



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

LA COLORIMETRÍA: UNA CIENCIA EN CONSTRUCCIÓN

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

ILMO. SR. D. JAVIER ROMERO MORA

Granada, 2019



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

LA COLORIMETRÍA: UNA CIENCIA EN CONSTRUCCIÓN

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

ILMO. SR. D. JAVIER ROMERO MORA

Granada, 2019

LA COLORIMETRÍA: UNA CIENCIA EN CONSTRUCCIÓN

JAVIER ROMERO MORA

**Excmo. Sr. Presidente de la Academia de Ciencias Matemáticas,
Físico-Químicas y Naturales de Granada,
Excelentísimos e Ilustrísimos Señoras y Señores Académicos.
Queridos compañeros y amigos,
Señoras y Señores**

Desde Newton a 1931

En el año 2031 se cumplirán 100 años del momento en el que podemos establecer el nacimiento formal de la Colorimetría, concretamente en septiembre de 1931. En estos 88 años de vida, el desarrollo de la Colorimetría ha sido muy intenso, atendiendo múltiples requerimientos de la Ciencia Básica, la Industria y el Diseño, pero, al mismo tiempo, se ha puesto de manifiesto todo lo que queda por hacer y mejorar para dotarle de un cuerpo de doctrina que sea satisfactorio para cumplir los objetivos que se pretendían: permitir

la medida lo más objetiva posible del color de las luces y objetos, y que esta sea de utilidad práctica. Estos objetivos son aún retos y por ello el título que he dado a este discurso es: “La Colorimetría: una ciencia en construcción”.

Y es que medir el color no es fácil, como no lo es medir cualquier sensación, es decir, cualquier aspecto de la percepción, en la que se implican un agente de tipo físico, en nuestro caso la luz, energía radiante visible, y una respuesta sensorial, por tanto, de naturaleza física, fisiológica y psíquica. Otros intentos de medir sensaciones en la Ciencia son la Fotometría, o medida de la cantidad de luz, o la Acústica, o medida del sonido a partir de las ondas sonoras. Las medidas psicofísicas de otras percepciones ligadas con los sentidos, como el tacto, el olfato, el gusto, están aún más lejos de su sistematización, o aquellas relativas a la percepción de la distancia, la velocidad u otras. En algunos casos se han establecido relaciones logarítmicas que ligan la magnitud física con la perceptiva, como la conocida ley de Weber-Fechner, y en otras relaciones de tipo lineal, ley de Stevens.

Es la CIE, Comisión Internacional de Iluminación, el organismo que se preocupa a nivel mundial del establecimiento de patrones y métodos de medida que involucren a la luz. En 1931 [1] establece lo que se llama el observador patrón CIE1931, que da lugar al sistema de especificación del color CIE1931 (x,y,Y) , que constituye el primer sistema de representación del color estandarizado, mediante el cual se le puede asignar al color de cualquier objeto una tripleta de números, conocidos como valores triestímulo (X,Y,Z) o cantidades de colores primarios que permiten su igualación visual. Se establece la medida del color, por tanto, en función de la elección de unos colores

primarios fijos, estándar, y las cantidades de estos que un observador promedio, patrón, necesitaría de cada uno de ellos para igualar el color a medir.

Con esta medida tridimensional se da satisfacción al conocido como fenómeno del metamerismo o la posibilidad de que distintas composiciones espectrales de la luz que provienen de los objetos den lugar al mismo color percibido.

La dimensión 3, o el número 3, de forma aún más general, es fundamental en el mundo del color: 3 son los primarios necesarios para igual cualquier color, 3 son los atributos perceptivos con los que se describe cualquier color, de los que hablaremos más adelante, y 3 son los tipos de fotorreceptores distintos de los que disponemos los humanos en la retina para poder ver el color.

Anterior al observador patrón CIE1931, la CIE había fijado el observador CIE1924 para el desarrollo de la Fotometría, es decir para la medida de la cantidad de luz, o la evaluación de la magnitud perceptiva luminosidad, en caso de luces directas, o claridad, para objetos opacos o transparentes. Todos sabemos que la luz se considera un tipo de radiación electromagnética que permite la visión, es decir, que “se ve”, frente a otras radiaciones electromagnéticas que “no se ven”, como el ultravioleta, el infrarrojo o las microondas. Convertir los vatios de radiación en magnitudes que evalúen el efecto que hacen sobre la visión es misión de la Fotometría, lo que da lugar a unidades de cantidad de luz que son habituales en nuestra vida cotidiana, como los lúmenes o los lux.

Volviendo a la Colorimetría, esta comenzó a pergeñarse, como pueden imaginar, mucho antes de 1931. Es inevitable y necesario poner el punto de partida en el genial físico y matemático inglés Isaac Newton

y su experimento sobre la dispersión cromática de la luz en un prisma, [2]. Newton, aprovechando la feria anual de Stourbridge, en la que se podía proveer de múltiples artículos y utensilios una vez al año, compró un prisma con el que hacer el experimento que tenía planeado. Este es uno de los experimentos más famosos de la Física. Haciendo pasar la luz que entraba por una ventana por el prisma y observando la luz emergente en una pared opuesta a la ventana de la habitación, pudo demostrar de forma científica que la luz blanca estaba compuesta por luces elementales, que presentaban una coloración del rojo al violeta. Al fin y al cabo, hizo un experimento controlado de lo que se observa en la Naturaleza cuando aparece el arcoíris. No era, por tanto, la luz blanca la luz más pura, sino las luces que la formaban. Cuando quiso continuar el experimento para aislar una de las luces elementales, la amarilla, y hacerla pasar por un segundo prisma y así demostrar que las luces elementales no eran compuestas a su vez, tuvo que esperar un año a que se celebrara de nuevo la feria de Stourbridge. Newton hizo notables contribuciones en la Óptica, reflejadas en su libro de este título *Opticks* [3], que nos ayudan a explicar la naturaleza ondulatoria de la luz, a pesar de que él estaba en contra de la teoría ondulatoria de Huygens y defendía un modelo corpuscular para la luz. Así, los famosos anillos de Newton, observados en la capa de aire que deja la cara convexa de una lente apoyada sobre una lámina de caras planas y paralelas de vidrio, o el experimento referido antes, que nos permite en la actualidad hablar de espectros y de longitudes de onda. Paradojas de la Historia.

También se equivocaba Newton en el tema del color al negar la posibilidad de que dos luces elementales mezcladas, por ejemplo, azul y amarilla, pudieran generar luz blanca. Newton exigía la mezcla de

todas las luces elementales en las que había descompuesto la luz. Sin embargo, se le debe a Newton el primer círculo cromático, figura 1, o forma de establecer una representación gráfica de la distribución de colores que permite el análisis posterior de las mezclas de color. Este círculo, publicado en su libro de Óptica, aunque con imperfecciones claras, supuso un hito pionero de los numerosos círculos cromáticos y diagramas de representación del color, realizados con posterioridad, a lo largo de los siglos XVIII, XIX y XX.

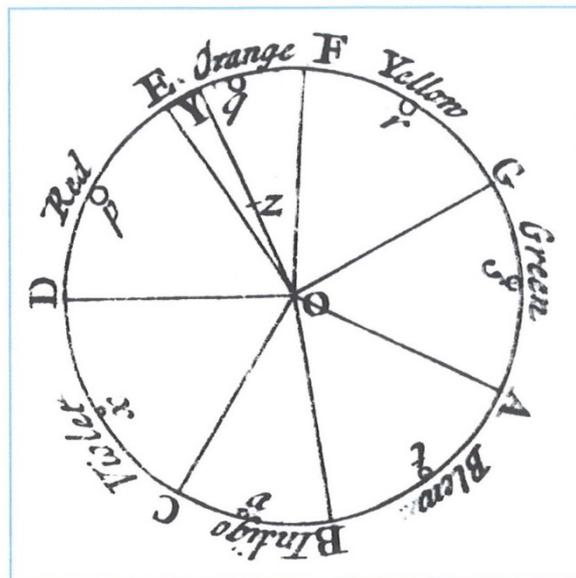


Figura 1: Círculo cromático de Newton.

En la Ciencia del Color han ido desarrollándose simultáneamente la ciencia básica que explica los fundamentos de la percepción cromática o la medida del color y los aspectos tecnológicos, en especial los relativos a la reproducción en las artes gráficas y, en los tiempos actuales, en los dispositivos multimedia.

A finales del siglo XVII y principios del XVIII se hacen grandes avances en la reproducción impresa del color, en especial gracias a Le

Blon, que introducen los conceptos de tricromía en el uso de tintas para la impresión de láminas en color y por tanto, sentando las bases de las mezclas sustractivas. Incluso no solo utiliza tres tintas (roja, amarilla y azul) para la impresión, sino que le añade la tinta negra, por tanto, adelantado los actuales métodos de impresión CMYK (cian, magenta, amarillo y negro).

Estos trabajos abundan en la idea de la necesidad de usar solo tres colores primarios para la obtención del color, en contra de la teoría newtoniana de necesitar los siete colores primarios para obtener el blanco. El siglo XVIII es un siglo convulso en este campo, con científicos claramente anti-newtonianos, como el jesuita Castel, el astrónomo Tobías Mayer, que introduce el primer triángulo de color para la representación del mismo, con los primarios en los vértices, el astrónomo Lambert, que hizo grandes aportaciones a la Fotometría y que establece una pirámide de color para la representación del color, e incluso el revolucionario Marat.

Al mismo tiempo que se va asentado la idea de la tricromía para la representación y reproducción del color, se avanza de forma notable en la idea de ligar esta tricromía a los posibles mecanismos fisiológicos que permiten la visión humana del color. Frente a las teorías que fijaban el hecho del color en las propiedades exclusivas de la luz, son varios los científicos que fijan su atención en conocer las bases de transducción fisiológica de la luz en impulsos nerviosos en el sistema visual humano. Frente a científicos, como D'Agoty, Lomonosov o Bonnet, que aportan la idea de la existencia de transductores fisiológicos sintonizados a las distintas frecuencias de la luz, dos científicos ingleses, Palmer y Elliot, hacen aportaciones esenciales para indicar que el número de los transductores debe ser

limitado y distribuido por toda la retina. Hablan de transductores por colores e incluso Palmer habla de tres membranas o moléculas distintas que al ser excitadas dan el blanco. Incluso se atreve a explicar el daltonismo como consecuencia de la ausencia de uno de estos tres transductores y la aparición de post-imágenes como consecuencia de la distinta adaptación de cada uno de ellos. Ambas ideas son aceptadas actualmente si consideramos que estos transductores son los conos de la retina.

Sin embargo, ha de ser Thomas Young en 1817 [4], quien estructure una teoría de gran aceptación sobre la visión tricromática. Apoyado en los trabajos anteriores y en la teoría ondulatoria de la luz de Huygens, realiza un estudio sistemático, de carácter más bien teórico, en el que establece tres sensibilidades distintas en el sistema visual (roja, verde y violeta), figura 2, de espectro amplio y continuo y que se solapan. Young no solo es famoso, por tanto, por su experimento de la doble rendija, cuya presentación y explicación consolida la teoría ondulatoria de la luz en contra de la corpuscular newtoniana, sino también por situar la percepción del color no en la luz sino en el cerebro del humano. La luz es el agente físico que permite la percepción del color, pero esta se da gracias a que contamos con mecanismos fisiológicos para que así sea. Si dispusiéramos de un solo transductor veríamos en blanco negro o si tuviéramos un número distinto, tendríamos una percepción del color distinta, como ocurre en los daltónicos.

