovic P., “Metamer crossovers of infinite metamer sets,” in Proceedings of the IS&T/SID Eighth Color Imaging Conference (The Society of Imaging Science and Technology, Springfield), pp. 13–1, .(2000)

⁵⁵ R. S. Berns R.S., Billmeyer F., and Sacher R.S.:, “Methods for generating spectral reflectance functions leading to color constant properties,” Color Res. Appl. 10, 73–83 (1985)

funciones de reflectancia espectral para la obtención de objetos metámeros bajo diferentes iluminantes y contribuir a la formulación y síntesis de nuevos pigmentos de color⁵⁶ empleados tanto en la elaboración de nuevos materiales de productos de diversa índole, así como en las nuevas tecnologías de imagen en pantallas visualizadoras.

El *metamerismo de observador* se presenta cuando se verifican las ecuaciones 3 y 5 para observadores que presentan diferencias en sus funciones de mezcla (Colour Matching Functions, CMF en adelante), en cuyo caso:

$$\begin{aligned}
 X &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{x}'_{\lambda} d\lambda \\
 Y &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{y}'_{\lambda} d\lambda \\
 Z &= \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \bar{z}'_{\lambda} d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Hoy también se suele hablar de *metamerismo geométrico* relativo a diferentes geometrías de iluminación (d:0 ; 45:0), de especial importancia en la industria cuando se emplean

⁵⁶ McLaren, K. "The Colour Science of Dyes and Pigments", 2d ed. Bristol, Eng., Adam Hilger (1986)

pigmentaciones metálicas y perladas, campo este en el que se trabaja intensamente para llegar a establecer normas y recomendaciones en la medida de la función de distribución bidimensional de reflectancia (BRDF)⁵⁷. El *metamerismo instrumental* y el *metamerismo de tamaño de campo*, también son objeto de estudio en múltiples trabajos de investigación.

Es frecuente encontrar en la literatura una cierta falta de precisión en la terminología empleada para describir cada tipo de metamerismo, llegando a confundir el fenómeno en sí con el efecto que se produce al cambiar las condiciones de observación de los estímulos metámeros, e incluso con la constancia o inconstancia del color. En lo que sigue nos ceñiremos principalmente al metamerismo de objetos y de observador, si bien, el primero se describe en gran parte de la literatura como metamerismo de iluminante.

Sobre la ruptura de las igualaciones metámeras.

En la definición de metamerismo se enfatiza sobre el hecho de que la igualdad de sensación visual se produce bajo determinadas condiciones experimentales. En esto último radica uno de los principales problemas del metamerismo: la

⁵⁷Kim D.B., Jang I.Y., Han, Choi H.K. and Lee, K.H., “Recovery and Representation of Spectral Bidirectional Reflectance Distribution Function from an Image-Based Measurement System”, *Color Res Appl.* 41(4), 358-371 (2016)

ruptura de las igualaciones cuando cambian las condiciones experimentales de observación. Esta situación no es extraordinaria en los contextos en los que se aplica esta propiedad visual. Así, en el caso de metamerismo de iluminante, cuando varía la reflectancia espectral del objeto para el cual dos iluminantes producen los mismos valores triestímulo, deja de producirse la misma sensación visual para una superficie diferente. Ello se produce porque, en este caso, son significativas las diferencias entre la distribución de potencia espectral del iluminante que rompe la igualación y la responsividad espectral del observador. Sucede de igual manera con las funciones de reflectancia espectral cuando en un par de objetos metámeros cambia el iluminante y/o el observador, la igualación no permanece invariante.

En la figura 13 se presentan las curvas de reflectancia espectral de un par de objetos que son metámeros bajo luz día (iluminante estándar CIE D65). Puede observarse cómo se rompe la igualación al ser iluminados con una lámpara de incandescencia (iluminante estándar CIE A). La diferencia de color psicofísico está expresada en términos de sus coordenadas de cromaticidad en el espacio CIELAB de coordenadas (L^* , a^* , b^*).

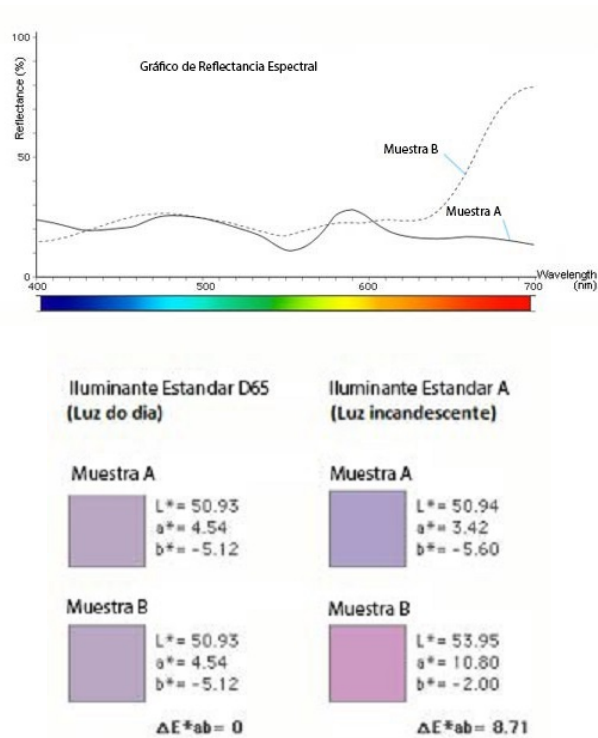


Figura 13. Par metámero bajo iluminante D65. La igualación se rompe al iluminar con luz incandescente (iluminante A).

En la figura 14 se presentan imágenes de dos esferas construidas con materiales lambertianos muy diferentes, como así muestran sus curvas de reflectancia espectral, presentadas en cabinas de iluminación con diferentes iluminantes. Para el iluminante D65 las dos esferas son objetos metámeros y producen los mismos valores triestímulo y sensación de color. Al ser iluminadas con una lámpara de descarga de vapor de sodio (máxima emisión entorno a 590 nm), la esfera de la izquierda aparece menos luminosa debido a la caída de su reflectancia en torno a 590 nm. En ambas figuras se pueden observar los cruces que presentan las curvas de reflectancia.

Lo comentado se traduce en serios problemas en distintos procesos industriales de fabricación de materiales coloreados en los que se pretende que la apariencia de color de los productos se mantenga en diferentes situaciones, principalmente bajo diferentes iluminantes. De aquí surgen diferentes necesidades y emplazamientos desde el sector industrial a la investigación científica con objeto de cuantificar el problema y encontrar soluciones que lo minimicen.

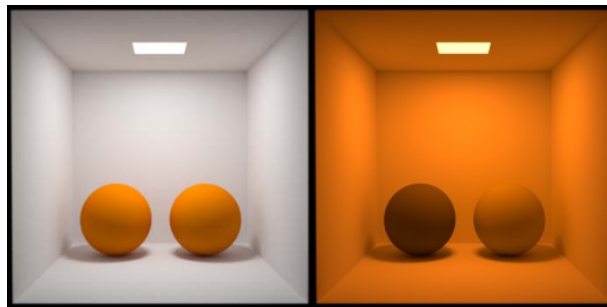
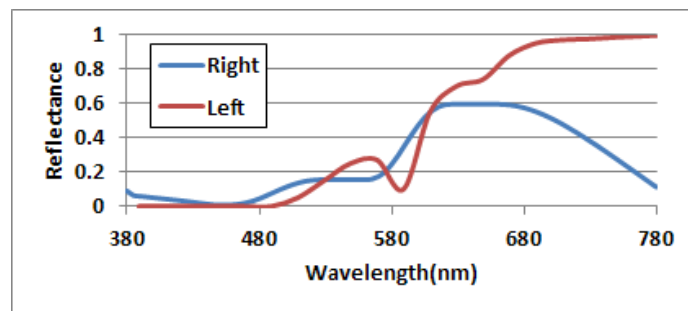


Figura 14. Reflectancias espectrales de dos esferas lambertianas diferentes bajo iluminante D65 (izquierda) y bajo una lámpara de descarga de vapor de Na (derecha). (<https://www.eclat-digital.com/2013/02/22/metamerism/>).

Al no permanecer invariante el color percibido se plantea pues, la necesidad de evaluar las diferencias de color con una

formulación adecuada que permita correlacionar la diferencia psicofísica medida con la diferencia de sensación visual. En esta línea de trabajo, se han propuesto diferentes tipos de índices que pretenden medir el grado de metamerismo, que van desde los índices generales que evalúan diferencias en la composición espectral de los estímulos^{58,59,60}, hasta los índices de metamerismo especiales recomendados por la Comisión Internacional de Iluminación^{61,62} que evalúan las diferencias de color de pares metámeros cuando cambia el iluminante y el observador.

Paralela a esta línea de actuación, se ha desarrollado el cálculo de metámeros que estén teóricamente comprendidos dentro de las tolerancias de color admitidas según distintas fórmulas de diferencia de color, así como el cálculo del volumen de los mismos en diferentes espacios de representación del color. Esto último, que es un mero problema computacional, va acompañado del desarrollo de algoritmos y métodos para la generación de reflectancias como

⁵⁸ Nimeroff, I., and J. A. Yurow, "Degree of metamerism". *Journal of the Optical Society of America*, 55, 185-90 (1965)

⁵⁹ Allen, E., "An index of metamerism for observer differences." In: *Proceedings of the 1st AIC Congress, Color 69*, Musterschmidt, Göttingen, 771-784 (1970)

⁶⁰ Jiménez del Barco L., Hita E. and Romero J., "Chromaticity differential thresholds and general metamerism indexes", *J. Optics*, 17 (5), 247-254 (1986)

⁶¹ CIE, "Colorimetry," 3rd ed., CIE Publication 15:2004 (CIE Central Bureau, 2004)

⁶² Billmeyer FW Jr. "Notes on indices of metamerism". *Color Res. Appl.* 16, 342-343 (1991)

paso previo a la formulación de nuevos pigmentos y colorantes (descomposición en valores singulares, análisis de componentes principales y de componentes independientes, entre otros) ^{5,47,52-55}.

Uno de los aspectos más controvertidos y problemáticos dentro de la Colorimetría y del metamerismo, como propiedad del sistema visual que la fundamenta, es el metamerismo de observador. Cuando un par metámero para un determinado observador, es percibido por otro observador diferente, puede que éste no mantenga la igualdad del primero. En términos colorimétricos puede ocurrir cuando una igualdad está referida al patrón CIE-1931, recomendado para campos visuales entre dos y cuatro grados, y se compara el estímulo igualado con el observador CIE-1964 establecido para campos de hasta diez grados. Hablar en este caso de metamerismo observador es correcto, si bien sería más apropiado, como refería con anterioridad, de metamerismo de tamaño de campo. Lo más habitual es que lo comentado acontezca cuando se comparan resultados empleando diferentes conjuntos de funciones de mezcla establecidas en la literatura, o bien cuando hay fuertes desviaciones de las funciones de mezcla de un sujeto con visión tricromática normal, respecto de los valores medios que fijan los observadores patrón.

Son múltiples los factores que pueden influir en el metamerismo de observador. Las casusas principales van desde las argumentadas anteriormente en el cuestionamiento por diversos autores de las funciones de mezcla establecidas en el observador patrón CIE-1931, hasta, lo que es más importante, la variabilidad intra e interindividual de las mismas para un sujeto en particular.

El patrón CIE-1931 se estableció a partir de las medidas realizadas por Wright⁶³ y por Guild⁶⁴ en dos experimentos diferentes, empleando el primero primarios cuasi-monocromáticos y, el segundo, primarios de amplio ancho de banda. Mediante una matriz de transformación lineal pueden referirse los datos experimentales de un caso a los de otro, lo que permitió a la CIE unificar los mismos y realizar las transformaciones correspondientes para no trabajar con valores negativos de las coordenadas de cromaticidad, junto a que el valor triestímulo Y coincidiera con la función de eficiencia luminosa V_λ . Sorprendentemente aún está en debate la validez de estas decisiones y diversas investigaciones han sugerido que la respuesta espectral del sistema visual humano

⁶³ Wright WD., "A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours", *Trans. Opt. Soc.*, 29; 30:141–161 (1928)

⁶⁴ Guild J., "The colorimetric properties of the spectrum", *Phil Trans. Roy Soc.* 230: 149–187 (1931)

no queda bien representada en dichas funciones de mezcla. No obstante, Shaw y Fairchild ⁶⁵, tras evaluar las funciones de mezcla del patrón CIE-1931 con pares metámeros, concluyen que el mismo funciona aceptablemente bien en comparación con otras investigaciones más recientes y que el problema del metamerismo de observador es más preocupante que la precisión del observador colorimétrico estándar CIE 2⁰.

En 1964, empleando los experimentos de Stiles y Burch⁶⁶ y de Speranskaya⁶⁷, la CIE recomendó para aplicaciones que involucran a campos de hasta 10⁰, un conjunto alternativo de funciones de mezcla, el observador patrón suplementario CIE-1964. En la década de los ochenta, diversos investigadores intentaron^{68,69} evaluar el alcance del metamerismo de observador a partir del experimento de Stiles y Burch, dando lugar al observador patrón desviado CIE-1989^{70,71}, cuya función es su empleo en las fórmulas de

⁶⁵ Shaw M., Fairchild M., "Evaluating the 1931 CIE Color-Matching Functions", *Color Res. and Appl.* 27 (5), 316-329 (2002)

⁶⁶ Stiles W. and Burch J., "NPL colour-matching investigation: final report", *Journal of Modern Optics* 6, 1-26 (1959)

⁶⁷ Speranskaya N.I., "Determination of spectral color coordinates for twenty-seven normal Observers", *Optics and Spectroscopy* 7, 424-428 (1959)

⁶⁸ Nayatani, Y., Hashimoto K., Takahama K., and Sobagaki H., "Comparison of methods for assessing observer metamerism", *Color Res. and Appl.*, 10, 147-155 (1985).

⁶⁹ N. Ohta N., "Formulation of a standard deviate observer by a nonlinear optimization technique", *Color Res. and Appl.*, 10, 156-164 (1985).

⁷⁰ CIE Publ. No. 80 "Special metamerism index: observer metamerism", Vienna: CIE Central Bureau; 1989.

diferencia de color que ocurren cuando diferentes observadores reales hacen una igualación de colores cuya visión del color se clasifica como normal. En la figura 15 se muestran las desviaciones de las CMF de Stiles y Burch.

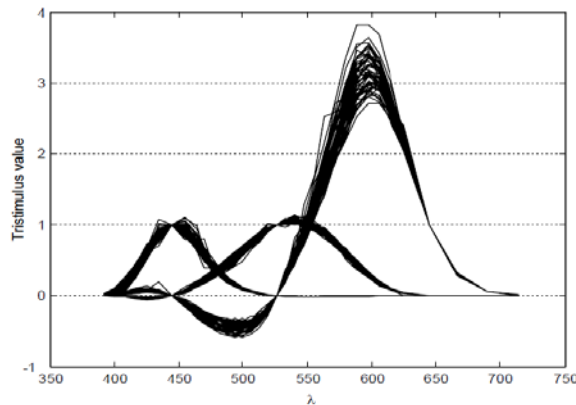


Figura 15. Funciones de mezcla del color (CMF), \bar{r}_λ , \bar{g}_λ , \bar{b}_λ de los 49 observadores del experimento de Stiles y Burch⁶⁶.

Los principales factores fisiológicos que son fuentes de variabilidad en las funciones de mezcla son la densidad óptica del cristalino, que depende fuertemente de la edad, la pigmentación macular, cuya influencia varía con el tamaño y excentricidad de los estímulos, la densidad óptica de los fotorpigmentos retinianos, la variabilidad en la longitudes de onda de máxima absorción de los fotorpigmentos debido al

⁷¹ Martínez J.A., Pérez-Ocón F., García-Beltrán A. and Hita E. “New Deviate Observer (JF-DO) Obtained from Experimental Color-Matching Functions for Small Fields of Real Observers”, Color Res Appl. 28 (3), 209-215 (2003)

polimorfismo genético, y la intrusión de bastones en la visión del color a niveles escotópicos de luminancia y campos superiores a 2^0 .

Hacia nuevos caminos en la Colorimetría.

Tras décadas de investigaciones ad hoc sobre metamerismo de iluminante y de observador, el desarrollo de nuevas fuentes de iluminación LED y de nuevos materiales, está originando importantes innovaciones en la Fotometría, lo que, junto a los resultados de variabilidad interindividual de las CMF, ha conducido a que prosperen los trabajos del Comité Técnico de la CIE TC 1-36 para la aplicación colorimétrica de los conos fundamentales^{72,73}. Las bases de partida son precisamente los datos de Stiles y Burch, tratados fisiológicamente con las causas de variabilidad de las CMF comentadas anteriormente, y las sensibilidades espectrales estimadas por Stockman y Sharpe⁷⁴. El resultado es una propuesta de modelización de los conos fundamentales para observadores tricrómatas normales, campos visuales que van

⁷² Los conos fundamentales son las sensibilidades espectrales de los conos L, M y S resultantes del producto de las absorciones espectrales de los fotopigmentos por la transmitancia espectral de los medios oculares.

⁷³ Stockman, Andrew, "Cone fundamentals and CIE standards", *Current Opinion in Behavioral Sciences* 30, 87–93 (2019).

⁷⁴ Stockman A. and Sharpe L.T., "The spectral sensitivities of the middle and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype", *Vision Research* 40, 1711–1737 (2000).

desde 1° a 10° y poblaciones con diferentes edades⁷⁵, que ha sido validada recientemente mediante mediciones y métodos microespectrofotométricos. Nos encontramos pues, en una década apasionante con el impulso hacia una Colorimetría Fisiológica^{76,77} reconocida en la propuesta de diagramas de cromaticidad basados en el espacio de excitación de conos (ejes fisiológicos) que puede innovar enormemente el campo de la colorimetría convencional: el sistema CIE 2015. En la figura 16 se presentan los conos fundamentales referidos. En la figura 17 se presenta el espacio de color fisiológico, basado en el diagrama de cromaticidad de MacLeod y Boynton⁷⁸ y los conos fundamentales L, M y S publicado hace relativamente poco tiempo por Françoise Viénot⁷⁷.

⁷⁵ CIE 170-1:2006 Part I: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes

⁷⁶ CIE 170-2:2015 Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 2: Spectral Luminous Efficiency Functions and Chromaticity Diagrams

⁷⁷ Viénot, F., “Cone fundamentals: A model for the future of colorimetry”, *Lighting Res. Technol.* 48, 5-13 (2016)

⁷⁸ Donald I. A. MacLeod, D.I.A. and Robert M. Boynton R.M. “Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance”, *J. Opt. Soc. Am.*, 69, (8), 1183-1186 (1979)

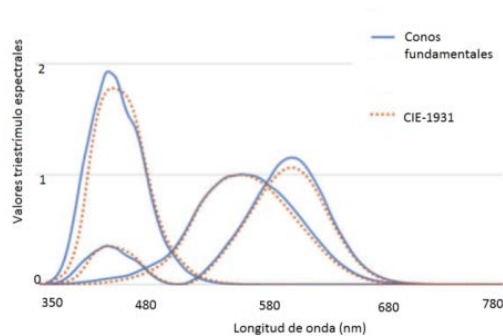


Figura 16. Comparación de las CMF basadas en los conos fundamentales y en el observador patrón CIE-1931⁷⁷.

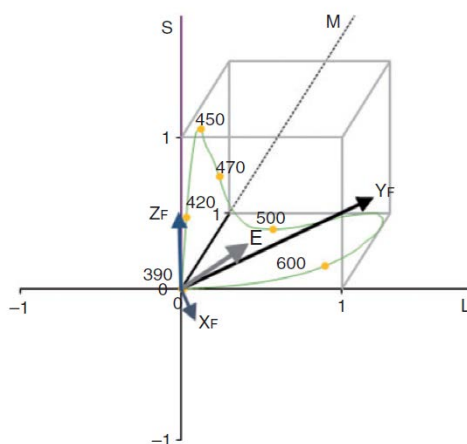


Figura 17. Ilustración de los principios que guían el diagrama de cromaticidad basado en los conos fundamentales y primarios X_F , Y_F , Z_F . E representa el blanco equienergético ⁷⁷.

En la figura 18 se presentan las funciones de mezcla del color obtenidas por Wold y Farup⁷⁹, siguiendo el informe del TC1-36 de la CIE, y en la figura 19 las variaciones de parte del lugar espectral del diagrama de cromaticidad para campos visuales de 2° a 10° y una edad de 32 años.

⁷⁹ Wold, J.H. y Farup I, Age- and field-size-parameterized calculations of physiologically significant XYZ colour-matching functions. In ISCC 2007

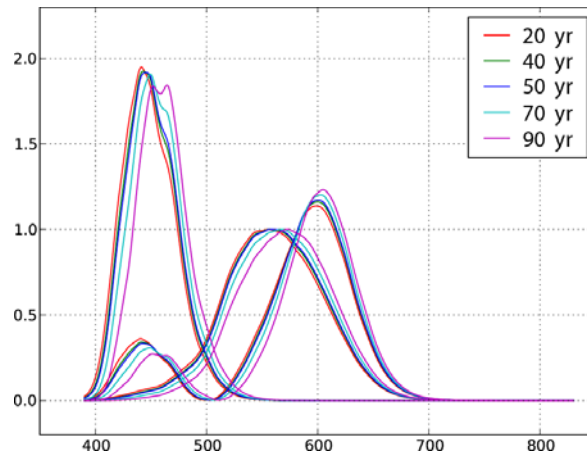


Figura 18. CMF obtenidas con conos fundamentales para campos visuales de 2° y edades comprendidas entre los 20 y 90 años.

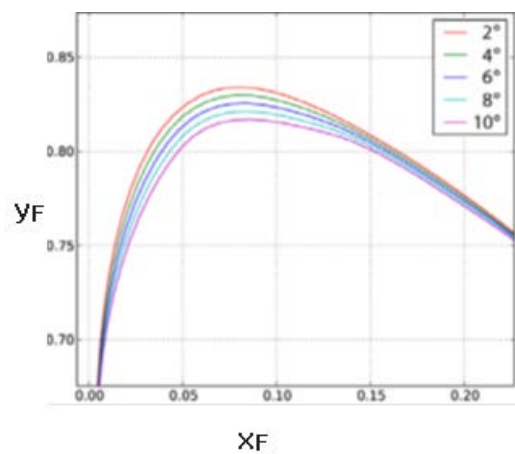


Figura 19. Región del lugar espectral del diagrama de cromaticidad con conos fundamentales para campos visuales de 2° a 10° y una edad de 32 años.

Compartiendo con Françoise Viénot⁷⁷ y citando parte de sus conclusiones y perspectivas: *“La publicación CIE 170-1:2006 proporciona información a la comunidad científica sobre un conjunto de conos fundamentales para el observador promedio con visión normal de color, en un ángulo visual de 1° a 10°. Estos conos fundamentales se han derivado del mejor*

conjunto de CMF disponibles. Si bien el objetivo principal de CIE TC1-36 era proponer los conos fundamentales, el objetivo final del trabajo debe derivar hacia un diagrama de cromaticidad fisiológico que enlace la Fotometría y la Colorimetría. Se deben proponer dos diagramas de cromaticidad, uno para investigación fundamental y el otro para fines colorimétricos sencillos. Durante varias décadas, el enfoque de los conos fundamentales ha sido explotado con éxito por la comunidad científica. En el futuro, la especificación del color en el espacio LMS ofrecerá nuevas oportunidades para aplicaciones a través de las Divisiones de la CIE. Varias cuestiones deberían abordar las Divisiones CIE beneficiándose del marco de los conos fundamentales: la variabilidad de respuestas de color individuales, la mejora de la construcción de modelos de apariencia de color, la fotometría de fuentes de luz puntiformes, la colorimetría de fuentes de luz de estado sólido, interpretando las diferencias de color bajo varios ángulos de visión, la medición de temperatura de color, discutiendo la reproducción cromática y el rendimiento de color, la medición de la iluminación de carreteras y en vehículos, evaluando la contribución de la melanopsina a las respuestas visuales y de las funciones visuales y de color en una amplia gama de pantallas de imagen. En definitiva, se espera que el enlace establecido

entre la colorimetría y la fisiología mejorará la comprensión del color, será útil para la educación y ofrecerá nuevas oportunidades para resolver problemas de medición de color y percepción del color en la vida cotidiana y en la industria”.

A modo de conclusiones.

Se abren pues, nuevos horizontes y retos a cubrir en este rumbo de la Colorimetría. Una de los bancos de prueba más potentes para analizar el comportamiento de los conos fundamentales y el comportamiento del diagrama de cromaticidad fisiológico es el estudio de las igualaciones metámeras bajo diferentes condiciones experimentales. La implementación en los modelos de apariencia de color de un amplio conjunto de iluminantes, convencionales y de nueva generación, así como el amplio abanico de sensibilidades espectrales establecidas en los conos fundamentales, posibilitará la propuesta de nuevas métricas e índices de metamerismo más próximos a las condiciones de trabajo.

El nuevo camino que se está proponiendo desde la CIE no está exento de dificultades para la transferencia de conocimiento y es de prever, como sucede en gran parte de la investigación científica, cierto desfase temporal entre los

logros del conocimiento y el desarrollo tecnológico e instrumental que debe llevar apareado. Lo que es un problema para el sector industrial es una enorme fuente de ingresos para la venta de espectrofotómetros, cuyo mercado reside precisamente en la medida de un mismo estímulo en diferentes condiciones. Serán fuertes las inercias para implementar en nuevas generaciones de dispositivos un sistema diferente al CIE-1931 que, por otra parte, como dice Fairchild, es mayor el problema del metamerismo de observador que la precisión del observador patrón CIE-2° que sigue siendo útil e intuitivo.

No cabe duda de que el SVH tiene características y respuestas similares para la mayoría de los humanos. En cuanto a visión del color se refiere, frente a la pregunta ¿percibe toda la población el color de igual forma? la respuesta no es simple, pero se puede afirmar que la mayor parte de la población admite las igualaciones realizadas entre tricrómatas con visión normal del color. Este hecho ha permitido el establecimiento de los observadores promedio o patrones CIE, que han proporcionado fructíferos resultados, si bien, como está planteado actualmente, son susceptibles de revisiones y mejoras para cubrir un mayor conjunto de situaciones y de observadores individuales.

A lo largo del tiempo que nos ha ocupado, la respuesta a la pregunta formulada en el título de este discurso debiera haberse ido clarificando. Concluyendo, el metamerismo es tanto una solución como un problema. La cuestión está en para qué. El sistema visual humano es, quizás afortunadamente, incapaz de procesar la infinita información espectral asociada a la energía radiante que lo estimula, su comportamiento es univariante, fotoquímicamente hablando, y perceptualmente trivariante. El metamerismo es una solución para los mecanismos de visión del color. Para los procesos industriales es ambas cosas. La Colorimetría, fundamentada en la misma propiedad, contribuye al desarrollo de igualaciones de color, a su medida y especificación, a la reproducción del mismo, a la evaluación de sus diferencias, a fijar las bases para la formulación de colorantes y análisis de calidad en los procesos de producción, pero a su vez ha de buscar soluciones a las “limitaciones” de las mismas ya que al cambiar las condiciones experimentales la percepción no es invariante. Esto último, aunque es inevitable, sí que es evaluable y admite las optimizaciones derivadas del estudio del metamerismo y de las limitaciones de la capacidad de discriminación cromática que tiene el sistema visual humano. En este último sentido, juega un papel fundamental el conocimiento profundo

de los umbrales diferenciales de color que constituyen la base para el establecimiento de tolerancias de color.

Al igual que otros ámbitos del saber y de sus aplicaciones, cabría plantearse la posibilidad de desarrollo de una Colorimetría “personalizada”, pero no sería útil. Las bases científicas y tecnológicas para su alcance están bien sentadas y, a favor de ello juegan los grandes avances que en las últimas décadas se han producido en el desarrollo del software y hardware de los dispositivos de medida, que junto con la rapidez, elevada capacidad de computación, y desarrollo de nuevos algoritmos en el campo de la inteligencia artificial, lo hacen factible. Este tratamiento, que pudiera resultar de interés para algún caso específico, se alejaría del tratamiento, lo más generalizado posible, al que debe responder la Colorimetría. Cuestión bien diferente, como recientemente están recomendando los comités técnicos de la CIE, es la conveniencia de establecer patrones modelizados de forma que permitan como variables de entrada las causas de variabilidad interindividual.

Gracias a todos por su atención.

“La historia de la ciencia, como la de todas las ideas humanas, es una historia de sueños irresponsables, de obstinaciones y errores. Sin embargo, la ciencia es una de las pocas actividades humanas -quizá la única- en la cual los errores son criticados sistemáticamente y muy a menudo, con el tiempo, corregidos”

Karl Popper

Agradecimientos finales

Quiero finalizar este discurso volviendo a agradecer a todos los miembros de la Academia mi aceptación en su seno. Deseo manifestar públicamente mi mayor agradecimiento y admiración al Profesor Hita, maestro, compañero y amigo, que ha sido todo un referente y una valiosa guía en mi actividad científica y académica. De igual manera a todo el profesorado que, en tiempos difíciles, con su entrega y sabiduría hicieron una realidad los estudios de Física en la Universidad de Granada.

A los maestros que, desde otras instancias, apoyaron y supieron transmitir en su día, con gran entusiasmo, sus conocimientos en este campo de trabajo, al profesor Álvarez-Claro y a los profesores del CSIC Antonio de la Cruz Castillo, Lorenzo Plaza y Antonio Corrons. A la profesora María Josefa Yzuel que ha sido todo un referente en transmitir la pasión por la Óptica.

A los compañeros con los he compartido las andaduras iniciales en la investigación y la docencia. Al profesor Romero Mora, hemos caminado juntos, guiados por el profesor Hita, en el proyecto de desarrollo de la Óptica en nuestra querida

Universidad. Se suman a estos nombres un largo número de compañeros de los estudios en Física y del Departamento de Óptica, que a lo largo de todos estos años, desde su creación en 1993, hemos abordado diferentes proyectos, todos ilusionantes, y que han prosperado gracias a su trabajo y entrega. La lista es extensa y en estas breves líneas quiero que todos se sientan recogidos.

A todos los que tuve la satisfacción de dirigir sus tesis doctorales y especialmente a los profesores Jiménez Cuesta y González Anera que han ampliado los horizontes de trabajo en los que, dentro de la Óptica Visual, he podido colaborar con ellos. Y como no, a todos los jóvenes cuya incorporación al grupo de investigación, en momentos que no están exentos de complejidad, son un estímulo en el día a día y en el devenir de la investigación.

Mi mayor cariño y agradecimiento a toda mi familia. Gracias padres y hermanos. Gracias Maricarmen, Luis Miguel y Ana, y como no, a mis nietos que nos han abierto nuevas ilusiones y horizontes.

**Contestación al discurso de Ingreso en la Academia de
Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de
Granada del**

Ilmo. Sr. D. Luis Miguel Jiménez del Barco Jaldo

Excmo. Sr. D. Enrique Hita Villaverde

Excma. Sra. Rectora Magnífica,

**Querida Maricarmen, hoy aquí como esposa del nuevo
académico,**

Excmo. Sr. Presidente de Honor de la Academia,

Excmo. Sr. Presidente de la Sección de Físico-Químicas,

Ilmo. Sr. Secretario General,

Dr. Jiménez del Barco,

Excmos. e Ilmos. Sras. y Sres. Académicos,

Familiares y amigos del nuevo académico,

Señoras y Señores:

Sobre la persona.

Decía John F. Kennedy que *siempre hay que encontrar un tiempo para agradecer a las personas que marcan una diferencia en nuestras vidas.*

Pues bien, se da en este acto la circunstancia de que se conjugan en mi persona las tareas de presidente de la Institución y padrino del nuevo académico, lo que hace que las ideas de responsabilidad institucional se entrelacen con las de admiración personal, originando un sentimiento de satisfacción que cristaliza en el honor que me concede hoy mi Academia de ser avalista del personaje que nos ocupa y, con ello, la posibilidad que me brinda de poder expresarle públicamente, como debe ser, mi gratitud al Dr. Luis Miguel Jiménez del Barco Jaldo, un hombre que me ha acompañado durante prácticamente toda mi vida académica y con el que he podido crecer humanamente en sobremanera.

En las academias se ha debatido siempre sobre cuál debe ser el perfil de los nuevos académicos. Yo entiendo al respecto que “un académico no es solamente un currículum científico”, no debe ser solamente un cúmulo de contribuciones científicas, más o menos relevantes, enumeradas en unos criterios de ordenación también más o menos ocasionales, que también, pero debe ser mucho más que eso, debe ser esencialmente *un ser humano adornado de las cualidades necesarias que posibiliten el desarrollo de las tareas y objetivos inherentes a nuestras instituciones.*

Por supuesto que, como les decía, debe estar en posesión de un historial que acredite una formación y una proyección científicas al más alto nivel, pero también creo, estoy convencido de ello, que, superado un cierto umbral, empiezan a cobrar relevancia otros aspectos derivados de los valores humanos también inherentes al desarrollo de las funciones que se esperan del mismo.

Nuestro ya casi flamante académico supera, sin lugar a dudas y con creces, ambos aspectos del planteamiento, pero permítanme, querido auditorio, la licencia de manifestar, aquí y ahora, que donde es realmente sobresaliente nuestro ya casi

compañero es en el segundo de ellos y espero ser capaz en el resto de mi intervención de ponerlo de manifiesto.

El Dr. Jiménez del Barco, se licencia en Ciencias Físicas en nuestra Universidad en 1978, perteneciendo pues a la primera promoción de licenciados por nuestra querida Facultad de Ciencias. Promoción emblemática, diría yo, a la que pertenecen grandes profesionales de hoy en día en muy diferentes ramas de la Física y muchos de ellos desarrollando en la actualidad su actividad en instituciones granadinas de la Ciencia, la Docencia y la Técnica.

Al finalizar sus estudios de licenciatura, el doctor Jiménez del Barco se acerca al entonces Departamento de Física Fundamental con la idea de realizar en el mismo y dentro del grupo de Óptica, su tesis doctoral, integrándose junto con nuestro compañero académico, el Profesor Romero Mora, en aquella nuestra incipiente unidad docente y convirtiéndose, desde el principio, en uno de los pilares fundamentales para la consecución de lo que hoy en día es el Departamento, Grupo de Investigación y Titulación de Óptica en nuestra Universidad.

Durante los siguientes difíciles, pero para mí maravillosos, años fue cuando aquel, inicialmente desapercibido estudiante de óptica de tercer curso, de expresión humilde y que, posiblemente, no había querido manifestar ambiciones de relevancia por no ser esa su condición, fue poco a poco sembrando en el corazón de sus compañeros y en sobremanera en el mío propio, su potencial humano y profesional.

Casi sin darnos cuenta, Luis fue haciendo realidad en su persona aquella sentencia que en algún sitio que no recuerdo he leído y que viene a decir: *El respeto se gana, la honestidad se aprecia, la confianza se adquiere y la lealtad se devuelve.* Y es que Luis fue, día a día, ganándose el respeto de todos los que integrábamos el grupo de Óptica, así como de los que se

iban incorporando al mismo, pues fue creando una corriente de opinión sobre su honestidad que generó la confianza en su persona de sus compañeros, yo el primero, consiguiendo así que la lealtad que le caracteriza le sea devuelta hoy por la mayor parte de los que le acompañamos en la experiencia de vivir. Yo estoy convencido de que el vocablo "bonhomía", debió acuñarse, "ad hoc", por aquella época.

Y es que Luis es un hombre leal a los demás, porque como decía *Vicente Aleixandre*, "*empieza por ser leal a sí mismo*". Es una persona dotada de una gran integridad caracterizada por decirse también a sí mismo la verdad y de una gran honestidad caracterizada por decir la verdad a los demás.

Luis es un hombre en el que yo he encontrado una posibilidad de comunicación excepcional, porque, como decía Peter F. Drucker, él desarrolla lo más importante en la comunicación: "*la capacidad de escuchar lo que no se dice*".

Durante aquellos preciosos y difíciles años de comienzo, Luis hacía de cada dificultad, que vaya si las hubo, un reto, un reto personal marcado por esa "tozudez" que le caracteriza en la resolución de los problemas, y yo diría que en todo, materializando así la sentencia también de Drucker de que "*la mejor forma de predecir el futuro es crearlo*". Crear futuro sin miedo a los retos, metiéndose dentro de los problemas tal vez por aquello que decía Maquiavelo de que "*los fantasmas dan más miedo de lejos que de cerca*".

A veces, recordando aquellos duros, pero ilusionantes tiempos y mi vida con Luis y Javier, me viene a la memoria la sentencia de Albert Einstein cuando decía "*Solo hay dos formas de vivir la vida: una es pensando que nada es un milagro, la otra es creer que todo lo es*".

Con el paso de los años Luis fue consiguiendo, sin lugar a dudas sin proponérselo, eso para mí es lo más importante,

que el compañerismo pasara a ser amistad y esta a tener la consideración de hermandad, y es que Luis es de esas personas en las que encuentras un verdadero amigo, es decir, alguien que, como decía Kurt Cobain, *“sabiéndolo todo de ti, sigue siendo tu amigo”*. Una persona muy honesta *“entendiendo por honestidad algo muy caro que no cabe esperar de gente barata”*, como también sentenciaba Warren Buffett.

Durante el desarrollo de una vida en común, Luis Jiménez del Barco, ha sabido ganarse mi respeto y admiración más profundos, dándome muestras de una humildad y de una capacidad para generar futuro en convivencia a base de generosidad, realmente encomiables, y ello con una sinceridad excepcional, la de hacerlo sin decirlo, para evitarme a mí problemas, yo lo sé bien, al tiempo que hacía familia y construía futuro haciendo suya la sentencia de Buda de que *“la sinceridad no es privilegio de los que yacen en la servidumbre del egoísmo y la ambición”*.

Pero, es más, durante el desarrollo de esa vida en común, Luis, como era de esperar, ha realizado también una actividad sorprendente en todos los sentidos que ha dado lugar a que se encuentre en posesión del currículum, al que anteriormente me refería, necesario para integrarse en nuestra Institución y en el que se ponen de manifiesto tanto su capacidad profesional como su espíritu de entrega.

Bajo el punto vista docente, el Dr. Jiménez del Barco ha ocupado plaza en casi todos los estamentos universitarios siendo en la actualidad catedrático de Óptica en nuestra Facultad y habiendo impartido docencia en muy diferentes titulaciones de la misma a nivel de licenciaturas, grados, másteres, programas de doctorado, etc. habiendo sido profesor invitado en otras universidades y conferenciante en muy diferentes organismos y congresos.

Yo puedo dar fe de que la labor desarrollada por el Dr. Jiménez del Barco durante el arranque y puesta a punto de los

estudios de Óptica y Optometría en nuestra universidad fue, realmente, excepcional y sin la cual difícilmente se hubiera podido llegar a la situación actual de disponer de unos estudios de renombre nacional y de gran proyección internacional. Además, nuestro personaje, siempre preocupado por los aspectos de renovación docente, ha estado involucrado en un alto número de proyectos de innovación en este campo.

En lo que a investigación se refiere, ha desarrollado la suya en las líneas generales de Colorimetría (línea inicial que nunca abandonó), Visión del Color y Óptica Visual, líneas todas ellas en las que es considerado un experto de renombre internacional, habiendo participado en hasta 18 proyectos de investigación financiados por organismos oficiales en convocatorias públicas competitivas, lo que ha traído consigo que en la actualidad sea miembro de las Sociedades Americana, Europea y Española de Óptica.

A su vez, Luis Jiménez del Barco, siempre tuvo presente su idea de que lo que realmente es importante es “hacer Casa”, “hacer Universidad”, en definitiva proyectar y crear posibilidades de enriquecer el conocimiento; por ello, y además de haber dirigido un elevado número de trabajos de fin de licenciatura (antiguas tesinas), fin de grado, fin de máster y tesis doctorales, conformó un Grupo de Investigación en Óptica Visual de proyección internacional, habiendo sido también artífice en la creación de diferentes redes temáticas en temas de Color y Óptica de la Visión.

Todo ello ha cristalizado en la publicación de más de 120 trabajos de investigación en diferentes revistas de muy alto prestigio, de entre las que pueden destacarse a título de ejemplo, *Biomedical Optics Express*, *JOSA*, *Applied Optics*, *Optics Letters*, *Applied Physics Letters*, *Optics Express*, *Visión Research*, y un largo etc.

Paralelamente, su gran actividad de conexión nacional e internacional ha traído como consecuencia su participación en

diferentes comités científicos de la CIE, habiendo sido Vicepresidente y Presidente del Comité Español del Color en la Sociedad Española de Óptica y habiendo presentado más de 120 comunicaciones a Congresos y Reuniones Científicas tanto nacionales como Internacionales, habiendo sido también miembro responsable en la organización de varios congresos y reuniones científicas.

En la actualidad es Evaluador de la Agencia Nacional de Evaluación de la Actividad Investigadora, así como de otras Agencias de ámbito autonómico y Censor de diferentes publicaciones científicas, siendo, además, el Investigador Responsable del Grupo de Investigación Global de nuestro Departamento, FQM-151 de la Junta de Andalucía.

Como consecuencia de toda esta actividad el Dr. Jiménez del Barco tiene concedidos por la CNEAI 6 tramos de Investigación, habiéndosele concedido también 6 tramos de docencia y 5 tramos autonómicos, el máximo establecido en nuestra actual normativa.

Pero, es más, su idea de responsabilidad Institucional y su espíritu de entrega le ha llevado a desarrollar también una actividad de gestión universitaria muy relevante y comprometida, habiendo ocupado cargos de muy alta responsabilidad y a muy diferentes niveles en este terreno: Secretario de departamento, Director de departamento, miembro de Juntas de Centro y Universidad, Comisiones de todo tipo, llegando a ser Vicerrector de Ordenación Académica y Profesorado y todo ello en épocas de especial dificultad administrativa, habiendo desarrollado siempre estos cargos con gran eficacia y solvencia.

Por todo lo expuesto, Luis nunca estará solo, pues ha sabido ganarse la compañía derivada de la amistad que ha conseguido fraguar entre los que le rodeamos, especialmente la mía, pues como le dije en una ocasión muy difícil para él,

siempre podrá considerarme “su mejor amigo”, al menos de aquí para allá, lo que espero no olvide nunca.

Pero es que, además, Luis ha sabido hacer familia propia y cultivar la de origen, contando con una esposa, Maricarmen, nuestra actual Decana y mujer excepcional, así como con unos hijos entrañables, Luis, Ana y ya también Fátima, que le acompañan en la andadura de la vida dándole continuamente estímulo y habiéndole proporcionado una esperanza de futuro entrañable con Juanillo y Anita. Y, es más, con una madre, Pastora, una hermana, Inmaculada y una memoria, padre y hermano, que le ofrecen de continuo su apoyo, compañía y guarda.

Sobre el discurso

El tema elegido por el Dr. Jiménez del Barco para construir su discurso de ingreso en esta Academia es, según lo veo yo, el aspecto de mayor interés conceptual dentro de lo que se ha denominado “La Visión del Color”, y constituye la esencia y base de la denominada Colorimetría, capítulo de la Ciencia de enorme interés y aplicación en la actualidad.

En efecto, el hecho experimental de que dos distribuciones espectrales de energía muy diferentes puedan conducir a una respuesta visual idéntica, no tiene un comportamiento similar en ningún otro aspecto del funcionamiento sensorial humano.

Así pues, el METAMERISMO, o metamería como también se le suele denominar a este fenómeno, constituye, junto con la ecuación tricromática, o reflejo experimental de aquel, la base y esencia de la denominada “Ciencia del color”, capítulo multidisciplinar de la también denominada Psicofísica de la Visión.

No obstante, este tema no es algo de nueva elección para el Dr. Jiménez del Barco, pues hace alrededor de cuarenta años en su tesis doctoral abordó, magistralmente, un aspecto del mismo enfocado hacia los procesos de “Discriminación Cromática en Igualaciones Metámeras”, tópico de la Colorimetría Diferencial de gran importancia en la técnica actual al sentar las bases de las Tolerancias en Color, aspecto este esencial en los procesos industriales de reproducción del mismo.

En este apartado de la ciencia intervienen planteamientos de base muy diferentes inherentes a todos los aspectos del conocimiento que tienen influencia en los mecanismos de la visión y por lo tanto en las repercusiones del mismo tanto en la Ciencia como en la técnica, el arte, la Psicología, etc., etc. originando muchas veces vocabularios de expresión que pueden resultar confusos de unos sectores a otros. Entre esos conceptos que pueden resultar confusos esta el más elemental o primario de ellos y es el de confundir Color con Estímulo de Color, lo que, aunque nos pueda parecer claro a primera vista en una acepción científica, no siempre es así y ha resultado ser el origen de muchas confusiones conceptuales de relevancia.

Y es que Color viene a ser una parte de la respuesta visual, un ente psicológico en definitiva, mientras que estímulo de color es una distribución espectral de energía, un ente físico, y es precisamente la relación entre ambos lo que constituye el objetivo fundamental de la Colorimetría como parte de la Psicofísica, y a ello dedican sus esfuerzos los diferentes grupos de investigación en este campo elaborando modelos visuales que nos permitan “medir” el color, es decir la sensación que produce en el ser humano una determinado estímulo.

