

Especificación y medida de color y su aplicación a la Industria

RAUL R. PRANDO

Sección Espectroquímica
Instituto de Investigación Libre y Asesoramiento

INTRODUCCION

Este trabajo tiene una finalidad de divulgación: estudiar el color como una magnitud susceptible de ser medida. Esta concepción del color como variable perfectamente determinable permite la solución de diversos problemas científicos y tecnológicos así como su aplicabilidad como método de control dentro de la industria.

En este primer artículo se estudiarán los fundamentos de la especificación y medida de color, delegándose para otro, posterior, la consideración de distintas aplicaciones industriales.

DEFINICION DE COLOR

Para definir color, debemos tener en cuenta dos aspectos del problema: el físico y el sensorial. Así, la medida de la intensidad y distribución espectral de la energía radiante no constituye en sí una definición de color aunque esta energía sea el estímulo físico que inicia esa sensación; por otra parte, esta sensación es subjetiva y no medible por medios físicos.

En virtud de esta dualidad, conviene, antes de definir color, referirnos a:

1) Las propiedades energéticas y fotométricas de las radiaciones.

Si bien la propagación de la luz debe considerarse como propagación de energía electromagnética, no todas las radiaciones electromagnéticas dan sensación de luz, sino, sólo aquellas que poseen una longitud de onda comprendida entre 400 y 800 μ aproximadamente. La cantidad de radiación electromagnética transportada en un cierto tiempo por un haz luminoso, puede identificarse con la cantidad de energía radiante transportada en el mismo tiempo por el haz, pero, la cantidad de luz equivalente depende de

la eficacia de la acción de la radiación considerada sobre la retina humana. Es por esto, que el flujo luminoso se mide en unidades fotométricas y el flujo de energía radiante en unidades energéticas, ya que un flujo de energía radiante de un vatio a 300 μ , concentrado sobre la retina, no produce sensación luminosa, mientras que un flujo igual de energía radiante a 550 μ produce una sensación muy viva. Ambos aspectos, energético y fotométrico, están relacionados entre sí mediante la función de visibilidad relativa aceptada en 1924 por la Internacional Commission of Illumination (I.C.I.) para ciertas condiciones de visión y definida así:

$$V = \frac{K\lambda}{K_{\text{máx}}} \quad (1)$$

donde $K\lambda$ es el valor de la relación entre los lúmenes ϕ y los vatios w transportados por el flujo luminoso de longitud de onda λ y $K_{\text{máx}}$ es el valor de $K\lambda$ para

550 μ , es decir, $K_{\text{máx}} = K_{550\mu} = 621$ lúmenes/vatio.

La función $V \neq 0$ sólo para las radiaciones luminosas cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 380 y 780 μ .

2) La percepción visual de los distintos colores.

Respecto a la percepción de las radiaciones luminosas, se considera como válida la teoría de Young-Helmholtz, según la cual los colores se perciben por medio de tres clases de receptores presentes en la retina cuyas sensibilidades espectrales hipotéticas coinciden aproximadamente con las zonas roja, verde y azul del espectro.

Podemos, ahora, definir color. Para ello, la Optical Society of America, empieza precisando el concepto de luz, estableciendo que es el aspecto de la energía radiante que un observador tiene conocimiento por las sensaciones visuales que se originan en el estímulo de la retina del ojo, definiendo, a continuación, color como las características de la luz que permiten al ojo distinguir diferencias en su calidad, prescindiendo de las diferencias en distribución espacial y de las fluctuaciones en el tiempo. Esta definición relaciona color y energía radiante sólo en cuanto que la energía radiante produce un efecto visual en un observador.

TERMINOLOGIA

Interesa precisar los términos que se emplean en la especificación de color. Para ello, tendremos en cuenta el Report on Colour Terminology de la Physical Society 1948.

Existe una distinción en términos objetivos (físicos), tales como longitud de onda dominante, pureza colorimétrica y luminancia, y términos subjetivos (sensoriales), tales como matiz* saturación y luminosidad, existiendo cierta correspondencia entre ellos.