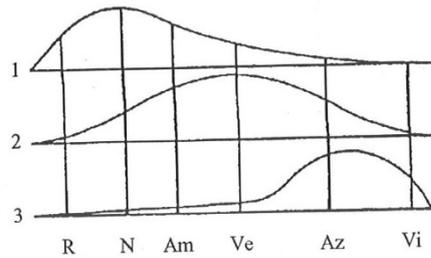


Figura 2: Sensibilidades espectrales de Young.

Las ideas de Young son seguidas por Helmholtz, que en 1852 [5] hace aportaciones notables al mundo del color y la especificación colorimétrica. Así, establece una clara distinción entre mezclas sustractivas y aditivas, y hace una clasificación de colores complementarios espectrales. Es el primer introductor de un diagrama de cromaticidad en el sentido que actualmente conocemos, figura 3, es decir, como diagrama en el que se pueden representar las mezclas de colores y las luces espectrales.

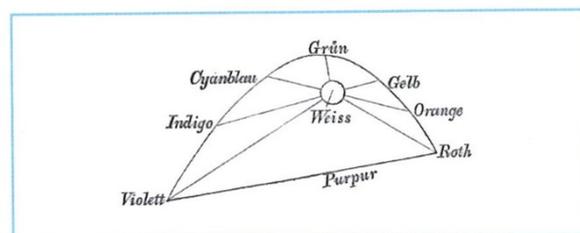


Figura 3: Diagrama cromático de Helmholtz.

Quiero destacar cómo el trabajo de los físicos en este campo ha orientado el trabajo de los neurofisiólogos. Así la teoría de Young sobre la existencia de tres sensibilidades en la retina precede a la observación posterior de los tres tipos de conos en la misma, como fotorreceptores que permiten la visión del color. No es hasta los trabajos de Rushton en 1965 [6], cuando se empiezan hacer

determinaciones experimentales de las curvas de absorción espectral de los conos, ya sea con métodos electrofisiológicos o espectrofotométricos, Bowmaker et al. [7]. Previamente, Köning, discípulo de Helmholtz había hecho determinaciones de las mismas por métodos psicofísicos.

En la misma época, 1853, el matemático Grassmann [8], formula las leyes matemáticas empíricas de las mezclas de colores e indica que cada color representado en el círculo cromático ha de tener un complementario. Con sus aportaciones podemos decir que comienza lo que conocemos como Algebra del color.

Otro de los grandes personajes de la Física que en un momento de su carrera investigadora hace aportaciones fundamentales en el desarrollo de la Colorimetría es James Clerk Maxwell. Este físico, singularmente conocido por sus aportaciones en el campo del Electromagnetismo, es decir por elaborar una teoría que unifica las interacciones eléctrica y magnética, resumida en las bien conocidas ecuaciones de Maxwell, es el primero en determinar las conocidas como funciones de mezcla de un observador, en su caso su propia mujer [9]. Estas funciones de mezcla, color-matching functions en inglés, son la medida de las cantidades necesarias de cada uno de tres primarios (por ejemplo, rojo, verde y azul) para igualar un color espectral, y son la base fundamental de la medida colorimétrica. Maxwell lo hizo, bien con un disco con sectores que se hacía girar, disco de Maxwell, o con un dispositivo experimental, la caja de Maxwell, de primarios espectrales.

Las aportaciones de Maxwell en el mundo del color se extienden más allá, en especial en la demostración de que las igualaciones de color no son las mismas cuando la visión es central o periférica en la retina,

o el campo de visión es de mayor o menos extensión, poniendo de manifiesto lo que se conoce como mancha de Maxwell, o yellow spot, consecuencia de la presencia del pigmento macular en la retina.

A Maxwell también se le debe el conocido como triángulo de Maxwell para representar el color. En el mismo, cada vértice de un triángulo equilátero lo ocupa un primario y es el fundamento de posteriores diagramas de cromaticidad. Así mismo representa las luces espectrales en este diagrama. También determina funciones de mezcla para observadores dicrómatas y establece las líneas dentro de su triángulo en las que se sitúan los colores que confunden dichos observadores.

A Maxwell sucede en Cambridge, lord Rayleigh. Este notable científico en distintos campos de la Física, en un momento dado se interesa por las personas con deficiencias en la visión del color, en concreto por los que conocemos en la actualidad como tricrómatas anómalos. Curiosamente, sus observadores son sus cuñados varones, entre ellos lord Balfour, posterior primer ministro. Rayleigh [10] diseña un experimento en el que la mezcla aditiva de luz de 670 nm (roja) y luz de 535 nm (verde) se pretende igualar a luz de 589 nm (amarilla). Las cantidades relativas de luz roja y luz verde, difieren de observadores normales a anómalos en la visión del color, lo que da lugar a un método de evaluación de las diferencias entre ellos. Desde entonces se conoce la ecuación resultante de dichas igualaciones como ecuación de Rayleigh y al aparato de medida anomaloscopio de Rayleigh.

En este repaso histórico de las grandes aportaciones realizadas por científicos involucrados en el mundo de la Física, pero que en un momento determinado se han sentido atraídos por la explicación de

los fenómenos asociados a la percepción y medida del color, no he de ser exhaustivo, pero si he de nombrar a otros personajes de renombre que hicieron alguna que otra aportación como Brewster, Herschel o Wollaston.

Un caso llamativo es el de Erwin Schrödinger, uno de los padres de la física cuántica, que en 1920 [11] se adentró en el tema de la determinación de elementos de línea del espacio del color. Es decir, una vez que ya en el siglo XX se había fijado un método para la medida del color y un espacio tridimensional para la especificación y representación del mismo, se planteó qué tipo de métrica se podía asociar a este espacio, ya que parecía no ser euclídea. Es decir, las diferencias perceptivas entre colores no se correspondían con diferencias euclídeas entre los puntos que representaban dichos colores y se apostaba por métricas de Riemann. En esta línea se propusieron diferentes elementos de línea, entre ellos el de Schrödinger. Volveremos sobre esto al comentar el tema de las diferencias de color.

Antes de adentrarnos plenamente en el siglo XX, es necesario mencionar un nuevo ejemplo de predicción de mecanismos fisiológicos hecho desde la Psicofísica. Me refiero a la existencia de mecanismos fisiológicos de tipo oponente rojo-verde y amarillo-azul, propuestos por Hering [12], y descubiertos mucho más tarde a partir de los trabajos de De Valois et al. [13] y otros en células ganglionares de la retina, del núcleo geniculado lateral (LGN) y del cortex cerebral. Hering basó su predicción, de una parte, en la ausencia de colores rojos verdosos, verdes rojizos, amarillos azulados o azules amarillentos, si bien existen verde azulados o verdes amarillentos. De otra, en la constancia de que las anomalías en la visión del color se

dan en el sentido de confusiones del tipo rojo-verde, la mayoría, o en algunos casos amarillo-azul, poco frecuentes. Se postuló, como luego se ha comprobado, que las señales generadas en los conos, las tres sensibilidades de Young, llamados L, M y S, según el lugar del espectro en el que sus curvas de absorción tienen el máximo (long, middle y short- wavelength), o vulgarmente mal llamados conos rojo, verde y azul, se comparan en determinadas células mediante el antagonismo de la señal L y la señal M, o la combinación de L+M con la señal S. Esto da lugar a que se hable de canales oponentes de la visión del color rojo-verde y amarillo-azul. Además, habría un canal suma L+M+S o L+S, según autores, que aportaría la información de la cantidad de luz absoluta. Si falla uno de los canales oponentes, principalmente por la ausencia o debilidad de uno de los tipos de conos, se habla de personas con anomalías en la visión del color, o popularmente, daltónicos. Este modelo de la visión del color, propuesto en los trabajos de Jameson y Hurvich [14], es importante mencionarlo por la relevancia que ha tenido para el posterior desarrollo de espacios de representación del color. La historia de la Colorimetría anterior a 1931 ha sido ampliamente descrita por Mollon [15] en un excelente artículo.

Las funciones de mezcla habían sido medidas experimentalmente por Köning, con un equipo diseñado por Helmholtz, y por Abney. Sin embargo, es en los primeros años del siglo XX cuando se presenta un gran interés por la medida colorimétrica, en especial en torno a la Sociedad Americana de Óptica (OSA) y el NBS (National Bureau of Standards). Anteriormente se habían hecho medidas por distintos grupos para alcanzar la normalización de la Curva de Eficiencia Luminosa, a través de la definición de lo que se conoce como el

observador patrón CIE1924. Ello permite el comienzo formal de la Fotometría, es decir, la evaluación sicofísica de la cantidad de luz, ya sea en fuentes primarias, luces directas provenientes de fuentes de luz naturales o artificiales, o en fuentes de luz secundarias, objetos transparentes u opacos. Aparecen unidades como el lumen, la candela o el lux, para evaluar las distintas magnitudes fotométricas deducidas de las correspondientes radiométricas. El observador patrón CIE1924, a pesar de haberse puesto de manifiesto en varias ocasiones la necesidad de su revisión, se mantiene como standard implementado en todos los aparatos llamados fotómetros, luxómetros, etc.

Aunque se realizaron importantes esfuerzos en los Estados Unidos de América, las medidas definitivas para la definición de unas funciones de mezcla standard para la medida colorimétrica se basan en las medidas realizadas por dos científicos ingleses de forma independiente, Guild y Wright, el primero en el NPL (National Physics Laboratory) y el segundo trabajando en el Imperial College de Londres. Las medidas de ambos coinciden asombrosamente y dan lugar a la fijación por la CIE del observador patrón CIE1931 y con ello el comienzo formal de la Colorimetría, como la entendemos en la actualidad. La historia de la adopción del observador patrón CIE1931 ha sido descrita por el Prof. Wright [16] y muestra la discusión que hubo entre científicos británicos y estadounidense, hasta que la CIE en su reunión del Trinity College de Cambridge el 18 de Septiembre de 1931, se decanta por la propuesta basada en los datos de Guild y Wright. En la figura 4 se muestran las funciones de mezcla de observador patrón CIE1931.

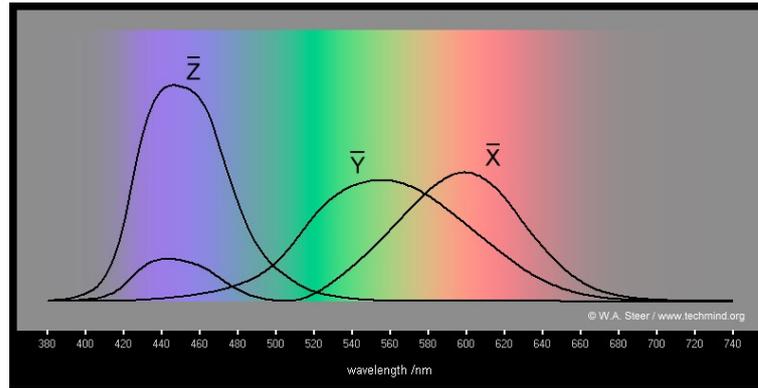


Figura 4: Funciones de mezcla del observador patrón CIE1931.

En el desarrollo del observador patrón CIE1931 es necesario destacar el esfuerzo realizado por los investigadores en el lado estadounidense, que con sus aportaciones condujeron hacia la definición del mismo. Entre estos destacaremos a Priest, Ives, Troland, Smith, Judd y Weaver.

Dejemos para los libros de Colorimetría comprender qué son exactamente estas funciones y centrémonos en decir que para medir cualquier color, si conocemos la composición espectral de la luz que nos llega de él, L_λ , sea una fuente de luz o un objeto iluminado, una medida de su color nos la dan los conocidos como valores triestímulo (X,Y,Z), determinados por las ecuaciones siguientes:

$$X = \int L_\lambda \bar{x}_\lambda d\lambda$$

$$Y = \int L_\lambda \bar{y}_\lambda d\lambda$$

$$Z = \int L_\lambda \bar{z}_\lambda d\lambda$$

Donde $(\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda)$ son las funciones de mezcla del observador patrón. También se adopta como medida del color la combinación del valor triestímulo Y y las llamadas coordenadas de cromaticidad (x, y) calculadas a partir de las expresiones:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

y representadas en el diagrama de cromaticidad que se observa en la figura 5. Ello constituye lo que se conoce como el sistema de representación del color CIE1931(x,y,Y). Con todo esto se consigue el objetivo de medir el color de un estímulo de color y satisfacer, momentáneamente, las necesidades de la industria, en aquel tiempo de forma principal la relacionada con señales y vidrios coloreados, la de pinturas y colorantes, la textil y la de la fotografía.

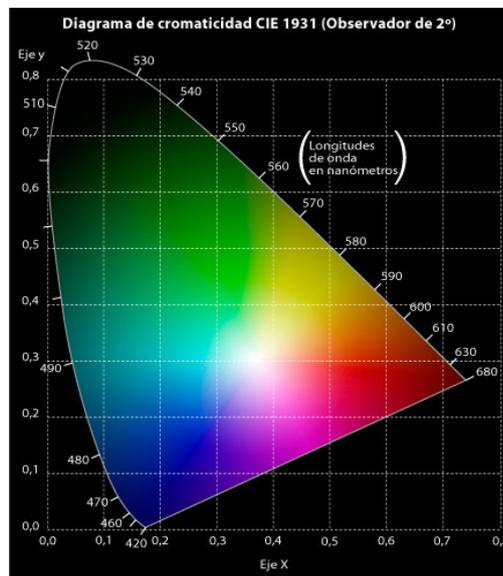


Figura 5: Diagrama de cromaticidad CIE1931.

En palabras del profesor Hunt, con la medida del color basada en el sistema CIE1931 se llega a saber si dos colores son iguales o no. Para lo primero han de tener iguales coordenadas de color. Pero en realidad, las coordenadas de color son números que no nos dan idea de la apariencia del color, es decir, no es una evaluación del tono (si es rojo o verde), de la claridad (más o menos claro) o del colorido (si es

más o menos vivo). El color medido me dice poco del color percibido. Volveremos sobre esto más adelante.

Desarrollo y retos a partir de 1931

Después de 1931, y tras las convulsas décadas de los años 30 y 40, se plantea intensamente la necesidad de abordar nuevos problemas planteados a partir de la definición del espacio de representación del color CIE1931(x,y,Y). Estos retos, que llegan hasta nuestros días, los hemos clasificados en cuatro apartados:

- Problemas asociados a las igualaciones de color.
- Diferencias y tolerancias de color.
- Medida de la apariencia del color.
- Colorimetría de imágenes en color: captura, procesado y reproducción de las mismas.

Comentemos los cuatro empezando por el primero.

Problemas asociados a las igualaciones de color

Las funciones de mezcla del observador patrón CIE1931 están referidas a un mismo conjunto de tres primarios y representan el promedio de las cantidades de cada primario que cada observador precisa para igualar el color correspondiente a cada una de las luces espectrales desde 380 a 760 nm, tomadas de 5 en 5 nm y con igual energía. Es decir, se obtuvieron haciendo igualaciones en un campo partido, en el que una mitad lo ocupaba el estímulo de color a igualar y en la otra mitad la suma aditiva de los primarios; aunque para algunas de las luces del espectro visible esta igualación no era posible y se requería hacer la igualación de la mezcla aditiva de dos primarios

y la mezcla aditiva del estímulo espectral y el tercer primario. Wright y Guild midieron las funciones de mezcla a un total de 17 observadores, lo que se puede considerar un tanto restrictivo, y más considerando que todos eran de raza caucásica. Ello ha llevado a que se hayan realizado medidas posteriores con más observadores y a la definición de un observador patrón desviado.

Otra objeción bien conocida es que al querer hacer coincidir la función de mezcla y_λ con la curva de eficiencia luminosa V_λ para que el valor triestímulo Y coincida con la luminancia absoluta o relativa del estímulo de color, se está aceptando los errores que se conocen que esta función presenta, y que afecta a sus valores, menores que los que debían ser, por debajo de 460 nm. A pesar de ser un hecho constatado, la industria sigue, desde 1924, manteniendo la V_λ en su forma tradicional, ya que se considera que no es un error suficientemente importante como para hacer cambiar toda la tecnología asociada a la Fotometría y Colorimetría.

Aparte de fallos admitidos en la aditividad de las mezclas de color, es decir, en la validez de las leyes de Grassmann, asociados a distintas condiciones de observación, como el nivel de luminancia, la objeción más importante al observador patrón CIE1931 que si se ha tenido en cuenta ha sido la relativa al tamaño de campo de visión en las igualaciones. Las funciones de mezcla del observador patrón fueron obtenidas para un campo de 2° . Es conocido que estas igualaciones pueden cambiar si el campo, aun permaneciendo central, aumenta de tamaño. Este hecho es debido a la distribución no uniforme de conos en la retina y al pigmento macular. A partir de los trabajos de Stiles y Burch [17], que determinaron funciones de mezcla para un conjunto de 64 observadores con campo de 10° , se definió un nuevo observador

patrón, el CIE1964, que si está implementado en la mayoría de los equipos de medida colorimétrica. La recomendación de la CIE es que se emplee este para campos de observación superiores a 4° y el CIE 1931 para campos inferiores a 4°.

Diferencias y tolerancias de color.

Tan importante como medir el color de un objeto es conocer la diferencia en color que existe entre dos objetos. Esto es fundamental en la industria. Imaginemos una fábrica de coches en la que se pretende fabricar durante una buena temporada un determinado modelo de un color de catálogo. ¿Cómo se puede asegurar que el color de este producto es el mismo todos los días que se fabrique? Podríamos responder: midiendo su color y viendo si todos los días se obtienen las mismas coordenadas de color. Esto, como pueden imaginar, es poco menos que imposible. Los procesos de producción pueden cambiar por condiciones ambientales, por la precisión de los equipos de fabricación y por otros muchos factores. Entonces la pregunta es: si cada día voy a conseguir un color del coche con unas coordenadas ligeramente distintas ¿un observador podría ver la diferencia? Dado que podemos suponer que la capacidad de discriminación cromática de un observador con visión del color normal es limitada, ¿qué tolerancia podemos admitir en las coordenadas de color para no desechar un producto? Este razonamiento es aplicable no solo a pinturas de coches sino a cualquier industria, por ejemplo, la textil.

Antiguamente el proceso de admitir o rechazar un producto por su color lo llevaba a cabo en la fábrica una persona, que llamaban colorista. Sin embargo, dado que se puede medir el color con

números, cabe la posibilidad de sustituir el colorista, que hace apreciaciones subjetivas, por equipos de medida con mayor grado de objetividad.

A partir de multitud de datos de discriminación cromática umbral o supra-umbral, siendo los más conocidos los de MacAdam [18] y de Luo y Rig [19] en forma de elipses, se han propuesto las conocidas como fórmulas de diferencias de color. En concreto en 1976 la CIE propuso las conocidas como CIELUV y CIELAB. En realidad, la CIE lo que hizo fue proponer unos nuevos sistemas de representación del color tales que las diferencias de color umbrales se correspondieran con distancias euclídeas en el espacio. Las expresiones de las coordenadas de color CIELAB(L^* , a^* , b^*) son:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right) - 16$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right]$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right]$$

Este sistema ha sido ampliamente aceptado e incluido en aparatos de medida y control en procesos industriales y en ciencia básica.

Puestas de manifiesto las limitaciones de la fórmula de color CIELAB, se han venido proponiendo otras muchas que pretenden mejorarla, como las CMC, CIE94 y CIEDE2000, esta última bastante aceptada. La mayoría de estas fórmulas son deducidas en coordenadas CIELAB y suelen dejar parámetros libres para adaptarlas a las distintas condiciones de observación y tipos de muestras.

Medida de la apariencia del color.

Como hemos indicado anteriormente, medir un color en coordenadas CIE1931 no nos dice nada sobre la apariencia de dicho color. Si al principio de esta exposición centrábamos la atención sobre la medida del color como la medida de una sensación, nos hace falta primero saber cómo se describe perceptivamente dicha sensación y luego ver la forma de evaluar parámetros numéricos que nos la describa.

Cuando se habla de un color, los psicólogos nos dicen que son necesarios tres atributos perceptivos para describirlo. De nuevo aparece el número tres. Estos atributos son la claridad, el tono y el croma para el color de un objeto. Este último se podría sustituir por la saturación. Dado un color podemos decir si es más claro o menos claro, evaluando de esta forma su claridad. Con el tono evaluamos lo que vulgarmente llamamos color, es decir la cualidad que nombramos con las palabras: azul, verde, amarillo, naranja, rojo y púrpura, de forma básica, o con muchos más nombres de arraigo en cada cultura: rosa, marrón, limón, etc. Por último, con la saturación o el croma evaluamos su pureza o viveza. Este atributo se identifica con el contenido cromático que tiene el color. El color blanco se considera sin contenido cromático y se dice que es acromático. Así un verde puede ser más vivo o más pálido. Los colores de máxima saturación son los espectrales. Los que menos los blancos y grises, que son nada saturados. Aunque a menudo se indica que un objeto es rojo, sabemos que la descripción es incompleta y que si queremos especificar tenemos que añadir si es más claro o más oscuro o si es más puro o menos.

En el caso del color de luces directas, lámparas o monitores, se habla de los atributos luminosidad, tono y saturación.

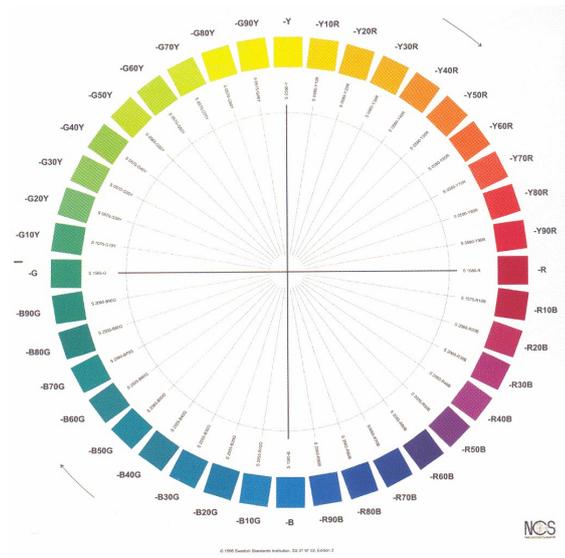


Figura 6: Círculo cromático Munsell.

Sobre estos conceptos se han desarrollado atlas de color que son colecciones de colores ordenadas según atributos perceptivos con distintas escalas. Todas disponen de un círculo cromático en el que se disponen los distintos tonos básicos del rojo al púrpura, figura 6, en cuyo centro se haya los acromáticos, y una dimensión radial de croma y una vertical de claridad. En la figura 7, se muestra un ejemplo del atlas Munsell uno de los más difundidos, junto con los de Ostwall y el de la OSA. Con estos atlas se ha medido color por comparación visual con sus muestras y tienen una indudable aplicabilidad práctica en el mundo del diseño y la arquitectura. El de mayor aceptación en la actualidad en estos campos es el conocido como NCS (Natural Color System), desarrollado en la segunda mitad del siglo XX en Suecia, por Hard, Tonnquist y Sivik.

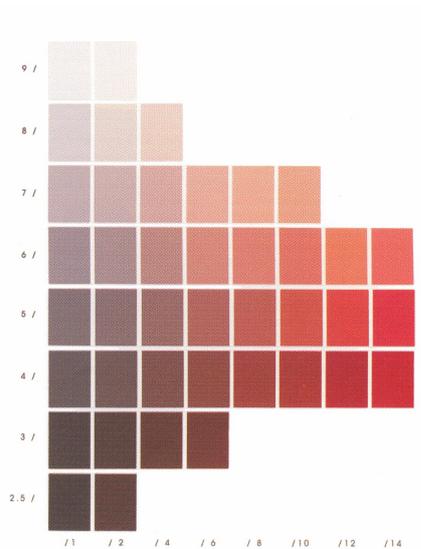


Figura 7: Hoja del Atlas Munsell de igual tono y distinta claridad y croma.

Otros muchos atlas de color han sido propuestos a lo largo de la historia por distintos investigadores en el campo de las artes. Muchos teóricos en este campo, desde Chevreul, han elaborado sus propios sistemas de ordenación de colores conforme a su propia paleta y con las limitaciones de los materiales usados en su elaboración.

En otras ocasiones se han elaborado colecciones de colores adaptados a una necesidad determinada en un determinado campo de aplicación y con una notación propia, como es el caso de las muy conocidas y utilizadas colecciones Pantone.

El primer intento de medir la apariencia a partir de medidas colorimétricas es el sistema CIELAB, descrito anteriormente. En este caso, la definición de la variable L^* es tal que nos permite identificarla con la claridad en una escala de 0 a 100. Por otra parte, a partir de las variables a^* y b^* , se puede identificar el tono y el croma con las variables:

$$h_{ab} = \arctan(b^* / a^*)$$

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

Es decir, el tono con el ángulo de tono h^* , que como se observa en la figura del diagrama cromático figura 8, nos da idea del lugar en el que se encuentra el tono de un color en círculo cromático que se genera, y la variable C^* , del croma, o distancia radial al centro, donde se localiza el blanco o el gris.

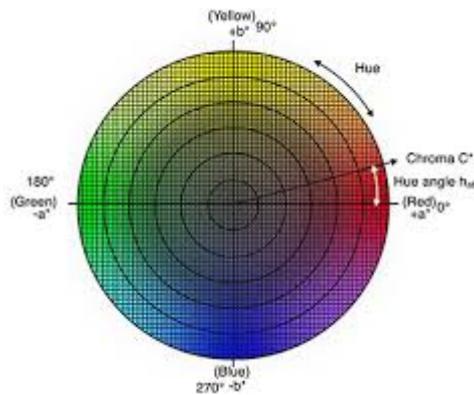


Figura 8: Diagrama de cromaticidad CIELAB.

De hecho, se dice que el sistema CIELAB ha sido el primer modelo de apariencia del color propuesto. Sin embargo, no se considera satisfactorio. Ello es debido a que sabemos que la apariencia de un color cambia con muchos parámetros que no han sido considerados en el modelo: el nivel de iluminación, la composición espectral del iluminante, el campo circundante, el estado de adaptación cromática y otras más condiciones de observación. Esto ha hecho que este campo de investigación sea muy activo, con aportaciones importantes de Fairchild, Hunt, Nayatani y otros. El resultado ha sido la propuesta de distintos modelos de apariencia, como el CIE97, o el más reciente en ser medianamente aceptado, el CIECAM2002.

No se puede decir que este campo esté cerrado y de hecho la mayoría de los instrumentos se limitan a implementar los parámetros de medida de la apariencia del color descritos para el sistema CIELAB. En el futuro tendremos que ver nuevas aportaciones en este campo en las que se conjuguen su eficacia con su facilidad en su uso, ya que los modelos hasta ahora propuestos son, en cierto modo complejos, y con muchos parámetros libres.

Colorimetría de imágenes en color: captura, procesado y reproducción de las mismas.

La Colorimetría se ha desarrollado de forma principal hasta la fecha para hacer una medida de color de objetos más o menos uniformes y más o menos extensos. Sin embargo, en la actualidad es cada vez más importante la evaluación del color en imágenes ya que estamos en el mundo de ellas. Con distintos equipos se captan continuamente imágenes en color: cámaras de imagen fija o video, fotocopiadoras y escáneres, o se quieren reproducir con impresoras, o visualizarlas en monitores de distinto tipo, pantallas de móvil o de televisión. Además, transmitimos vía red imágenes en color que queremos que se corresponda una vez recibidas con las originales. En resumen, hay todo un mundo nuevo en la reproducción, compresión y captura de imágenes, que supera ampliamente los problemas que tenía hace un siglo la industria de la fotografía o las artes gráficas en color.

Este campo es realmente muy activo desde distintas perspectivas. De una parte, la ciencia básica y aplicada, trata de encontrar modelos de la evaluación de la calidad de las imágenes por métodos objetivos. En estos modelos, al tratarse de imágenes, han de tenerse en cuenta no sólo los aspectos cromáticos sino también, y de forma fundamentales,

los relativos a los aspectos espaciales de la estructura de las imágenes. De ahí que estos modelos evalúen tanto parámetros estadísticos espaciales de las imágenes como cromáticos. Todo ello además teniendo en cuenta las características propias de la visión humana tanto en lo relativo a la visión espacial, como a la cromática, los aspectos temporales y de percepción de la profundidad.

De otra parte, se sitúa la investigación y desarrollo en el mundo de la empresa de dispositivos de captura, reproducción y multimedia. Este campo es muy activo y competitivo e incide de forma fundamental sobre lo que conocemos como gestión del color o en inglés “color management”. Es decir, en las conexiones que debe haber desde los sistemas de captura a los de reproducción de imágenes, e incluir a los sistemas de transmisión si los hubiera. En este campo se pretende trabajar en sistemas de medida y reproducción independientes del dispositivo y con estándares unificados que permitan la comprensión entre equipos y tecnologías.

Como es de suponer toda esta investigación está en pleno desarrollo y evolución. A veces se plantean problemas de entendimiento entre las personas que la abordan. Al ser el color un tema multidisciplinar es abordado desde muchos campos del saber y a menudo sin asesorarse previamente de lo ya desarrollado en otros campos. Esto ha pasado tradicionalmente entre científicos (físicos y químicos principalmente) y arquitectos, diseñadores y artistas. Pero también sucede entre científicos e ingenieros, informáticos y electrónicos, en el campo de los dispositivos multimedia. Siempre hace falta, y ahora aún más, foros de encuentro de las distintas ramas del saber para encontrar lenguajes comunes o evitar esfuerzos pretendidamente novedosos de lo ya hecho.

La Colorimetría en España y en Granada

Los estudios de Colorimetría España podemos entender que comienzan en el Instituto de Óptica “Daza de Valdés” del CSIC en la década de los 50 del siglo pasado, en torno a dos personas, los profesores de investigación Lorenzo Plaza y Antonio de la Cruz. Ambos realizan estancias en el extranjero, Estados Unidos de América y Canadá, trabajando en los equipos de los doctores Judd y Moreland. También el profesor Mariano Aguilar va a Inglaterra a trabajar con el profesor Styles, pero más centrado en la Óptica Fisiológica.

El profesor Lorenzo Plaza a su vuelta de la estancia en Estados Unidos comienza una actividad de promoción de la Colorimetría en España y en el extranjero. En concreto, en 1965 crea, junto con los profesores Antonio de la Cruz y Enrique Sauras, el Comité Español del Color. Este comité pretende ser una sociedad que agrupe a todas aquellas personas interesadas en el estudio del color desde cualquier punto de vista científico, técnico o humanístico, al igual que ya ocurriría en Estados Unidos con el Inter-Society Color Council y en el Reino Unido con el Colour Group of Great Britain. La fundación del Comité Español del Color es anterior a la de la Sociedad Española de Óptica en 1968, en la que se integra en la actualidad.

Cuando en 1967 se funda la AIC, International Color Association, el Comité Español de color es uno de los nueve firmantes de su acta de fundación, figura 9. Es este caso España se adelanta en su tiempo y forma parte de los países punteros en este campo. La AIC se crea como una sociedad que agrupa a sociedades nacionales, que son sus miembros. Esta sociedad empieza a organizar congresos anuales cada 4 años y los conocidos como interim y midterm meetings, entre

congresos. Estas conferencias no son solo el foro en que presentar las nuevas investigaciones en el campo del color, sino el punto de encuentro de los profesionales que abordan este estudio desde muy diversos puntos de vista: la Física, la Química, la Fisiología, la Ingeniería, la Psicología, el Arte, la Arquitectura o el Diseño. En 2005, el X Congreso Internacional del Color de la AIC fue celebrado en Granada, con un gran éxito de participación.

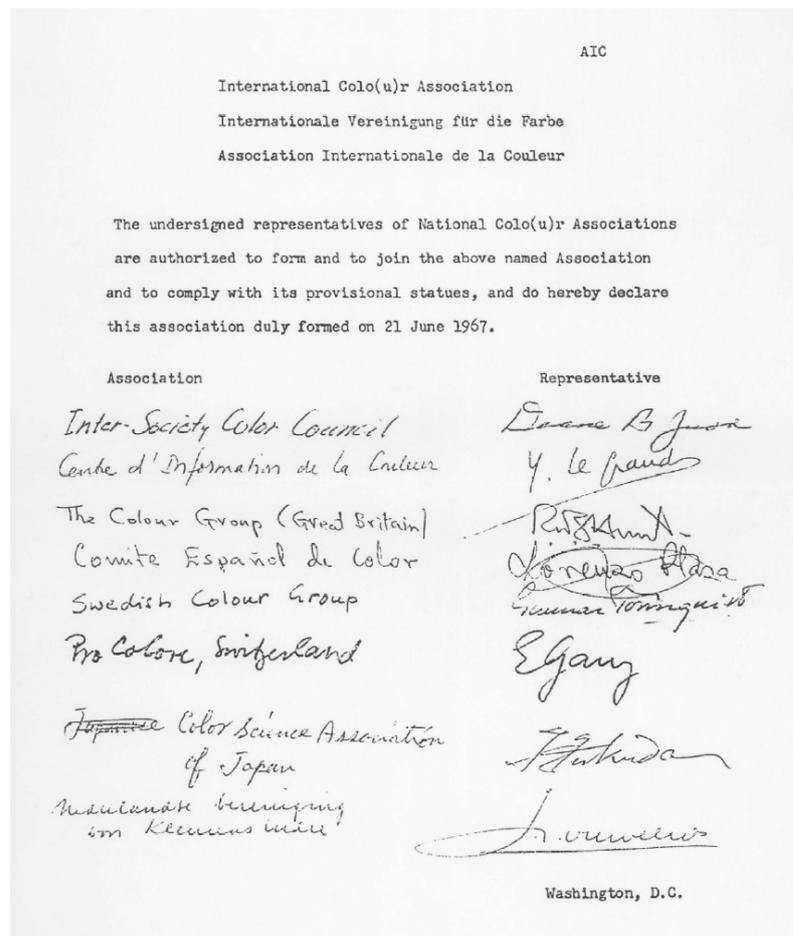


Figura 9: Acta de constitución de la International Color Association (AIC).

Dentro de España, considero que un momento importante se presenta a final de la década de los 80. En ese momento accede a presidente del Comité Español del Color el Profesor Enrique Hita Villaverde, que lo

impulsa de forma muy fundamental, en especial haciendo participar a más grupos que trabajan en la Ciencia del Color en España y fomentado la celebración del primer Congreso Nacional del Color, que se celebra en Logroño en junio de 1989. Desde entonces se han celebrado 12 Congresos, cada 2 o 3 años.

No pretendo hacer una revisión exhaustiva de la historia de la Colorimetría en España, pero creo que es un hito muy importante el comienzo de sus estudios en Granada. A principios de los 70 llega a Granada el profesor Manuel Álvarez-Claro, que había realizado su tesis doctoral el Instituto de Óptica del CSIC bajo la dirección del profesor Antonio de la Cruz en temas relacionados con igualaciones metámeras y adaptación cromática. El profesor Enrique Hita Villaverde se convierte en su doctorando y trabaja en el campo de la discriminación cromática en igualaciones metámeras. Este el punto de partida de los estudios del color en Granada, dirigidos por el Profesor Hita Villaverde, que tantos frutos ha dado y que ha hecho que nuestra Universidad haya sido el centro de atracción principal de los estudios del color en España en las últimas décadas. Tras la lectura de la tesis doctoral del profesor Enrique Jiménez, en 1980 nos incorporamos el profesor Luís Jiménez del Barco y yo mismo como doctorandos de Enrique Hita y posteriormente se incrementa el grupo considerablemente, en especial, a partir de la creación de los estudios de Óptica y el Departamento de Óptica.

Como indicaba no pretendo hacer historia sino esbozar breves pinceladas de lo que ha sido el desarrollo de la Colorimetría en Granada. En la actualidad en nuestro departamento hay grupos muy activos en campos diversos: la Colorimetría de distintos tipos de materiales con aplicaciones industriales o en salud, la visión del color,

en especial el estudio de métodos de detección de deficiencias en la visión del color y de las implicaciones de estas en los procesos de aprendizaje (línea clásica en nuestro departamento desde hace años), fórmulas de diferencias de color, aspectos cromáticos en parámetros de la Óptica Visual y adquisición y procesado de imágenes RGB.

En España, han sido muy importantes los grupos de las universidades de Valencia, de la Universidad Politécnica de Cataluña, de Alicante, de Sevilla, de la Rioja, Complutense de Madrid, de Navarra, de Extremadura y del Instituto de Óptica del CSIC. Muchos de ellos siguen muy activos en los campos de la Metrología, la Colorimetría de alimentos, la visión normal y defectiva del color o el procesado de imágenes en color.

El Grupo de Imágenes en Color de la Universidad de Granada. Color Imaging Group.

Con el ánimo de seguir concretando actividades en el campo de la Colorimetría hasta llegar a mi entorno, abordo ahora lo que ha sido mi evolución en este campo y la del grupo de personas de las que he estado rodeado. Para ello voy a repasar los temas de investigación en los que he estado involucrado a lo largo de estos años, que han sido principalmente 3 y otros que podemos llamar “colaterales”. Estos tres temas han sido:

- Discriminación cromática y fórmulas de diferencias de color.
- Constancia de Color.
- Adquisición y procesado de imágenes en color y hiperspectrales.

En el primero de ellos hice mi tesis doctoral bajo la dirección del profesor Enrique Hita Villaverde, sobre la determinación de umbrales diferenciales de color bajo comparación sucesiva de estímulos. En esa

época el pequeño grupo de investigación que dirigía el Prof. Hita centraba su investigación sobre el tema de la evaluación de la discriminación cromática y la influencia de distintos parámetros experimentales sobre la misma: método de presentación de estímulos (simultánea o sucesiva), tipo de igualaciones (isómeras o metámeras), tiempo de exposición de los estímulos, cromaticidad de campo circundante y otros. De esta forma no solo me limité a los trabajos de mi tesis doctoral, sino que participé activamente en la realización de otras como las de los profesores Jiménez del Barco o Cervantes Madrid. Así mismo, mis primeras tesis dirigidas se entraron en este campo, en concreto las de los profesores Melgosa Latorre y García García. En estas últimas además nos adentrábamos en el campo de la evaluación y propuesta de fórmulas de diferencias de color. Tan importante como determinar mediante elipsoides o elipses los valores de los umbrales diferenciales de color o cromaticidad, es decir las zonas de un espacio de color en el que se representan estímulos indiscernibles de uno dado, lo es representar matemáticamente dichas zonas, lo que tiene un interés indudable para la industria. Es decir, determinar lo que se conocen como fórmulas de diferencias de color, o evaluar las ya propuestas y determinar la influencia que sobre ellas ejercen las condiciones de observación. Además, de los datos de discriminación cromática se pueden deducir importantes conclusiones sobre los mecanismos de la visión del color, como así hicimos.

Al mismo tiempo participé en otros trabajos que involucraban el color, como su influencia en el tiempo de reacción visual o en la agudeza esteresocópica, o la Colorimetría de alimentos y dental. También la determinación estadística del porcentaje de personas con deficiencia de la visión del color y su influencia en los procesos de aprendizaje.

Colaboré por tanto en la realización de la tesis doctoral del prof. Perales Palacios en el que se estudió una población de 5000 escolares de la provincia de Granada. La línea de investigación en Didáctica ha sido retomada en los últimos tiempos con el prof. García García, estudiando la influencia del color en distintos aspectos del ámbito educativo.

Otro de los temas que atrajo nuestra atención fue el de la constancia de color. Esta es la característica de la visión del color humana por la que el color de un objeto nos parece el mismo, independientemente de la fuente de luz que lo ilumina. Esto ocurre siempre que las variaciones en la composición espectral de la fuente de luz no sean demasiado drásticas. Todos hemos experimentado como el color de un objeto puede cambiar cuando pasamos de verlo bajo luz del día a cuando lo vemos bajo alguna fuente de luz artificial, como los antiguos tubos fluorescentes. Sin embargo, no percibimos cambios cuando lo vemos en el exterior a distintas horas del día o en distintas condiciones atmosféricas, cuando la luz puede cambiar bastante, o bajo fuentes de luz artificiales como lámparas de incandescencia o fuentes de tipo LED de las actuales. El color medido cambia, incluso fuera del umbral tolerable, pero nuestra percepción no. En cierto modo, nuestro cerebro, se dice, que es capaz de descontar el iluminante y hacer la visión del color independiente del mismo. En este campo dirigí la tesis doctoral del profesor Nieves Gómez en el que hicimos experiencias psicofísicas para la determinación del papel que juegan los distintos mecanismos de segunda etapa de la visión del color y establecer las relaciones afines que la representan.

Otros trabajos en el campo de la visión del color realizados han sido la determinación computacional y experimental de la SMSF (Spectral

Modulation Sensitivity Function), lo que se realizó en nuestro grupo de forma innovadora, con los profesores Nieves y Valero Benito. También en el campo de la visión del color y la Óptica Fisiológica dirigí las tesis doctorales de los profesores Yebra Rodríguez y Olivares Jiménez.

Del campo de la constancia de color era inmediato pasar al campo de la visión artificial. Si pensamos por ejemplo en el campo del reconocimiento automático de objetos y materiales, este debe ir ligado a la determinación experimental de características propias del objeto, como es la reflectancia espectral del mismo, con independencia de la fuente de luz que lo ilumine. Por tanto, si se desarrollan algoritmos que simulen la constancia de color humana con sistemas artificiales compuestos de cámara digital y de un sistema de computación asociado, podría determinarse la reflectancia espectral de un objeto, que es una característica del mismo independiente del iluminante, como la constancia de color que, como hemos dicho, es la percepción del color de un objeto con independencia de la fuente de luz que lo ilumine.

Como quiera que algunos de los algoritmos desarrollados en este campo, se basan en la representación matemática de la reflectancia espectral de objetos y de la composición espectral de iluminantes mediante modelos lineales de pocos parámetros, lo primero que hicimos fue la determinación de bases de autovectores para la representación de la reflectancia de objetos artificiales, que constituyó la tesis doctoral del Prof. García Beltrán, trabajo que luego se amplió a objetos naturales. Sus resultados mostraron que un modelo lineal de dimensión menor que 8 puede dar muy buenos resultados para la reconstrucción adecuada de la reflectancia basada en un modelo lineal

de pocos parámetros. De igual forma, para la composición espectral de iluminantes también obtuvimos bases de representación conjunta de iluminantes naturales y artificiales, pero hicimos un especial hincapié en los primeros, con una extensa campaña de medidas de la irradiancia solar en Granada, o lo que es lo mismo la caracterización espectral de la luz-día y de medidas de la radiancia espectral del cielo. Este conjunto de medidas, que ha tenido una gran repercusión internacional, constituyó la tesis doctoral de Prof. Hernández Andrés, junto al posterior procesado de los datos. De hecho, estos datos han sido utilizados por muchos investigadores de otros países y recientemente ha sido adoptada por la empresa Apple.

Todo ello nos llevó a adentrarnos de lleno en el campo de la adquisición y procesado de imágenes multiespectrales e hiperespectrales. Este campo consiste en no limitarse a captar imágenes RGB, es decir con cámaras de tres sensores, como lo hacen habitualmente las comerciales, sino hacerlo con más de tres sensores, hasta 9 o 10, y entonces hablaríamos de cámaras multiespectrales, o más de 10, y hablaríamos de cámaras hiperespectrales o ultraespectrales. Lo que en el fondo íbamos buscando es conocer la información espectral de la luz que viene de un objeto longitud de onda a longitud de onda, por ejemplo, de 5 en 5 nm, desde 400 a 700 nm si trabajamos en el visible. Ello supone 61 valores en cada píxel de la imagen, que es lo que llamamos información hiperespectral o simplemente espectral. Esta información se considera fundamental cuando queremos conocer la información oculta de un objeto, por ejemplo, en un sistema de reconocimiento, o en un sistema de reproducción del color independiente del iluminante.

En la actualidad empieza a haber en el mercado cámaras hiperespectrales “fiables”, pero en un principio para obtener la información espectral en imágenes era más inmediato hacerlo a partir de imágenes multiespectrales captadas con cámaras RGB o monocromo a las que se acoplaban filtros, de 2 a 9. A partir de esas pocas imágenes se aplicaban algoritmos para extraer la información espectral. La optimización de estos sensores y algoritmos constituyó la tesis doctoral de Miguel Ángel López Álvarez, actualmente trabajando en Apple en California, que codirigí con el Prof. Hernández Andrés. En el mismo campo, con el Prof. Nieves López codirigí la tesis doctoral de Clara Plata Ríos en la incluíamos variables importantes en el problema como la textura de los objetos y el trabajar en 3-D, variando la posición relativa de objeto e iluminante.

Un estudio que me pareció interesante fue la mejora en los métodos de recuperación de la visibilidad y el contraste en imágenes degradadas por la Atmósfera, debido a niebla, bruma o neblina de origen natural o artificial. La mayoría de los métodos propuestos o bien trabajaban en el infrarrojo o necesitaban información previa de parámetros atmosféricos o hacían reconstrucciones de imágenes con colores que no se correspondía con la realidad. Este tema era una evolución de lo ya estudiado en aspectos de la Óptica Atmosférica, con la determinación de las características espectrales de la luz-día. Nuestra idea era y así hicimos, dentro del contexto de la tesis doctoral de Raúl Luzón González, el desarrollo de un algoritmo de bajo coste computacional que no necesitaba de información previa y que permitía en tiempo real mejorar la visibilidad y el contraste de imágenes y eliminar, por tanto, los efectos nocivos que introducen las

condiciones atmosféricas adversas. Todo ello basado en un modelo físico de scattering en la Atmósfera.

En la actualidad estamos inmersos en dos proyectos que uno acaba y otro comienza, financiados ambos por el Plan Nacional de Investigación del Ministerio. El primero titulado: “Identificación automática de información relevante en imágenes multiespectrales anotadas en vías urbanas y aplicaciones a la monitorización de seguridad y videovigilancia” es continuación de otro anterior de título “Diseño y optimización de un dispositivo portátil multiespectral de alto rango dinámico para la identificación automática de elementos singulares en escenas urbanas”, que como vemos inciden en el tema de la captura de imágenes multiespectrales para su posterior aplicación a campos específicos, en este caso a los problemas relacionados con la seguridad en el transporte y la vigilancia, de tanto interés actual. En este proyecto hemos publicado y puesto a disposición pública bases de datos que puedan permitan ser usadas para la mejora en la identificación de objetos en vías públicas, como señales u otros vehículos.

El segundo de los proyectos mencionados que ahora comienza es continuación de los trabajos anteriores en el campo de la mejora de la visibilidad de imágenes deterioradas por la Atmósfera. Su título es “Mejora automática de Imágenes Degradadas por la Atmósfera con técnicas Multiespectrales en el visible e infrarrojo”, en el que queremos ampliar lo hecho anteriormente en imágenes RGB a imágenes multiespectrales e hiperespectrales, incluyendo el infrarrojo cercano.

Análisis computacional de pinturas (obras de arte)

He querido mostrar en lo anterior una perspectiva sucinta de los temas que me han interesado más en el campo de la Colorimetría, la visión del color y la adquisición y procesado de imágenes en color e hiperespectrales, a costa de dejarme en el tintero algunas cosas hechas en otros campos para no extenderme demasiado. Quiero, sin embargo, terminar este discurso con un aspecto de la investigación que me interesa en la actualidad. Me refiero al análisis computacional cromático de obras de arte, en concreto pinturas.

La pintura es una de las expresiones artísticas de mayor presencia en la Sociedad. A lo largo de los siglos, los pintores han querido plasmar la realidad o hacer una interpretación de la misma conforme a su visión personal. Los distintos estilos y técnicas son reflejo de cada época y la evolución es clara a lo largo de los siglos, como nos muestran los libros de Historia del Arte.

Distintos autores han realizado estudios computacionales sobre la caracterización espacio-cromática de pinturas. Para ello han aplicado técnicas matemáticas que extraen parámetros estadísticos a partir de imágenes digitales de pinturas conocidas. Los objetivos de dichos trabajos han sido principalmente el estudio de si las pinturas reproducen o no los mismos parámetros estadísticos encontrados en escenas naturales (de paisajes o personas), el poder establecer diferencias entre estilos basados en determinados parámetros (Estilometría), la posible utilización de técnicas estadísticas para la distinción de originales de imitaciones de un determinado autor, el estudio de la evolución de un determinado pintor o grupo de pintores y la posible evaluación computacional de la estética. Graham and Redies [20]

Respecto de las distribuciones de color en las pinturas, Graham y Redies apuntan que “hasta la fecha no existen trabajos a gran escala sobre la relación estadística entre las distribuciones de color en el arte y en las escenas naturales. Intuimos que en futuros trabajos sobre obras de arte en color mostrarán similitudes en la codificación del color a las encontradas en escenas naturales, dado que se han descrito relaciones entre la estadística del color de las escenas naturales y el procesamiento del color por el sistema visual humano”. Montagner et al. [21] han comparado las gamas de color encontradas para un conjunto de escenas naturales y 44 pinturas de distintos autores. Sus resultados muestran diferencias en las pendientes de las elipses calculadas para caracterizar las gamas de color en el diagrama cromático Cielab (a^*b^*). Nascimento et al. [22] han mostrado que las gamas de color empleadas por los pintores suelen coincidir con las preferencias estéticas de los observadores de las pinturas. Montagner et al. [23] han mostrado las posibilidades del estudio estadístico de la gama cromática de un solo pintor.

En el momento actual pretendemos hacer un análisis de las gamas cromáticas de un conjunto obras de maestros de la pintura para poder establecer similitudes y diferencias entre ellos conforme a un análisis computacional de sus pinturas. Es decir, establecer y calcular un conjunto de parámetros cromáticos que nos permitan caracterizar cada pintura y ver si puede ser definitorio del estilo y obra de un pintor.

Este año se celebra el bicentenario del Museo del Prado, lo cual ha sido una perfecta excusa para enfocar este estudio sobre la obra de grandes maestros con un número importante de pinturas en este museo. Por ello seleccionamos distintos cuadros de Tiziano (43), Rafael (8), Brueghel el Viejo (50), El Greco (34), Rubens (96), Ribera

(64), Velázquez (51), Murillo (40), Goya (118), tomadas de la página web del museo del prado [24] de acceso libre. Los valores sRGB para cada pixel de las imágenes fueron transformados a los espacios de representación del color CIE1931 (x,y,Y) y Cielab (L*,a*,b*). Los parámetros determinados para cada pintura fueron: las medias de los valores (x,y), (L*,a*,b*), la gama cromática en el diagrama (a*,b*), caracterizada mediante una elipse que contiene el 95% de los colores representados de la que determinamos sus parámetros principales (orientación, relación de semiejes y área), el número de colores discernibles [21], el número de colores relevantes y el porcentaje de colores oscuros, es decir de $L^* < 30$.

El número de colores relevantes merece una explicación aparte. Cuando se obtiene el número de colores discernibles, es decir, dividiendo el espacio de color en cubos de 1 unidad Cielab de lado y contando el número de cubos ocupados por la gama de color, se obtienen en cualquier escena, miles de ellos. Sin embargo, hemos desarrollado un método para determinar el número de colores que a simple vista un observador no experimentado podría decir que son los principales en una imagen. Es decir, un número que va a rondar como máximo entre 15 y 20. Basados en un proceso iterativo de segmentación y en experiencias psicofísicas, llegamos a un método para determinar el número de colores relevantes, consistente en dividir el espacio de color en cubos de 20 unidades Cielab de lado y contar los cubos que al menos eran ocupados por al menos el 3% de los colores totales, o cubos ocupados con colores de al menos $L^* > 80$ o $C^* >$ percentil 50 del croma y que tuvieran al menos un 0.3% del total de colores. El color relevante se determinaba como la media de los colores en cada cubo.

En la Fig. 10 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para una pintura y sus colores relevantes obtenidos.



Figura 10: Ejemplo de colores relevantes

	Tiziano	Rafael	Brueghel	Greco	Rubens	Ribera	Velázquez	Murillo
x medio	0,350	0,356	0,347	0,342	0,354	0,356	0,351	0,352
y medio	0,361	0,366	0,365	0,356	0,362	0,359	0,363	0,358
L* medio	55,74	54,53	57,74	58,42	60,21	48,23	56,35	55,87
a* medio	1,99	2,50	-0,04	0,91	2,63	3,36	1,52	3,15
b* medio	12,00	13,85	12,27	9,79	13,66	11,22	12,37	11,74
N° Cl. Dc	22529	31195	31344	22416	24895	12995	13348	16707
N° Cl. Rel	13,6	17,5	17,4	17,0	15,7	10,9	11,5	14,1
Orient. elipse	76,56	72,26	71,45	74,50	67,00	71,22	69,32	67,21
Rel.semiejes elipse	0,46	0,45	0,50	0,53	0,46	0,36	0,41	0,41
Área elipse	938,11	2218,51	1261,53	943,10	1021,10	688,66	567,56	686,01
% oscuros	39,87	43,56	37,17	33,01	28,67	65,26	38,40	44,95

En la tabla se muestran los valores medios por pintores salvo para Goya. Como podemos observar se pueden extraer una serie de conclusiones en cuanto a las características comunes y discrepantes de las distintas gamas de colores. Así, los valores medios de los centros

de las elipses, su orientación y su relación de semejeas presentan valores similares para los distintos pintores y en consonancia con lo encontrado por otros autores [20]. Las discrepancias surgen en el valor del área de las elipses, el número de colores discernibles y el porcentaje de colores oscuros. Los dos primeros parámetros presentan valores menores, en general, para los pintores del barroco respecto de los del renacimiento. El porcentaje de colores oscuros aumenta en el barroco. Hay, por tanto, una disminución del tamaño de las gamas cromáticas en el paso del renacimiento al barroco. Casos extremos sería Rafael de un lado y Ribera de otro. En el caso de los colores relevantes se da una clara disminución para Ribera, lo que está en consonancia con su gama cromática más reducida, y para Velázquez, al que siempre se le ha atribuido una paleta restringida.

Estos resultados se ven refrendados en el caso de analizar la pintura de Goya, que hemos dividido en tres periodos: uno primero de gran variedad cromática en sus pinturas, correspondientes a los encargos para la Real Fábrica de Tapices. El segundo, de madurez de su obra, centrada en gran parte en retratos, y un tercero que se corresponde con las conocidas “pinturas negras” Los resultados muestran de nuevo que las diferencias entre periodos son acusadas en las características cuantitativas de la extensión de la gama de colores, siendo de mayor volumen para las pinturas de tapices y menor para las pinturas negras. Con esto termino esta memoria en la que he pretendido dar un breve paseo por el campo de la Colorimetría, desde su origen, pasando por su formulación y llegando a su momento actual. He querido plasmar que es una ciencia que tiene aún problemas de crecimiento y retos muy importantes, para cuya resolución hace falta la conjugación de esfuerzos de personas de distintas ramas del conocimiento: físicos,

químicos, biólogos, psicólogos, ingenieros, diseñadores y artistas, dado el carácter multidisciplinar de la medida del color. Esperemos y deseamos que estos avances se presenten en los años próximos.

Referencias

- [1] CIE Proceedings 1931, Cambridge: Cambridge University Press.
- [2] I. Newton 1671, A letter of Mr. Isaac Newton , Professor of Mathematics in the University of Cambridge; containing his new theory about light and colours: sent by the author to the publisher, Feb. 6. 1671/72; In order to be communicated to the R. Society, Philosophical Transactions of the Royal Society 6, 3075-3087.
- [3] I. Newton 1730, Opticks, or treatise of the reflections, refractions, inflections and color of light, London: Joseph Sreater.
- [4] T. Young 1817, Chromatics, Suplement to the Encyclopaedia Britannica 3, 141-163.
- [5] H. Helmholtz 1852, Über die theorie der zusammengesetzten farben, Annalen der Physik 87, 45-66.
- [6] W.A.H. Rushton 1965, Chemical basis of colour vision and colour blindness, Nature 206, 1087-1091.
- [7] J.K. Bowmaker y H.J.A. Dartnall 1980, Visual pigments of rods and cones in a human retina, Journal of Physiology 298, 501-511.
- [8] H.G. Grassmann 1853, Zur theorie der farbenmischung, Annalen der Physik 89, 69-84.
- [9] J.C. Maxwell 1860, On the theory of the compound colours and the relations of the colours in the spectrum, Philosophical Transactions of the Royal Society 150, 57-84.
- [10] L. Rayleigh 1881, Experiments on colours, Nature 25, 64-66.

- [11] E. Schrödinger 1920, Grundlinien einer theorie der farbemetrik im tagessehen, *Annalen der Physik* 63, 481-520.
- [12] E. Hering 1878, Zur lehre vom lichtsinn. Sechs mittheilungen an die Kaiserliche Akademie der Wissenschaften in Wien, Viena: Carl Gerold's Sohn.
- [13] R.L. De Valois, I. Abramov y G.H. Jacobs 1967, Analysis of response patterns of LGN cells, *Journal of the Optical Society of America* 56, 966-977.
- [14] D. Jameson y L.M. Hurvich 1955, Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. I. chromatic responses and spectral saturation, *Journal of the Optical Society of America* 45, 546-552.
- [15] J.D. Mollon 2003, The origin of modern color science, *The Science of Color* 2nd edition, Amsterdam: Elsevier.
- [16] W.D. Wright 2007, Professor Wright paper from the golden jubilee book: the historical and experimental background of the 1931 CIE system of Colorimetry, *Colorimetry: understanding the CIE system*. Hoboken New Jersey: John Wiley and Sons.
- [17] W.S. Stiles y J.M. Burch 1959, NPL colour matching investigation: final report (1958), *Optica Acta* 6, 1-26.
- [18] D.L. MacAdam 1942, Visual sensitivities to color differences in daylight, *Journal of the Optical Society of America* 32, 247-274.
- [19] M.R. Luo y B. Rigg 1986, Chromaticity-discrimination ellipses for Surface colors, *Color Research and Application* 11, 25-42.
- [20] D.J. Graham y C. Redies 2010, Statistical regularities in art: relations with visual coding and perception. *Vision Research* 50, 1503-1509.

- [21] C. Montagner, J.M.M. Linhares, M. Vilarigues y S.M.C. Nascimento 2016, Statistics of color in paintings and natural scenes. *Journal of the Optical Society of America A* 33, A170-A177.
- [22] S.M.C. Nascimento, J.M.M. Linhares, C. Montagner, C.A.R. Joao, K. Amano, C. Alfaro y A. Bailao 2017, The colors of paintings and viewers' preferences. *Vision Research* 130, 76-84.
- [23] C. Montagner, J.M.M. Linhares, M. Vilarigues, M.J. Melo y S.M.C. Nascimento 2018, Supporting the history of art with colorimetry: the paintings of Amadeo Souza Cardoso. *Color Research and Application* 43, 304-310.
- [24] <https://www.museodelprado.es/coleccion>.

**Contestación al discurso de Ingreso en la Academia de Ciencias
Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada del
Ilmo. Sr. D. Javier Romero Mora**

Excmo. Sr. D. Enrique Hita Villaverde

**Excmo. Sr. Presidente de Honor de la Academia,
Excmo. Sr. Presidente de la Sección de Físico-Química,
Ilmo. Sr. Secretario General,
Excmos. e Ilmos. Sras. y Sres. Académicos,
Señoras y Señores:**

Hoy es para mí un día atípico, curioso diría yo, pues mi Academia me honra con la distinción de dar cumplimiento a la defensa preceptiva de nuestro aspirante con la realización de su laudatio, cosa que hago lleno de satisfacción por un lado y de

preocupación por otro, sentimientos que se mezclan con los de una confusión, ciertamente notoria, al no saber bien cómo conjugar presidencia con padrinazgo, de ahí este baile de personajes que están presenciando en las mesas de actuación y que espero sepan disculpar.

Les decía que asumo la responsabilidad de contestar al discurso de ingreso que acaba de darnos nuestro ya casi compañero el Dr. Romero Mora, lleno de satisfacción y orgullo, y ello por las razones que trataré de explicar en relación con nuestra conexión profesional y humana, pero, también, bajo la preocupación de no llegar a ser capaz de hacerlo con la profundidad y el rigor que la calidad profesional y personal del aspirante exigen.

Y es que acontece que mi conexión con el profesor Romero Mora ha sido tan extensa y tan intensa que no sé si seré capaz de dejarme llevar solamente, como debiera ser, por la objetividad al analizar su currículum, así como su discurso de investidura, en definitiva sus aportaciones al mundo de la Ciencia y del conocimiento así como sus esperadas proyecciones futuras desde el rango de académico de nuestra Institución, o no ser capaz de evitar el arrastre que el afecto personal conlleva; ustedes juzgarán.

SOBRE LA PERSONA EN EL CONTEXTO DE NUESTRA HISTORIA

Conozco al profesor Romero Mora desde el año 1977 en el que cursó, dentro de su tercer curso de la entonces licenciatura en Ciencias Físicas, la asignatura de Óptica que, por aquellas fechas, yo impartía en nuestra querida Facultad de Ciencias, y he de decirles que ya entonces nuestro personaje, como se suele decir por aquí, “apuntaba maneras”, se le detectaba madera de posible “hombre de ciencia”, de

profesional universitario, de ello da fe su brillante expediente académico.

Fue durante el curso 1979-80 cuando, el ya licenciado Romero Mora, junto con el también licenciado de una promoción anterior, el Sr. Jiménez del Barco Jaldo, iniciaron un proceso de acercamiento hacia el entonces Departamento de Física Aplicada donde se integraba la asignatura de Óptica pues pretendían incorporarse al mismo para realizar en él su tesis doctoral.

Las apetencias del Licenciado Romero Mora iban inicialmente en “otras direcciones”, pero la organización del Departamento en lo referente a las nuevas incorporaciones condujo a que se le ofreciera hacerlo en el entonces “incipiente Grupo de Óptica” que arrancaba su andadura por aquellos entonces bajo mi responsabilidad.

Fue entonces cuando se inició realmente el germen de lo que hoy es nuestro Departamento, Grupo de Investigación y lo que yo llamaría grupo de amistad y compañerismo, pues las andaduras anteriores estuvieron asociadas a personas que, finalmente, escogieron otros caminos, aunque se iniciaran con nosotros.

En un grupo de integrantes tan reducido, solo tres inicialmente, y de financiación económica muy limitada, aunque, eso sí, con fuertes responsabilidades docentes, los trabajos de investigación se vislumbraban bastante cuesta arriba, aunque mis ya dos colaboradores ponían todo su empeño en sacar adelante nuestras obligaciones y sentar las bases de nuestro futuro.

En aquella época, Javier, hoy me referiré sólo a él, supo, una vez más, poner en juego su capacidad y su potencialidad para abordar dificultades, a veces muy notorias, superando y sorteando, con el optimismo que le caracteriza, los escollos que continuamente iban

apareciendo. En definitiva, supo ir convirtiéndose, paso a paso, en una pieza fundamental para nuestro entonces incipiente grupo.

A mí siempre me llamó la atención su perspicacia a la hora de asumir nuevos retos y ello no solo en el campo de la investigación, sino también en el de la docencia y en el de la representación institucional. Y es que, con el paso del tiempo, iban apareciendo, uno tras otro, acontecimientos que nos obligaron a realizar esfuerzos ciertamente notorios para tratar de sacar adelante lo que, con el paso de los años, se convertiría en la materialización de nuestro objetivo inicial: “Consolidar en la universidad de Granada un grupo de investigación y docencia en Óptica de la Visión con proyección nacional e internacional”, tarea nada sencilla al no contar con el apoyo de ningún grupo local previamente consolidado en estas materias; como se suele decir “partiendo de cero”.

A veces, reflexionando, solo o con ellos, y si les soy sincero, no acabo de comprender como lo pudimos llegar a conseguir, pero está claro que el tesón y el empuje de personas como Javier Romero han tenido mucho que ver en ello.

Es cierto, seamos sinceros también ahora, que el “destino y algunas personalidades de relevancia” ayudaron mucho, pues la implantación en Granada de los estudios de Óptica y Optometría en nuestra Universidad asociados al ya existente Departamento de Óptica en el que nos integrábamos 4 personas, vinieron a significar, de un lado, un compromiso y una responsabilidad realmente abrumadoras, aunque también preciosas, y, por otro, una gran posibilidad real de crecimiento para nuestro ya incipiente Departamento en los aspectos de nuevo profesorado, dotaciones económicas, etc. etc.

La ayuda que recibimos del rector Rivas Carrera hay que reconocer que fue crucial en todos los sentidos, pero el reto que supuso implantar unos estudios en los cuales algunos de sus aspectos se salían totalmente de nuestra formación inicial, amén de continuar con las responsabilidades iniciales, requirió esfuerzos personales muy importantes y la necesidad de solicitar la ayuda de profesionales especialistas en las materias más clínicas y tecnológicas asociadas a la profesión. Aparecen entonces en el escenario otros nombres como Serrano, Bermúdez, Osorio, etc., además de los de los involucrados en el crecimiento al que me refería inicialmente tales como Melgosa, García, Jiménez, y un largo etcétera que se extiende hasta nuestros días.

Fue precisamente durante esa época marcada por los grandes esfuerzos cuando, una vez más, se puso de manifiesto la sagacidad de Javier Romero a la hora de entender las situaciones y poner en juego la abnegación que requería emprender tales andaduras, a la vez que su capacidad para abordar los retos y su resolución, iniciando un proceso de ampliación de su formación inicial y especialización en Óptica Fisiológica de altísimo nivel que ha dado frutos relevantes tales como la conformación de un Grupo de Investigación propio y, bajo el punto de vista docente, la publicación de un tratado sobre Óptica Fisiológica de alta difusión.

Consolidados el Departamento y la Titulación, Javier Romero asume, con dedicación y éxito una vez más, una tarea muy necesaria para nuestro equipo como era contribuir a la ya iniciada proyección, tanto nacional como internacional, de nuestro Grupo de Investigación y de docencia, y ello sin perder de vista las necesarias tareas de representación y gestión que nuestra universidad nos pedía.

En este sentido, su actividad con el paso de los años ha venido siendo también ciertamente notoria y, así ha desempeñado las funciones de Coordinador de la Licenciatura en Física y de la Diplomatura en Óptica y Optometría además de coordinar diferentes programas de doctorado.

A lo largo de todo este periodo de expansión lleno de presiones de una y otra índole, el doctor Romero Mora realiza su doctorado y accede a las plazas de Profesor Titular y de Catedrático de Óptica en nuestra Universidad.

Su alta capacidad de proyección y representación nacional e internacional, se ve materializada en el ejercicio de las responsabilidades de gestión y dirección que ha venido desarrollando y desarrolla en la actualidad, tales como la de Vicepresidente y Presidente del Comité Español del Color, miembro de diferentes Comités Técnicos de la CIE, miembro del Comité Ejecutivo de la AIC, así como su Secretario-Tesorero, su Vicepresidente y Presidente.

Paralelamente a estas responsabilidades de representación y dirección, el Doctor Romero Mora, como hemos venido diciendo, lleva a cabo una gran actividad docente e investigadora en la que, de nuevo, vuelven a aparecer las proyecciones internacionales, pues asume la presidencia de los comités de organización del III Congreso Nacional del Color y del X International Color Congress de la AIC, ambos celebrados en nuestra ciudad; a su vez, y dentro del terreno de la docencia, el doctor Romero ha asumido con eficacia la responsabilidad asociada a las enseñanzas implicadas en diferentes grados y licenciaturas, así como en programas de doctorado, sobre disciplinas relacionadas con la Óptica, Óptica Fisiológica, Visión,

Colorimetría y Fotónica, destacando entre ellas, las correspondientes a los Programas Erasmus Mundus CIMET y COSI.

En lo que a investigación se refiere, aspecto este que desarrollaremos algo más en el capítulo siguiente, sus logros alcanzan de nuevo un nivel ciertamente relevante habiendo llegado a conformar un grupo propio de investigación con producción de alta repercusión; así, con su grupo ha publicado hasta unos 120 artículos en revistas especializadas, ha registrado varias patentes, ha dirigido 11 tesis doctorales y varios trabajos de Fin de Grado, así como proyectos de Fin de Carrera, ha publicado dos libros de texto y varios capítulos de libros, todos ellos en editoriales de prestigio. Tiene en su haber más de 100 contribuciones en congresos internacionales y ha sido investigador en 21 proyectos de investigación subvencionados por diferentes organismos públicos, en 5 de ellos como IP.

Pero es más, pues, como hemos venido refiriendo, el Doctor Romero Mora ha asumido, y viene asumiendo, responsabilidades de gestión de gran repercusión universitaria, sobre todo en el campo de la investigación, pues en la actualidad es el director del Centro de Instrumentación Científica de la UGR, centro que se puede considerar emblemático a nivel tanto nacional como internacional, cargo que desempeña desde al año 2008 con una eficacia y una entrega ciertamente notorias.

En definitiva, un currículum brillante de gran relevancia y repercusión que pone de manifiesto una gran capacidad y una actividad ya realizada pero, a su vez y como debe ser siempre en un universitario, en fase continuada de realización y de consolidación habiendo sido un compañero ejemplar que ha sabido conjugar, yo pienso que muy bien, ese compañerismo con la siempre necesaria y

sana ambición por conseguir las metas que se proponía, a la vez que ha ejercido un magisterio eficaz sobre su Grupo de Investigación y su alumnado.

Pero, descendiendo algo más a lo personal, permítanme esta licencia, Javier no ha estado solo durante esos momentos que a todos nos han angustiado en ocasiones, pues, además de con sus compañeros, también ha contado con el aliento y el apoyo de una mujer, Teresa, con la que sabido conformar una familia ejemplar en la que su esposa ha venido a jugar un papel trascendental, sabiendo salir adelante, con decisión y optimismo, de situaciones también en este terreno difíciles.

SOBRE EL DISCURSO DE INGRESO

Como este auditorio ha podido comprobar, el doctor Romero Mora nos ha dirigido un discurso de ingreso en el que, como es usual en él, se aparta de lo que podríamos llamar los cánones convencionales, pues alejándose de lo que suele ser frecuente en estos casos de referirse solamente a algún aspecto específico o concreto de su investigación, lo que tampoco evita del todo, inicia su intervención con un planteamiento, yo diría que “didáctico” y que podría, cuando menos, resultar chocante en un foro como el que nos reúne, pero que, según lo veo yo también ahora, está perfectamente justificado y concebido dadas las connotaciones de la materia en la que se enmarca.

El título no puede ser más sugestivo: “*La Colorimetría: una Ciencia en Construcción*”, aunque a mí me hubiera gustado más llamarle “*un capítulo de la Ciencia*”, pero eso es cuestión solo de gustos’, y digo sugestivo porque ya desde el principio se viene a reflejar la necesidad que esta rama del conocimiento tiene en el

momento actual de contribuciones científicas serias que tiendan a tratar de resolver los múltiples problemas que la misma tiene planteados en la actualidad.

Javier Romero inicia su intervención con una revisión histórica del proceso de conformación de la Colorimetría como una parte muy importante, por su cantidad de aplicaciones entre otras cosas, de la Psicofísica en la que se pretende medir y especificar inequívocamente la *sensación*, asociada a la respuesta que nuestro sistema visual da cuando es estimulado por la energía radiante visible.

A todas luces, se comprende en inicio que “*medir*” una sensación, es decir elevarla a la categoría de magnitud física, es decir de observable comparable, pueda parecer algo si no imposible si, cuando menos, complicado y, efectivamente, lo es. Pero las contribuciones en este campo de un casi innumerable grupo de científicos de gran renombre en muy diferentes capítulos de la Ciencia, ha hecho posible que hoy en día se pueda decir como apunta el profesor Casas en su libro de texto “Óptica”, que “*la Colorimetría es un ejemplo singular de ser la primera ciencia que ha podido formular el álgebra de una sensación psicológica*”, o también, como apunta el Dr. Plaza, que “*es un ejemplo de cómo se puede construir una Ciencia útil empleando un observador ficticio*”.

Y es que, en definitiva, si se quiere ser rigurosamente científico se exige, ni más ni menos, que encontrar una relación matemática, si se quiere a nivel de operador, que nos transforme el estímulo (una distribución espectral de energía fácilmente controlable y medible hoy en día), en la respuesta (un conjunto de atributos psicológicos no tan fácilmente controlables y evaluables), es decir:

$$R = f(E)$$

Donde esa “f” de transformación es el operador que se busca, y coincide con lo que ha dado en denominarse “Observador Patrón”, dándose la circunstancia de que no existe una relación unívoca entre ambas variables (respuesta y estímulo) poniéndose de manifiesto lo que constituye la esencia de la Colorimetría con el denominado “metamerismo”.

El hecho de que el número tres haya jugado un papel decisivo en el desarrollo de la Colorimetría en todos sus sentidos, es decir que sean tres los valores de las variables necesarias para especificar y representar en un sistema apropiado un color determinado tanto psicológicamente como colorimétricamente, ha generado que, incluso en algunos tratados muy solventes de Colorimetría, se considere al espacio de color, es decir al conjunto de sensaciones existentes o de estímulos perceptibles, como un espacio vectorial, basándose para ello en una ley de composición interna que nos brinda la naturaleza “*la mezcla aditiva de colores*”, aunque esto carece de rigor matemático, pues no existe en ese espacio el elemento neutro necesariamente asociado. Ello ha conducido a que sea el método de las mezclas la base experimental de la Colorimetría junto con la llamada ecuación tricromática, otro regalo de la naturaleza, que ha permitido el desarrollo de esta rama del conocimiento.

El método de las mezclas ha cobrado así una importancia esencial y, aunque suele hablarse de distintos tipos de mezclas de colores, es la mezcla aditiva la que ha cobrado esa relevancia, pues lo que ha dado en llamarse “*mezcla sustractiva*”, de gran repercusión en las técnicas de reproducción, yo no la veo como una mezcla, toda vez que el término mezcla se asocia a unión de elementos y no a la eliminación de componentes.

Javier Romero realiza en su discurso un resumen, esquemático pero muy riguroso, de las diferentes contribuciones y aportaciones que han conducido al estado actual de la situación en lo que a la Ciencia del Color se refiere, tanto en lo concerniente a los aspectos básicos de la percepción y medida del color así como a los aspectos tecnológicos relacionados con su reproducción.

No deja de llamar la atención el hecho de que entre estas contribuciones estén las de científicos de renombre en el campo de la Física tales como Newton, Maxwell, Schrödinger, etc., por citar algunos, los cuales han llevado a cabo incursiones en la Colorimetría con colaboraciones de gran repercusión en la misma. Pero sucede también que un sinnúmero de científicos de muy diferentes ramas del saber han estado, y están, ocupados en la evolución de esta materia, dando lugar a contribuciones totalmente desconectadas con elaboración de vocabularios propios, lo que ha generado que, globalmente, el mundo del color pueda percibirse, para quienes se inician en el mismo, como una especie de "Torre de Babel" de muy difícil acceso, haciéndose necesarios esfuerzos de unificación de nomenclaturas y criterios entre los diferentes especialistas.

Sea como fuere, la llamada Ciencia del Color avanza hacia su estructuración tratando de resolver los problemas que, desde los inicios más rigurosos en 1931, se le vienen planteando tanto de base como de desarrollo y que el profesor Romero clasifica, y yo comparto, en:

- Problemas asociados a las igualaciones en color,
- Cálculo de diferencias de color y tolerancias,
- Medida de la apariencia del color, y,
- Colorimetría de imágenes,

realizando un análisis bastante detallado en su discurso de las aportaciones y avances en cada uno de estos apartados.

Dando un paso más, Javier Romero nos esquematiza también la evolución que la Colorimetría ha tenido en España descendiendo hasta nuestra Universidad y apareciendo en ese análisis los nombres de los investigadores pioneros que, desde otros países, trajeron estos estudios a España (Plaza y De la Cruz) y a Granada (Álvarez-Claro) y los de los que los continuaron y continúan en esa tarea, entre otros el suyo propio.

Como hemos dicho anteriormente, Javier Romero, sin apartarse del todo del grupo granadino inicial de Colorimetría Diferencial y Visión del Color, ha ido evolucionando con el tiempo hacia la conformación de un subgrupo, podríamos decir, específico en nuestra Universidad del cual es responsable en la actualidad, denominado "Grupo de Imágenes en Color", el cual viene desarrollando eficazmente sus tareas en parcelas tan actuales y atractivas como son La Constancia del Color y la Visión Artificial, desarrollando también actividades en el campo de la adquisición y procesado de imágenes multi e hiper-espectrales, así como en la mejora de imágenes deterioradas por la atmósfera.

Pero, como les decía al principio, Javier es un hombre de retos, de proyección de conocimientos, de incorporación de lo que sabe a los problemas de la sociedad. Posiblemente por ello en la actualidad se encuentra inmerso en lo que el mismo denomina "*Análisis computacional de obras de arte*", habiendo llegado a resultados muy interesantes sobre aspectos cromáticos de diferentes pintores y épocas, con aplicaciones de gran repercusión como pueden ser la identificación de obras pictóricas o de la falsedad de las mismas.

En definitiva, querido auditorio, nos encontramos ante un personaje brillante comprometido con la Ciencia, su Universidad y la Sociedad, el que, además, está adornado con las cualidades de inteligencia, sagacidad, capacidad, tenacidad, y un largo etcétera.

Es pues para mí, como padrino hoy y Presidente de nuestra querida Academia, muy gratificante y esperanzador saber que la misma contará, a partir de ahora, con un nuevo miembro que vendrá a enriquecer su nómina y su proyección científica y social y les garantizo a todos ustedes que yo mismo, mientras ocupe este cargo, me encargaré de recordarle el compromiso que adquiere.

Muchas gracias por su atención.