A este aspecto de los mecanismos de percepción dedica el Dr. Jiménez del Barco parte de su discurso, en el que haciendo una revisión bibliográfica exhaustiva llega a la

conclusión, compartida por muy diferentes autores, entre ellos yo mismo, de que los modelos de comportamiento, hasta ahora propuestos, no proporcionan una explicación completa ni general de la visión del color que permita una aplicación universal de los mismos, pues la mayor parte de ellos son modelos elaborados para explicar aspectos parciales de los fenómenos visuales. No obstante, en todos ellos existe una misma base metodológica: la realización de igualaciones colorimétricas a partir de estímulos físicos metámeros.

En cualquier caso, se ha de partir de la base de que el sistema visual humano es un mecanismo muy complejo en el que intervienen, como decíamos, diversos aspectos del problema que son susceptibles de ser controlados o, al menos evaluados, por la Física, La Química, la Fisiología, la Neurología, la Psicología, etc.

No obstante, podríamos decir que la colorimetría convencional sí que proporciona un procedimiento, macroscópico diría yo, que suministra una relación entre estímulo de color y color. Esta relación permite también, por tanto, determinar para luces y objetos el color que presentarán en determinadas condiciones de observación, y lo más interesante del procedimiento empleado en este caso está relacionado con el término “macroscópico”, es decir sin entrar para nada en los procesos microscópicos que se originan en el ojo humano entre energía radiante y fotorreceptores, ni en el análisis de las respuestas que estos generan ni tampoco en el procesamiento ulterior que el sistema visual hace de las mismas.

Solamente se utiliza al ojo como un instrumento de cero, es decir emitiendo juicios de igualdad o desigualdad en las sensaciones generadas por estímulos metámeros y partiendo de la base de que cualquier estímulo complejo puede considerarse la mezcla aditiva de los estímulos espectrales que lo conforman, llegándose así a lo que se ha denominado

Observador Patrón Colorimétrico, promedio del comportamiento de un elevado número de observadores, y a un sistema inicial de representación del color percibido denominado Sistema CIE-1931.

Este Observador Patrón, representativo en principio del comportamiento del ser humano, viene a ser un conjunto de valores denominados “funciones de mezcla”, o coeficientes de distribución que se corresponden con los valores triestímulo de las radiaciones espectrales cuasi monocromáticas de radiancia unidad.

Se puede afirmar entonces que sí que está establecida una relación entre estímulos y respuestas, es decir entre distribuciones espectrales de energía y atributos visuales, pero debe quedar muy claro que las condiciones de observación, es decir experimentales, han de estar perfectamente especificadas.

En definitiva, lo que está en cuestión es la aplicabilidad de ese Observador Patrón de forma generalizada, lo que ha conducido a que tengan que establecerse diferentes “observadores Standard”, en función de las condiciones experimentales.

¿Significa esto que este “Observador Patrón” estandarizado no es útil? ¿O que el procedimiento para establecerlo que emplea la colorimetría convencional no es el correcto?

Bajo mi punto de vista, en absoluto. Un coche está ahí y funciona bien, aunque para ello haya que cambiar de marcha; el problema no está en el coche sino en el terreno, por lo que hay que dotar al vehículo de la “caja de cambios adecuada”.

El procedimiento colorimétrico necesita, pues, disponer de un conjunto de funciones de mezcla aplicables a las

diferentes condiciones experimentales que se puedan presentar.

Pero, claro, las condiciones experimentales pueden variar, en principio, de forma infinita, así como el número de observadores y la pregunta entonces sería, ¿hacen falta infinitos conjuntos de funciones de mezcla y ello para tantos observadores posibles como habitantes del globo?

La respuesta vuelve a ser la misma: en modo alguno. Para darse cuenta de ello no hace falta más que constatar dos cosas: la primera es que el comportamiento del ojo humano es, en un amplio margen de condiciones, prácticamente el mismo, y la segunda es que el comportamiento de los diferentes observadores es, salvo desviaciones en lo que se refiere al denominado Daltonismo, muy parecido; lo que permite promediar y, por ello, universalizar.

Es precisamente al estudio de estas posibilidades a lo que dedica sus esfuerzos en la actualidad la investigación en Colorimetría y Visión del Color, a establecer “Observadores Patrón” que conduzcan a que, como apunta en su discurso el Dr. Jiménez del Barco, el matamerismo psicofísico (igualdad entre valores triestímulo) conduzca a un metamerismo perceptual (igualdad de respuestas perceptivas).

Pero claro, un estudio científico en profundidad sobre el comportamiento del sistema visual humano, no puede quedarse solamente en un análisis macroscópico del mismo, se hace, pues, necesario introducirse en un estudio del funcionamiento microscópico de los diferentes fotorreceptores visuales al ser estimulados por la energía radiante, tratando de encontrar relaciones, o mejor derivaciones, entre las funciones de mezcla y las curvas de respuesta de estos fotorreceptores para tratar de encontrar una explicación plausible del metamerismo.

A esto dedica también buena parte de su discurso el Dr. Jiménez del Barco, el cual, tras analizar los diferentes tipos de metamerismo establecidos, entra de lleno en las circunstancias bajo las que el mismo se rompe, cuestión esta muy relacionada con el problema antes mencionado de las tolerancias en color, lo que, a su vez, está muy conectado con los problemas que se plantean en los procesos industriales de fabricación de materiales coloreados para los que se pretende que su apariencia se mantenga bajo muy diferentes condiciones de observación, fundamentalmente el cambio de iluminante y, en el caso de que esa invarianza no se produzca, encontrar índices apropiados que permitan medir el grado de metamerismo existente y relacionarlo con las tolerancias en color prefijadas.

Esta es la razón de ser de muchas investigaciones actuales que tienen como objetivo establecer nuevos "observadores estándar", evolucionando hacia una colorimetría más fisiológica.

En definitiva, querido auditorio, un tema apasionante este de la visión del color en el que nuestro personaje realiza un estudio minucioso de las diferentes contribuciones científicas que se vienen haciendo a lo largo de su evolución y en el que el Dr. Jiménez del Barco pone de manifiesto, una vez más, su alta preparación y contribución, pero lo lleva a cabo, también una vez más, con la gran humildad que le caracteriza al hacer referencia a sus contribuciones, que no son pocas, "como de pasada" diría yo, sin hacer hincapié, posiblemente sin proponérselo, en la relevancia que las mismas tienen.

Un discurso para mí interesantísimo, con una contribución científica, también para mí, excepcional, y un ofrecimiento inicial en su intervención de colaboración con nuestra institución que garantizan, estoy seguro de ello, que el ingreso que hoy materializamos venga cargado de posibilidades de futuro para esta Academia, y que, como suelo decir, yo mismo me encargaré de recordarle.

Luis: Bienvenido a Casa.

Muchas gracias a todos por vuestra atención.