Definiremos, a continuación, cada uno de los términos a que hemos hecho referencia.

Matiz es el atributo de ciertas sensaciones visuales por las que el ojo distingue las diferentes porciones del espectro.

Longitud de onda dominante es la longitud de onda del estímulo espectral que mezclado con un estímulo acromático patrón, reproduce el estímulo observado.

Saturación es el atributo de las sensaciones que permite juzgar la proporción de color en la sensación total.

Pureza colorimétrica. Se define como la relación de la luminancia del estímulo en estudio con respecto a la del estímulo espectral que, mezclado aditivamente con el acromático patrón, reproduce el estímulo problema en todos sus caracteres.

La longitud de onda dominante y la pureza colorimétrica de un estímulo corresponden respectivamente al hue y saturación del mismo, aunque en realidad no exista entre aquéllos y éstos un estricto paralelismo ya que si bien los primeros atributos son independientes de

la luminancia, el hue y la saturación pueden variar con ella.

Luminancia es la intensidad luminosa de la radiación emitida por unidad de área, de ángulo sólido y de tiempo de una superficie o su equivalente, en la dirección de observación.

Luminosidad. Es simplemente la intensidad de la sensación luminosa.

Se dice que dos colores, tienen la misma cromaticidad o que constituyen una especie de color, cuando difieren sólo en luminancia y, por tanto, poseen valores idénticos para los otros atributos.

Expresión matemática del concepto de color.

Existe cierta analogía matemática entre los conceptos de luminancia y color. Por un lado, la luminancia L de una superficie luminosa que emite una energía $E(\lambda)$ en el intervalo λ , $\lambda + d\lambda$, es, por definición, igual a

$$L = \int_{\lambda = 380 \text{ mu}}^{\lambda = 780 \text{ mu}} K_{\text{máx}} E(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Por otro, se ha comprobado que el color (ya sea de una fuente luminosa, superficie, etc.) puede caracterizarse perfectamente con tres números que representaremos por las letras α_1 , α_2 , α_3 y que están definidos así:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \int E(\lambda) \alpha'_1(\lambda) d\lambda \\ \alpha_2 &= \int E(\lambda) \alpha'_2(\lambda) d\lambda \\ \alpha_3 &= \int E(\lambda) \alpha'_3(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

Estas integrales son de la misma forma que la (2).

Las funciones α'_1 , α'_2 , α'_3 , conocidas con el nombre de funciones de distribución, fueron standardizadas por la I.C.I. para el observador normal. Los valores particulares de las mismas, que se conocen como valores tristímulos de las funciones de distribución para el espectro de isoenergía, representan las cantidades que se requieren de cada uno de los estímulos primarios para reproducir, con la misma energía, la misma sensación coloreada que una radiación estímulo monocromática.

Como cada color queda determinado por estos tres valores α_1 , α_2 , α_3 , podemos

* Empleamos la palabra matiz como equivalente en el idioma castellano al término inglés hue.

representarlo gráficamente como un punto en un sistema de coordenadas oblicuas en el espacio llamado espacio de color. En él, todos los colores de igual cromaticidad están sobre una misma lí-

$$\rho_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \quad \rho_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \quad \rho_3 = \frac{\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}$$

de donde, $\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 = 1$, es decir, sólo dos de las tres cantidades (ρ_1, ρ_2, ρ_3) son independientes entre sí. Las cromaticidades pueden, por tanto, ser representadas en un plano mediante un triángulo equilátero de altura unidad o bien, mediante un par de ejes coordenados rectangulares representando las cromaticidades por sólo dos de los tres coeficientes, anteriormente definidos.

Sistemas tricromático y monocromático

Vamos a aplicar estos conceptos generales al estudio particular de los distintos sistemas de especificación de color.

Consideremos primeramente los sistemas tricromáticos de la I.C.I., a saber:

1) Sistema R G B. Se conoce también con el nombre de sistema instrumental. Sus coordenadas corresponden a tres estímulos primarios reales y perfectamente definidos: R (radiación monocromática de longitud de onda 700.0 mu), G (radiación monocromática de longitud de onda 546.1 mu) y B (radiación monocromática de longitud de onda 435.8 mu). Poseen, además, la característica de que las escalas de luminancia correspondientes a los ejes coordenados son tales que permiten que el punto que representa la cromaticidad blanco esté en el centro de gravedad del triángulo de cromaticidad o en el punto de coordenadas $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1/3$.

