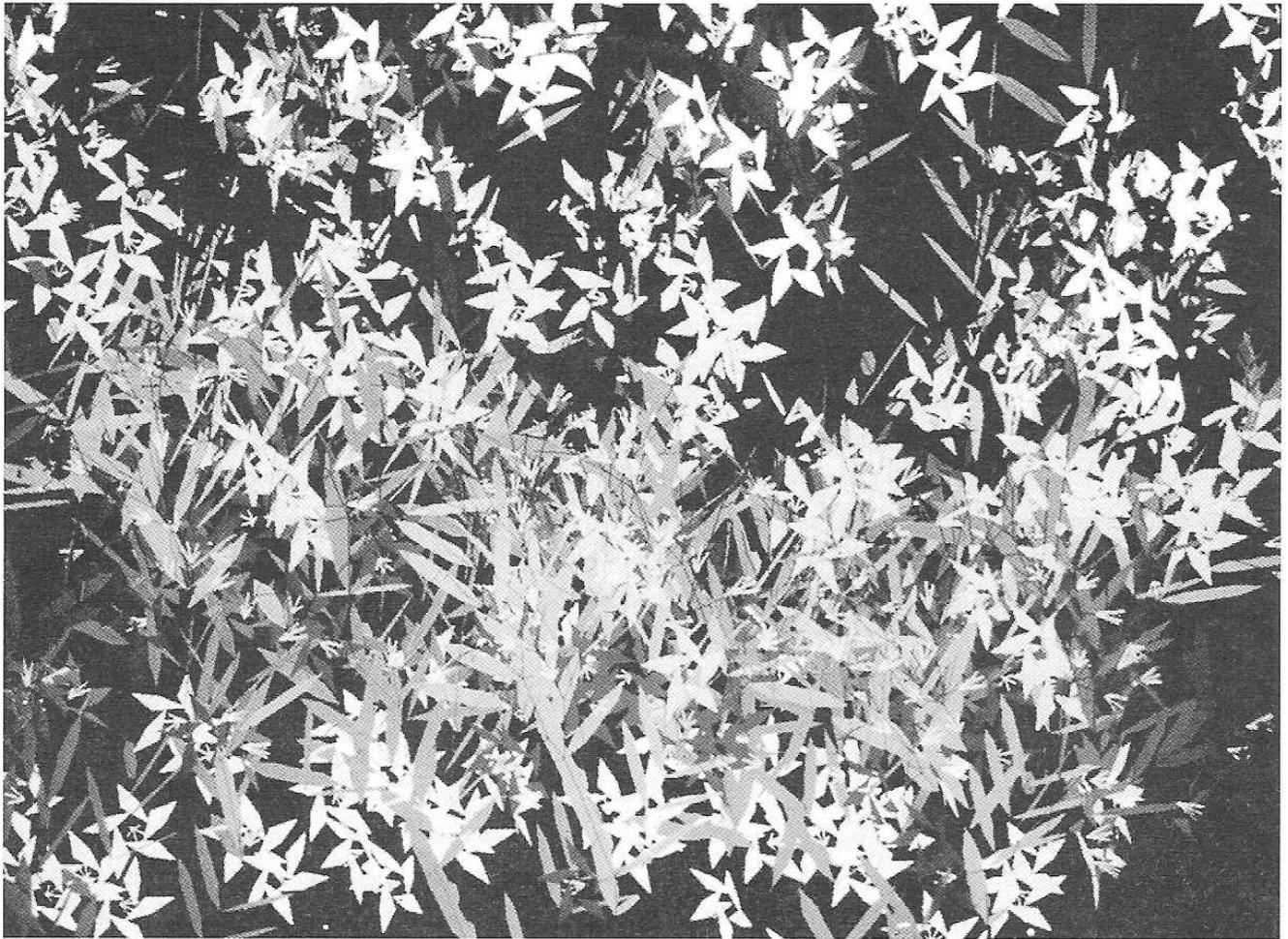


Modelos y aplicaciones del color



Una escena de flores generada por computadora, modelada con diversas combinaciones de color y una forma básica de pétalo. (Cortesía de Przemyslaw Prusinkiewicz, University of Calgary. © 1987.)

12.1	Propiedades de la luz	12.6	Los modelos de color CMY y CMYK
12.2	Modelos de color	12.7	El modelo de color HSV
12.3	Primarios estándar y diagrama cromático	12.8	El modelo de color HLS
12.4	El modelo de color RGB	12.9	Selección y aplicaciones del color
12.5	El modelo de color YIQ y los modelos relacionados	12.10	Resumen

Nuestras explicaciones sobre el color hasta este momento se han concentrado en el modelo de color RGB, que es el que se utiliza para generar las imágenes en los monitores de vídeo. Hay varios otros modelos de color que también son útiles en las aplicaciones infográficas. Algunos de los modelos se utilizan para describir la salida de color a través de impresoras y trazadoras gráficas. Otros se emplean para transmitir y almacenar información de color y otros, en fin, se usan para proporcionar a los programas una interfaz más intuitiva para el manejo de los parámetros de color.

12.1 PROPIEDADES DE LA LUZ

Como hemos indicado en los capítulos anteriores, la luz exhibe muchas características distintas y podemos describir las propiedades de la luz en diferentes formas en diferentes contextos. Físicamente, podemos caracterizar la luz como energía radiante, pero también necesitamos otros conceptos si queremos describir nuestra percepción de la luz.

El espectro electromagnético

En términos físicos, el color es una radiación electromagnética dentro de una estrecha banda de frecuencias. Algunos de los otros grupos de frecuencias del espectro electromagnético son los de las ondas de radio, las microondas, las ondas infrarrojas y los rayos X. La Figura 12.1 muestra los rangos de frecuencia aproximados para estos distintos tipos de radiación electromagnética.

Cada valor de frecuencia dentro de la región visible del espectro electromagnético se corresponde con un **color espectral** distinto. En el extremo de baja frecuencia (aproximadamente 3.8×10^{14} hercios) se encuentran los colores rojos, mientras que en el extremo de alta frecuencia (aproximadamente 7.9×10^{14} hercios) encontramos los colores violetas. En la realidad, el ojo humano también es sensible a algunas frecuencias de las bandas infrarroja y ultravioleta. Los colores espectrales van variando desde las tonalidades de rojo, a través del naranja y el amarillo (en el extremo de baja frecuencia), pasando luego por el verde, el azul y el violeta (en el extremo alto).

En el modelo ondulatorio de la radiación electromagnética, la luz puede describirse como un campo electromagnético que oscila de manera transversal y se propaga a través del espacio. Los campos eléctricos y magnéticos oscilan en direcciones perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. Para cada color espectral, la frecuencia de oscilación de la magnitud del campo está dada por la frecuencia f . La Figura 2.2 ilustra las oscilaciones variables en el tiempo de la magnitud del campo eléctrico dentro de un plano. El tiempo entre dos posiciones consecutivas de la onda que tienen la misma amplitud se denomina *período* $T = 1/f$ de la onda. Y la distancia que la onda viaja entre el comienzo de una oscilación y el comienzo de la siguiente se denomina *longitud de onda* λ . Para un color espectral (una onda monocromática), la longitud de onda y

frecuencia dominante (o **longitud de onda dominante**) en el extremo rojo del espectro. La frecuencia dominante se denomina también **tono**, o simplemente **color**, de la luz.

Características psicológicas del color

Necesitamos otras propiedades, además de la frecuencia, para caracterizar nuestra percepción de la luz. Cuando observamos una fuente luminosa, nuestros ojos responden al color (o frecuencia dominante) y a otras dos sensaciones básicas. Una de estas es lo que denominamos **brillo**, que se corresponde con la energía luminosa total y puede cuantificarse como la luminancia de la luz (Sección 10.3). La tercera característica percibida se denomina **pureza** o **saturación** de la luz. La pureza describe hasta qué punto una determinada radiación luminosa nos parece un color espectral puro, como por ejemplo el rojo. Los colores pálidos y los colores pastel tienen una baja pureza (baja saturación) con lo que parecen casi blancos. Otro término, la **chromaticidad**, se utiliza para referirse conjuntamente a las dos propiedades que describen las características de un color: pureza y frecuencia dominante (tono).

La radiación emitida por una fuente luminosa blanca tiene una distribución de energía que puede representarse en el rango de frecuencias visibles como se muestra en la Figura 12.3. Cada componente de frecuencia dentro del rango que va del rojo al violeta contribuye más o menos en la misma cantidad a la energía total, y el poder de la fuente se describe como blanco. Cuando hay presente una frecuencia dominante, la distribución de energía de la fuente toma una forma como la de la Figura 12.4. Este haz luminoso lo describiríamos como de color rojo (la frecuencia dominante), con un valor relativamente alto de pureza. La densidad de energía de la componente dominante de la luz está etiquetada como E_D en esta figura, y las contribuciones de las otras frecuencias producen una luz blanca con densidad de energía E_W . Podemos calcular el brillo de la fuente como el área comprendida bajo la curva, que nos da la densidad total de energía emitida. La pureza (saturación) depende de la diferencia entre E_D y E_W . Cuanto mayor sea la energía E_D de la frecuencia dominante, comparada con la componente de luz blanca E_W , mayor será la pureza de la luz. Tendremos una pureza del 100 por cien cuando $E_W = 0$ y una pureza del 0 por cien cuando $E_W = E_D$.

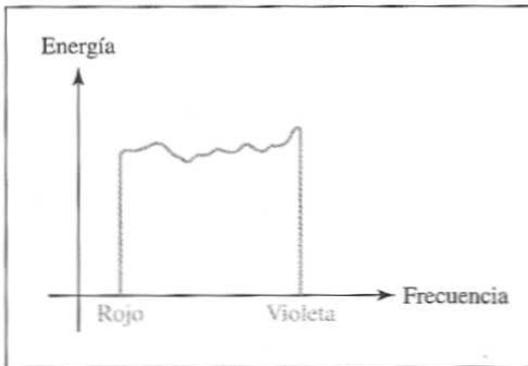


FIGURA 12.3. Distribución de energía de una fuente de luz blanca.

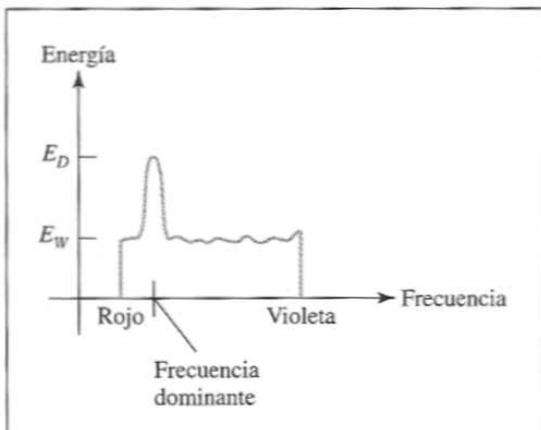


FIGURA 12.4. Distribución de energía para una fuente luminosa con una frecuencia dominante cerca del extremo rojo del rango de frecuencias.

12.2 MODELOS DE COLOR

Cualquier método utilizado para explicar las propiedades o el comportamiento del color dentro de un contexto concreto se denomina **modelo de color**. No hay un único modelo que pueda explicar todos los aspectos del color, por lo que se utilizan diferentes modelos como ayuda para describir las diferentes características del color.

Colores primarios

Cuando combinamos la luz de dos o más fuentes con diferentes frecuencias dominantes, podemos variar la cantidad (intensidad) de luz de cada fuente para generar un rango de colores adicionales. Esto representa un posible método para formar un modelo de color. Los tonos que elijamos para las fuentes se denominan **colores primarios** y la **gama de colores** del modelo será el conjunto de todos los colores que podemos producir a partir de los colores primarios. Dos primarios que se combinen para generar el color blanco se denominan **colores complementarios**. Como ejemplos de parejas de colores complementarios podemos citar el rojo y el cian, el verde y el magenta y el azul y el amarillo.

No existe ningún conjunto finito de colores primarios reales que puedan combinarse para producir todos los posibles colores visibles. Sin embargo, tres primarios resultan suficientes para la mayoría de los propósitos y los colores que no están presentes en la gama de colores correspondientes a un conjunto especificado de primarios pueden, de todos modos, describirse utilizando extensiones a los métodos. Dado un conjunto de tres colores primarios, podemos caracterizar cualquier cuarto color utilizando procesos de mezcla de colores. Así, una mezcla de uno o dos de los primarios con el cuarto color puede utilizarse para que se ajuste a alguna combinación de los restantes primarios. En este sentido ampliado, podemos considerar que un conjunto de tres colores primarios puede describir todos los colores. La Figura 12.5 muestra un conjunto de *funciones ajuste de color* para tres primarios y la cantidad de cada uno que hace falta para producir cualquier color espectral. Las curvas dibujadas en la Figura 12.5 se han obtenido promediando las opiniones de un gran número de observadores. Los colores en la vecindad de 500 nm sólo pueden generarse «restando» una cierta cantidad de luz roja de una combinación de luz azul y luz verde. Esto significa que un color situado en torno a 500 nm sólo puede describirse combinando dicho color con una cierta cantidad de luz roja con el fin de producir la combinación azul-verde especificada en el diagrama. Así, un monitor color RGB no puede mostrar colores en la vecindad de 500 nm.

Conceptos intuitivos del color

Un artista crea una pintura en color mezclando pigmentos coloreados con pigmentos blancos y negros con el fin de formar las diversas sombras, tintas y tonos de la escena. Comenzando con el pigmento de un «color

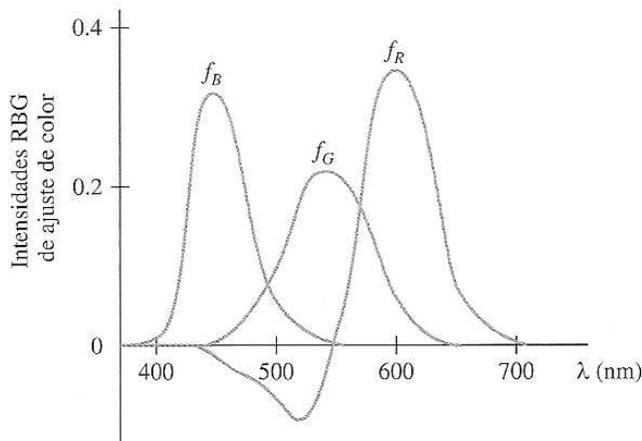


FIGURA 12.5. Tres funciones de ajuste de color para mostrar frecuencias espectrales dentro del rango aproximado que va de 400 nm a 700 nm.

puro» («tono puro»), el artista añade pigmento negro para generar distintas **sombras** de dicho color. Cuanto más pigmento negro añada, más oscura será la sombra del color. De forma similar, las diferentes **tintas** del color se obtienen añadiendo pigmento blanco al color original, haciéndolo más claro cuanto mayor cantidad de blanco se añada. Los **tonos** del color se obtienen añadiendo pigmento tanto blanco como negro.

Para muchas personas, estos conceptos de color son más intuitivos que describir un color mediante un conjunto de tres números que nos den las proporciones relativas de los colores primarios. Generalmente, es mucho más fácil pensar en crear un color rojo pastel añadiendo blanco a un rojo puro y generar un color azul oscuro añadiendo negro a un azul puro. Por esto, los paquetes gráficos que proporcionan paletas de color a los usuarios suelen utilizar dos o más modelos de color. Uno de los modelos proporciona una interfaz de color intuitiva para el usuario y el otro describe los componentes de color para los dispositivos de salida.

12.3 PRIMARIOS ESTÁNDAR Y DIAGRAMA CROMÁTICO

Puesto que no puede combinarse ningún conjunto finito de puntos luminosos para mostrar todos los colores posibles, en 1931 la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage, Comisión Internacional de Iluminación) definió tres primarios estándar. Estos tres primarios son colores imaginarios, que se definen matemáticamente con funciones positivas de ajuste de color (Figura 12.6) que especifican la cantidad de cada primario necesaria para describir cualquier color espectral. Esto proporciona una definición internacional estándar para todos los colores, y los primarios del CIE eliminan el ajuste de color con valores negativos y otros problemas asociados con la selección de un conjunto de primarios reales.

El modelo de color XYZ

El conjunto de primarios CIE se suele denominar modelo de color XYZ, donde los parámetros X , Y y Z representan la cantidad de cada primario CIE necesaria para producir el color seleccionado. Así, un color se describe con el modelo XYZ de la misma forma en que describimos un color utilizando el modelo RGB.

En el espacio de color tridimensional XYZ, representamos cualquier color $C(\lambda)$ como:

$$C(\lambda) = (X, Y, Z) \quad (12.2)$$

donde X , Y y Z se calculan a partir de las funciones de ajuste de color (Figura 12.6):

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\text{visible } \lambda} f_x(\lambda) I(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\text{visible } \lambda} f_y(\lambda) I(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\text{visible } \lambda} f_z(\lambda) I(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (12.3)$$

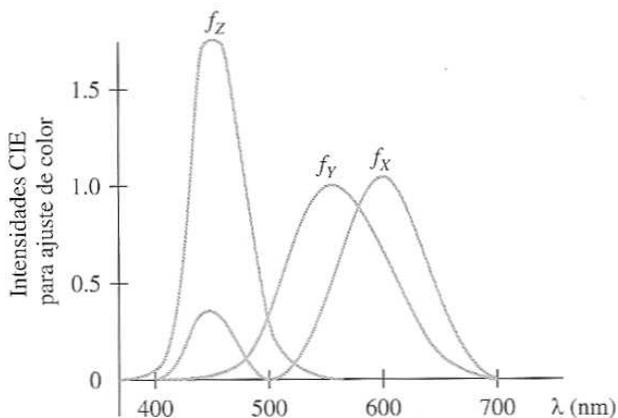


FIGURA 12.6. Las tres funciones de ajuste de color para los primarios de la CIE.

El parámetro k en estos cálculos tiene el valor de 683 lumens/vatio, donde el lumen es una unidad de medida para la radiación luminosa por unidad de ángulo sólido desde una fuente luminosa puntual «estándar» (que antiguamente se denominaba *candela*). La función $I(\lambda)$ representa la radiancia espectral, que es la intensidad luminosa seleccionada en una dirección concreta, y la función de ajuste de color f_Y se elige de tal de manera que el parámetro Y es la luminancia (Ecuación 10.26) de dicho color. Los valores de luminancia se ajustan normalmente para que ocupen el rango de 0 a 100.0, donde 100.0 representa la luminancia de la luz blanca.

Cualquier color puede representarse en el espacio de color XYZ como una combinación aditiva de los primarios utilizando los vectores unitarios \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} . Así, podemos escribir la Ecuación 12.2 de la forma:

$$C(\lambda) = X\mathbf{X} + Y\mathbf{Y} + Z\mathbf{Z} \quad (12.4)$$

Valores XYZ normalizados

Al hablar de las propiedades del color, resulta conveniente normalizar los valores de la Ecuación 12.3 con respecto a la suma $X + Y + Z$, que representa la energía luminosa total. Así, los valores normalizados se calculan de la forma siguiente:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (12.5)$$

Puesto que $x + y + z = 1$, cualquier color puede representarse simplemente con los valores x e y . Asimismo, hemos efectuado la normalización con respecto a la energía total, por lo que los parámetros x e y dependen sólo del tono y de la pureza y se denominan **valores de cromaticidad**. Sin embargo, los valores x e y no nos permiten por sí solos describir completamente todas las propiedades del color, y no podemos obtener los valores X , Y y Z . Por tanto, una descripción completa de un color se suele proporcionar mediante los tres valores x , y y la luminancia Y . Los valores restantes del modelo de la CIE se calculan entonces mediante las fórmulas

$$X = \frac{x}{y}Y, \quad Z = \frac{z}{y}Y \quad (12.6)$$

donde $z = 1 - x - y$. Utilizando las coordenadas de cromaticidad (x, y) , podemos representar todos los colores en un diagrama bidimensional.

Diagrama cromático de la CIE

Cuando dibujamos los valores normalizados x e y para los colores del espectro visible, obtenemos la curva con forma aproximada de parábola mostrada en la Figura 12.7. Esta curva se denomina **diagrama cromático CIE**. Los puntos de la curva son los colores espectrales (colores puros). La línea que une los puntos espectrales correspondientes al rojo y al violeta, denominada *línea púrpura*, no forma parte del espectro. Los puntos interiores representan todas las posibles combinaciones de colores visibles. El punto C del diagrama corresponde a la posición de la luz blanca. En realidad, este punto se dibuja para una fuente luminosa blanca conocida con el nombre **iluminante C**, que se utiliza como aproximación estándar para la luz diurna promedio.

Los valores de luminancia no están disponibles en el diagrama cromático, debido a la normalización. Distintos colores con diferente luminancia pero con la misma cromaticidad se representarán mediante el mismo punto. El diagrama cromático resulta útil para:

- Comparar las barras de colores correspondientes a diferentes conjuntos de primarios.
- Identificar colores complementarios.
- Determinar la pureza y la longitud de onda dominante de un color especificado.

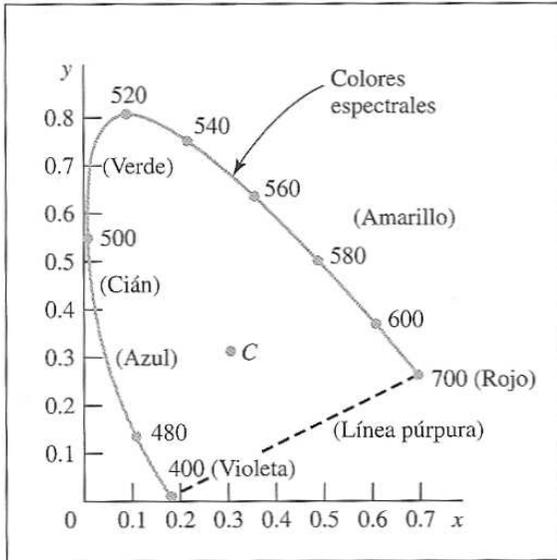


FIGURA 12.7. Diagrama cromático CIE para los colores espectrales comprendidos entre 400 nm y 700 nm.

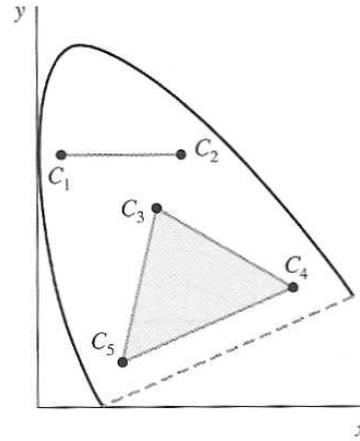


FIGURA 12.8. Gammas de colores definidas en el diagrama cromático para un sistema de primarios de dos colores y de tres colores.

Gamas de colores

Podemos identificar las gamas de colores en el diagrama cromático como segmentos de línea recta o regiones poligonales. Todos los colores situados en la línea recta que une las posiciones C_1 y C_2 en la Figura 12.8 pueden obtenerse mezclando las cantidades apropiadas de dichos colores C_1 y C_2 . Si se utiliza una mayor proporción de C_1 , el color resultante estará más próximo a C_1 que a C_2 . La gama de colores para tres puntos, como por ejemplo C_3 , C_4 y C_5 en la Figura 12.8, es un triángulo con sus vértices situados en las posiciones de dichos tres colores. Estos tres primarios pueden generar únicamente los colores situados dentro del triángulo o en sus aristas de contorno. Así, el diagrama cromático nos ayuda a comprender por qué ningún conjunto de tres primarios puede combinarse de forma aditiva para generar todos los colores, ya que ningún triángulo del diagrama puede abarcar todos los colores del mismo. Podemos comparar cómodamente mediante el diagrama cromático las gamas de colores de los monitores de vídeo y de los dispositivos de obtención de copias impresas.

Colores complementarios

Puesto que la gama de colores para dos puntos es una línea recta, los colores complementarios deben estar representados en el diagrama de cromaticidad como dos puntos situados en lados opuestos de C y colineales con C , como en la Figura 12.9. