

# MANEJO DE LAS FÓRMULAS DE DIFERENCIAS DE COLOR VS LÍMITES DE ACEPTABILIDAD

Jazmin Carranza Gallardo,  
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Luis Enrique Erro No.1, Tonantzintla, Puebla,  
CP72840, Departamento de Óptica, Laboratorio de Espectrocolorimetría. [jazmin@inaoep.mx](mailto:jazmin@inaoep.mx)

**Resumen** En el presente estudio se presenta una revisión de las principales fórmulas de diferencias de color utilizadas en los Paquetes de Software de Control de Calidad en la determinación de coordenadas cromáticas y se propone un método para llevar el ajuste de las elipses de aceptabilidad del software a los límites de aceptabilidad real en un proceso de generación de color.

## INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones industriales donde se realizan procesos de tinción y/o coloración, generalmente más que una determinación muy exacta del color generado lo que se busca es igualar este color con el de un estándar preestablecido; esta igualación debe ser visualmente aceptable y además cuantificada de manera consistente.

En el presente trabajo se presenta una metodología para ajustar (utilizando un software comercial de control de calidad de color) los parámetros de aceptabilidad en una fórmula de diferencias de color, de modo que la aceptación visual corresponda con la numérica.

## ECUACIONES DE DIFERENCIAS DE COLOR

En colorimetría, la manera de cuantificar la diferencia de color entre un estándar y la muestra de producción es a través de las ecuaciones de diferencias de color, las cuales, matemáticamente corresponden a la distancia geométrica, en un sistema cromático determinado, entre las coordenadas del estándar y las de la muestra. Estas distancias son calculadas a lo largo de cada uno de los ejes coordenados dependiendo del sistema en que se trabaje, así en el sistema CIELab la diferencia en claridad (lightness) entre el estándar y la muestra esta dada por  $\Delta L = L_{est.} - L_{muestra}$ ; la diferencia cromática rojo-verde por  $\Delta a = a_{est.} - a_{muestra}$  y la diferencia cromática amarillo-azul esta dada por

$\Delta b = b_{est.} - b_{muestra}$ . La diferencia de color total,  $\Delta E$  esta dada como:

$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (1)$$

En el sistema CIELCh, que no es mas que la representación polar del sistema CIELab, esta diferencia de color queda expresada en términos de las diferencias en claridad  $\Delta L$ , diferencia en saturación (chroma)  $\Delta C$  y diferencias en su valor de hue. Como el valor del hue es una medida angular, esta tiene que ser convertida a una magnitud lineal para tener una ecuación dimensionalmente consistente, por lo que se define  $\Delta H = C\Delta h$  y finalmente se tiene la ecuación de diferencia de color en este sistema como:

$$\Delta E_{LCh} = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta C^2 + \Delta H^2} \quad (2)$$

Mientras que el valor de la delta total  $\Delta E$  es un número que determina simplemente que tan diferentes son la muestra y el estándar sin dar ninguna información referente a la dirección de esta diferencia de color, los valores y el signo de las deltas individuales ( $\Delta L$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta C$ ,  $\Delta H$ , etc.) indican el sentido de esta variación para cada una de las coordenadas, así como su magnitud. Sin embargo, el manejar valores de diferencias de color total es útil cuando lo que se busca es que un solo número sirva para evaluar la aceptabilidad de un producto.

Pero, ¿Cuál debe de ser el valor de  $\Delta E$  para decidir si una diferencia de color es tal que una igualación es aceptable?, es común considerar que un  $\Delta E = 1$ ,

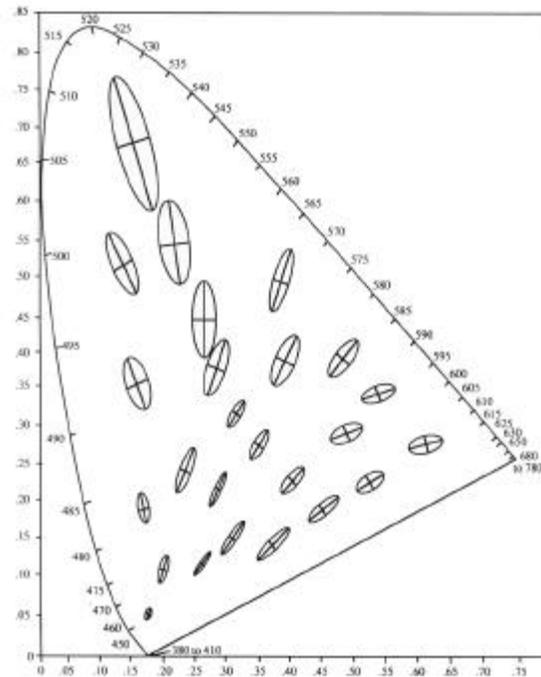
tanto en el sistema CIELab como en CIELCh representa un buen valor para tomarlo como umbral de aceptabilidad (i.e si  $\Delta E \leq 1$  la igualación es aceptada y si  $\Delta E \geq 1$  la igualación es rechazada); sin embargo en la práctica este criterio no siempre es correcto, porque el valor de  $\Delta E$  adecuado va a depender de la *ubicación del color* en el espacio que se esté trabajando, el tipo de *material* y el *proceso* con que ha sido coloreado, las *condiciones de evaluación visual* y finalmente, con lo que el cliente acepta como válido. En las siguientes secciones se discutirá el como la colorimetría ha planteado resolver esta problemática.

### UMBRALES DE DISCRIMINACIÓN DE COLOR

El establecimiento de umbrales de discriminación de color se refiere a la evaluación (estadística) de la capacidad de los individuos para detectar diferencias cromáticas, así lo que se trata de determinar es *cual es la mínima diferencia de color perceptible* para observadores con visión normal del color.

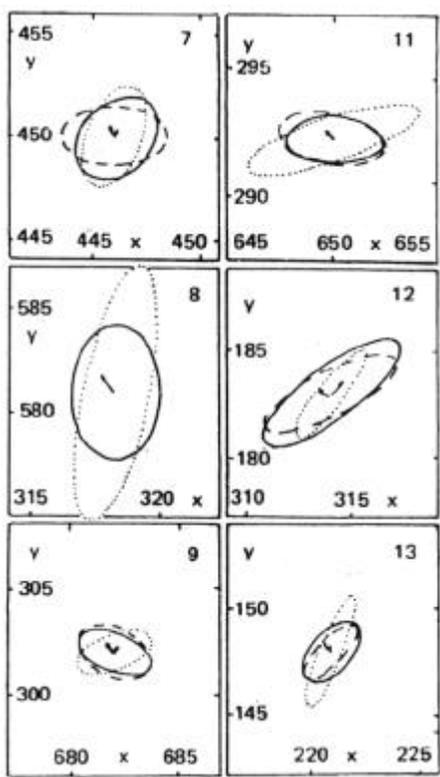
Se han realizado diferentes experimentos por más de 60 años, utilizando varios métodos e instrumentos para la determinación de estos umbrales de discriminación, pero básicamente todos ellos han hecho uso de un experimento de igualación de estímulos. En un experimento de este tipo siempre se presenta al observador un campo visual bipartido, uno conteniendo un estímulo de color (generalmente una luz) de referencia o estándar y en el otro un estímulo de color ajustable. Inicialmente ambos campos son equivalentes en contenido cromático y radiancia y se van introduciendo pequeños cambios en el campo de comparación hasta que la igualación es perdida. Uno de los resultados clásicos reportados en este sentido es el trabajo de MacAdam en 1942 [1] quien determinó los umbrales de discriminación en el diagrama cromático CIE1931xy, como se reproduce en la figura 1.

El trabajo de MacAdam así como el de toda una serie de resultados reportados en este sentido [2,3] permiten obtener las siguientes conclusiones:



**Fig. 1** Elipses de MacAdam representando los umbrales de discriminación para diferentes centros de color en el diagrama CIE1931xy.

- Los umbrales de aceptabilidad para un centro de color determinado (estímulo de referencia) no son simétricos, y su forma es mejor ajustada por una elipse en un diagrama cromático, o por un elipsoide con ejes no simétricos en un espacio de color.
- No existe uniformidad perceptual en la discriminación de color, el umbral de sensibilidad es más grande (i.e. las elipses son más pequeñas) en las porciones rojas y azules que en la región verde del diagrama cromático.
- Los mismos centros de color, evaluados para bases de datos diferentes (con diferencias en las propiedades de las muestras y su proceso de evaluación visual) proporcionan elipses con diferentes orientaciones y excentricidades, como se muestra en la figura 2.



**Fig. 2** Elipses de umbrales de discriminación reportadas por tres experimentos diferentes: líneas continuas para los resultados de Brown, discontinuas de MacAdam y punteadas para los de Nutting [1].

Así mientras que en una región del diagrama cromático una diferencia de color de  $\Delta E = 1$  puede ser aceptable, en otra región esta variación puede o bien ser muy relajada o ya haber sobrepasado un valor crítico. A partir de los resultados de MacAdam los esfuerzos de la CIE fueran encaminados a buscar una transformación del espacio CIEYxy para lograr un espacio con uniformidad perceptual, i.e. un espacio en el cual las elipses reportadas por MacAdam tomaran la forma de circunferencias y de modo que todas fueran del mismo radio. En este sentido se propuso en 1976 del primer espacio de cromaticidad uniforme (UCS) el CIEYuv'. Posteriores intentos han buscado mejorar estas transformaciones, pero aún el mismo CIELab no es un espacio de color estrictamente uniforme, como puede verse de la figura 3.

Este hecho ha obligado a desarrollar ecuaciones (o fórmulas) de diferencias de color que en primer lugar cambien dependiendo de la región del

espectro en que se esté evaluando; y en segundo que puedan ser ajustadas en función del tipo de muestra y proceso con que fue coloreada. Es en este sentido que surgen ecuaciones de diferencias de color como la JPC79, la CMC y otras que actualmente están en proceso.

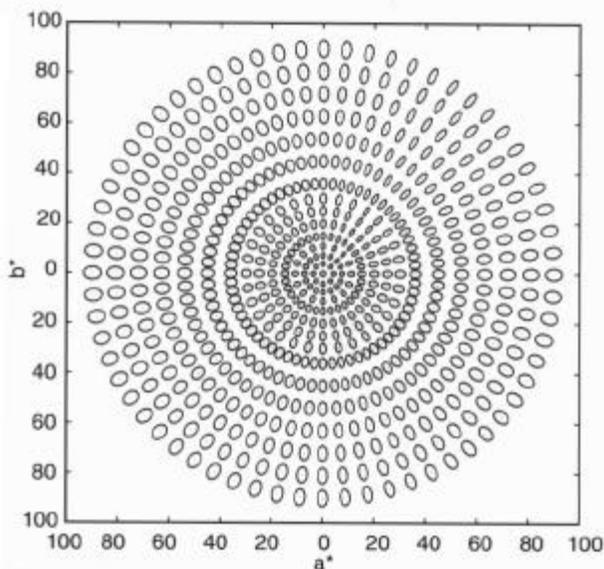
## FÓRMULA CMC

La fórmula CMC conocida como ecuación de diferencias de color  $\Delta E_{CMC}$  es una ecuación que es utilizada actualmente por los programas de software de control de calidad de color comerciales, y que calcula el volumen de aceptabilidad elíptico en el espacio de color CIELCh.

La historia del desarrollo de esta fórmula data desde 1970, cuando la sociedad de coloristas Británica encarga a un Comité de Medición de Color (Color Measurement Committee: CMC) desarrollar una ecuación que permitiera modificar las elipses de tolerancias preestablecidas en base a la aceptabilidad que el usuario requiriera. Este comité fue dirigido por MacDonald quién, en 1974 reporta que los efectos de la claridad y el hue eran insignificantes respecto a la saturación; MacLaren en 1976 reporta que es la razón de la claridad a la saturación lo que diferenciaba las propiedades de una base de datos respecto a otra, así este Comité propone introducir dos parámetros,  $l$  y  $c$ , para que sirvieran como factores de peso que permitieran ponderar la importancia de la claridad (lightness:  $l$ ), respecto a la saturación (chroma:  $c$ ) en una determinación de tolerancias de aceptabilidad en la igualación de un color. La ecuación proporcionada por el comité, toma la forma:

$$\Delta E_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{l S_l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{c S_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2} \quad (3)$$

Una de las ventajas de la ecuación CMC es que corrige una de las mayores deficiencias del sistema CIELab, la dependencia con la posición de la saturación. Las elipses de aceptabilidad derivadas a partir de la ecuación  $\Delta E_{CMC}$  son mostradas en la figura 3.



**Fig 3.** Elipses de umbrales de discriminación proporcionados por la fórmula CMC en el sistema CIELab.

Los coeficientes S en la ecuación 3 son los que toman en cuenta la corrección de las elipses de aceptabilidad en función de su posición en el espacio cromático.

Por convención se ha determinado un valor de  $S_H = 1$ , de modo que los semiejes del elipsoide generado son relativos a este valor para el eje de hue.

### AJUSTE DE PARÁMETROS EN LA FÓRMULA CMC

En la tabla 1 se proporcionan los valores de medición de una muestra textil vs. su estándar utilizando la ecuación  $\Delta E_{CMC}$ . Originalmente se han utilizado los valores predeterminados para las tolerancias:  $\Delta E = 1$  y una razón  $l:c$  con valor de 1.0:1; el resultado de la evaluación del software es que la muestra no pasa.

$l:c$	$\Delta L$	$\Delta C$	$\Delta H$	$\Delta E$	
1,0:1	1,766	-0,163	-0,150	1,780	falla

**Tabla 1.** Resultados de una medición de una muestra textil contra su estándar utilizando la ecuación  $\Delta E_{CMC}$ .

En este caso la evaluación numérica establece que la muestra no es aceptada; sin embargo, al hacer la comparación visual contra el estándar esta muestra si es aceptada. Lo que se pretende ahora es *ajustar* el tamaño de la elipse proporcionada por la ecuación CMC para que la muestra sea aceptada, i.e. que el valor numérico caiga dentro de una nueva elipse modificada utilizando los parámetros de ajuste de la ecuación CMC.

En la tabla 2 se puede ver el efecto de haber introducido este ajuste para diferentes valores de los parámetros  $l:c$ , sin embargo aunque el valor de  $\Delta E$  total ha disminuido se tiene que la muestra aún es rechazada numéricamente en los cuatro primeros ajustes, pero al seleccionar un factor  $l:c$  de 2,0:1, se obtiene un valor de  $\Delta E$  menor a uno y en este caso la muestra es aceptada por el software.

$l:c$	$\Delta L$	$\Delta C$	$\Delta H$	$\Delta E$	
1,2:1	1,472	-0,163	-0,150	1,488	falla
1,4:1	1,261	-0,163	-0,150	1,281	falla
1,6:1	1,104	-0,163	-0,150	1,126	falla
1,8:1	0,981	-0,163	-0,150	1,006	falla
2,0:1	0,883	-0,163	-0,150	0,910	pasa

**Tabla 2.** Cambio del criterio de aceptabilidad en función del ajuste de los parámetros  $l:c$ .

Es decir que la manipulación de los parámetros  $l:c$  en la fórmula CMC ha permitido normalizar el criterio de aceptación numérico para que una  $\Delta E = 1$  reporte una aceptación numérica para una base de datos que esta siendo aceptada visualmente. Como puede verse de la tabla 2, los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta H$  no cambian porque solamente se está modificando el eje de la coordenada L en la ecuación 3.

Aunque es común reportar los valores de  $l:c$  sólo con una cifra decimal, es posible, dependiendo del software con que se trabaje determinarlos hasta con 3 cifras después del punto decimal, lo cual permite una aproximación más exacta del factor buscado, como se ejemplifica a continuación donde se encuentra que es el valor de 1,812:1 el que nos proporciona un valor de  $\Delta E = 1,000$  para la muestra analizada.

$l:c$	$\Delta L$	$\Delta C$	$\Delta H$	$\Delta E$	
1, 812:1	0,975	-0,163	-0,150	1,000	pasa

Los trabajos de investigación recientes se han dirigido a encontrar cual es el valor de  $l:c$  típico para bases de datos determinadas, teniéndose que actualmente se ha generalizado el uso de parámetros específicos para bases de datos representativas de diferentes sectores industriales. En la tabla 3 se reportan algunos de estos valores.

$l$	$c$	
1 a 2	1	Textiles
1,4	1	Plásticos
1,4	1	Pinturas

**Tabla 3.** Especificaciones típicas de los parámetros  $l$  y  $c$ .

Es la experiencia del colorista, sí como su conocimiento del efecto del ajuste de estos parámetros lo que le puede permitir llegar a una determinación óptima de ellos, en base a lo que su cliente específicamente le esta aceptando.

Las nuevas fórmulas que se están desarrollando introducen una nueva familia de coeficientes, los coeficientes  $k$  o también llamados parámetros  $k$ , los cuales toman en cuenta los factores que afectan las evaluaciones visuales del color, tales como: el iluminante, la iluminancia, el campo visual que subtiende la muestra, su entorno, la separación entre las muestras y la textura de la muestra. La ecuación de diferencias más general, desarrollada por la CIE toma entonces la siguiente forma:

$$\Delta E_{00} = \frac{1}{K_E} \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2} \quad (4)$$

donde el 00 indica el año 2000. En esta ecuación los coeficientes  $S$  son los que toman en cuenta la corrección de las elipses en función de la ubicación del color. Es claro que los factores  $k$  deben ser constantes para cada base de datos específica.

## CONCLUSIONES

El objetivo de establecer tolerancias para las diferencias de color entre un estándar y una muestra de producción es el de proporcionar una evaluación del tipo PASA/FALLA de forma rápida y confiable. Básicamente lo que se busca es evaluar si el resultado de la medición cae dentro del volumen elíptico de aceptabilidad. Los paquetes de software actuales permiten hacer estos cálculos de manera rápida y ahora también dan la oportunidad de ir ajustando estos volúmenes de aceptabilidad en base a dos familias de parámetros: los factores de ubicación del color en el espacio cromático y los factores cromáticos de la evaluación visual. El uso adecuado de estas herramientas sólo es posible con un adecuado conocimiento de los conceptos colorimétricos involucrados, un manejo adecuado del software y una amplia experiencia en lo que se refiere a la determinación de los límites de aceptabilidad válidos para una base de datos determinada.

Siempre se recomienda que si la medición numérica indica que la muestra no esta siendo aceptada, se realice una evaluación visual contra el estándar, esto ayudará a verificar que las tolerancias especificadas son apropiadas o si requieren ser ajustadas.

## REFERENCIAS

- [1] Widdel Heino and Post David L., Ed., Color in Electronic Displays, Plenum, New York, 1992, p54.
- [2] Lozano R.; El color y su medición, América Lee, Buenos Aires 1978, p.245.
- [3] Billmeyer and Saltzman's; Ed., Principles of Color Technology, Wiley Interscience, New York, 2000., pp. 117–120.