El inconveniente de este sistema, es que muchos colores quedan especificados con coordenadas de cromaticidad negativas y, por consiguiente, poseen también cromaticidades negativas.

Las ecuaciones generales enunciadas más arriba (3) adoptan la siguiente forma:

$$\begin{aligned} R &= \int E(\lambda) R'(\lambda) d\lambda \\ G &= \int E(\lambda) G'(\lambda) d\lambda \quad (4) \quad \text{y} \\ B &= \int E(\lambda) B'(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

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

La luminosidad L del color que se especifica, es función, en este sistema, de las luminosidades de cada uno de los

estímulos primarios, pudiendo definirse como sigue:

La cromaticidad queda determinada por dos cantidades y, con la finalidad de representarla gráficamente, se definen las siguientes relaciones:

estímulos primarios, pudiendo definirse como sigue:

$$L_r + L_g + L_b = L \quad (5).$$

2) Sistema X Y Z. Por sus propiedades, elimina los inconvenientes del sistema instrumental y simplifica los cálculos. Adopta estímulos de referencia imaginarios, llamados estímulos cardinales, que se designan con las letras X, Y y Z y que no corresponden a ningún estímulo espectral real de manera que la especificación de cualquier color sea siempre positiva; hace también, que el estímulo Y represente directamente la luminosidad del color que se especifica, y, además, que las escalas de luminosidades correspondientes a los distintos estímulos sean distintas entre sí, tal como sucede para el sistema R G B, de manera que la cromaticidad blanco logre la misma ubicación que en el sistema instrumental.

Las ecuaciones (3) toman, para este sistema, la siguiente forma:

$$\begin{aligned} X &= \int E(\lambda) X'(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int E(\lambda) Y'(\lambda) d\lambda = \int E(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (5) \quad \text{y} \\ Z &= \int E(\lambda) Z'(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}; \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

La identificación $Y'(\lambda) = V(\lambda)$ permite que, mediante un factor, Y represente la luminancia L además de ser una de las tres coordenadas tricromáticas. En este sistema, el plano de cromaticidad casi universalmente adoptado es el x-y que se representa en la figura 1.

Entre las especificaciones trístimulos correspondientes a los distintos sistemas existe una relación lineal, es decir, que las especificaciones de color en un sistema, pueden transformarse en las de otro mediante ecuaciones de transformación lineal del tipo

$$\begin{aligned} X &= \alpha_{11}R + \alpha_{21}G + \alpha_{31}B \\ Y &= \alpha_{12}R + \alpha_{22}G + \alpha_{32}B \quad (6) \\ Z &= \alpha_{13}R + \alpha_{23}G + \alpha_{33}B \end{aligned}$$

donde los coeficientes $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{32}, \alpha_{33}$ deben cumplir la siguiente condición:

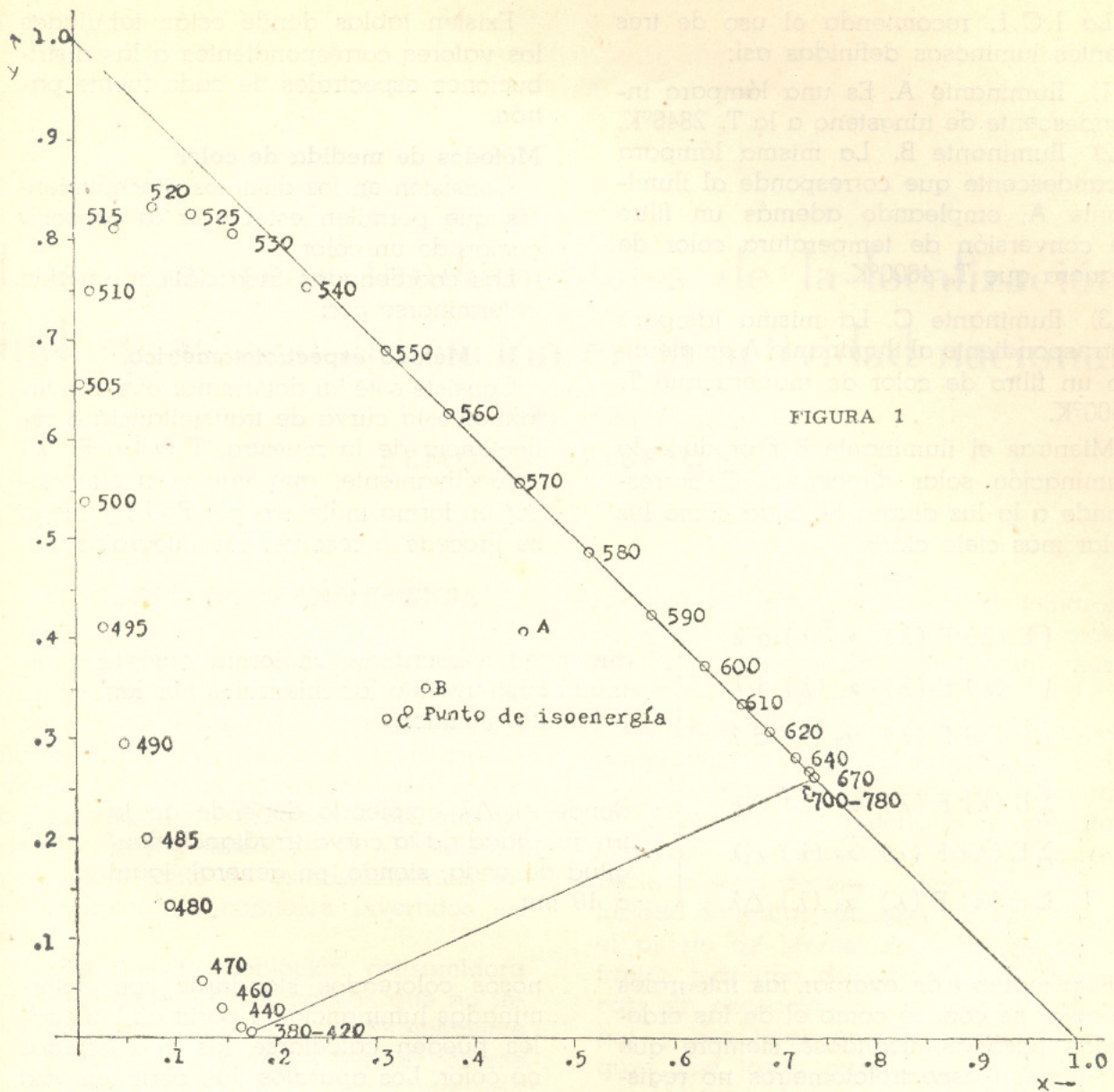


FIGURA 1

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} & \alpha_{31} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{32} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \neq 0 \quad (7)$$

Si existe transformación para el espacio de color, también la hay para el plano de cromaticidad, ya que ambos están íntimamente vinculados pudiéndose obtener éste de aquél mediante proyección.

Además de estos dos sistemas tricromáticos, existe el sistema monocromático que sustituye las coordenadas por tres cantidades que coinciden con tres cualidades objetivas del estímulo que da origen a la sensación de color, a saber: longitud de onda dominante λ_d , pureza colorimétrica p y luminancia relativa.

Este sistema posee la ventaja frente a los tricromáticos, de ser más fácil de interpretar pero, también, la desventaja de no permitir cálculos independientes, ya que la única manera de calcular sus parámetros es a partir de las coordenadas tricromáticas.

Fuentes de iluminación

Para medir las coordenadas tricromáticas o los coeficientes de cromaticidad de un color, ya sea por transmisión o por reflexión, debe emplearse una fuente luminosa patrón porque la especificación hallada depende también de la distribución espectral del iluminante.

Como fuente luminosa, conviene elegir una similar a la empleada en la iluminación corriente del espécimen cuyo análisis de color se realiza.

En la práctica se emplean radiadores térmicos constituidos ya sea sólo por una fuente luminosa incandescente o por la combinación de una fuente luminosa incandescente con un filtro de conversión de temperatura de color, de manera de lograr la temperatura de color deseada. (Se define temperatura de color como la del cuerpo negro cuya distribución espectral relativa en el visible es semejante a la del radiador térmico empleado).

La I.C.I. recomienda el uso de tres fuentes luminosas definidas así:

1) Iluminante A. Es una lámpara incandescente de tungsteno a la T_c 2848°K.

2) Iluminante B. La misma lámpara incandescente que corresponde al iluminante A, empleando además un filtro de conversión de temperatura color de manera que T_c 4800°K.

3) Iluminante C. La misma lámpara correspondiente al iluminante A empleando un filtro de color de manera que T_c 6500°K.

Mientras el iluminante B reproduce la iluminación solar directa, el C corresponde a la luz diurna definida como luz solar más cielo claro.

$$\left. \begin{aligned} \int E(\lambda) F(\lambda) \bar{x}_1(\lambda) d\lambda \\ \int E(\lambda) F(\lambda) \bar{x}_2(\lambda) d\lambda \\ \int E(\lambda) F(\lambda) \bar{x}_3(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\}$$

que pueden escribirse en forma aproximada sustituyendo las integrales por las siguientes sumas:

$$\left. \begin{aligned} \sum E(\lambda) F(\lambda) \bar{x}_1(\lambda) \Delta\lambda \\ \sum E(\lambda) F(\lambda) \bar{x}_2(\lambda) \Delta\lambda \\ \sum E(\lambda) F(\lambda) \bar{x}_3(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \right\}$$

donde el $\Delta\lambda$ empleado depende de la irregularidad de la curva irradiancia longitud de onda, siendo, en general, igual a 10 m μ .

Esta manera de evaluar las integrales de color se conoce como el de las ordenadas pesadas, usándose siempre que se empleen espectrofotómetros no registradores.

2) Método objetivo.

Emplea como receptores de radiación fototubos asociados con filtros tales que las sensibilidades de esas combinaciones sean proporcionales a las funciones de distribución.

Estos receptores dan origen a corrientes eléctricas directamente proporcionales a las coordenadas tricromáticas correspondientes de manera tal que éstas pueden ser determinadas sin la intervención del ojo como receptor. Los aparatos que responden a este principio son los triclorímetros tricromáticos.

3) Método subjetivo.

Se funda en hacer indistinguible la sensación de color problema con otra sensación de color (sensación de referencia). Esta puede estar constituida por una mezcla aditiva de tres haces lumi-

Existen tablas donde están tabulados los valores correspondientes a las distribuciones espectrales de cada fuente patrón.

Métodos de medida de color

Consisten en los distintos procedimientos que permiten establecer la especificación de un color.

Las coordenadas tricromáticas pueden determinarse por:

1) Método espectrofotométrico.

Consiste éste en determinar experimentalmente la curva de transmitancia o reflectancia de la muestra, $T(\lambda)$ o $R(\lambda)$ respectivamente, que vamos a simbolizar en forma indistinta por $F(\lambda)$ y luego se procede a resolver las integrales

nosos coloreados standards con determinadas luminancias a partir de las cuales pueden calcularse las coordenadas de color. Los aparatos que permiten esta igualación de sensaciones son los colorímetros tricromáticos.

La sensación de color de referencia puede ser, también, una superficie coloreada entre las demás de una extensa colección (atlas de color, por ejemplo el Atlas Munsell) con respecto a la cual, la superficie coloreada problema presenta la mayor semejanza.

Elección del método de medida

La elección del método a emplear en un problema particular, depende de:

- 1) exactitud que se desea;
- 2) rapidez con que debe conocerse el resultado;
- 3) costo del equipo a usar.

Los métodos a que hemos hecho referencia en este artículo, están ordenados según exactitud y costo decrecientes y rapidez crecientes.

(Continuará)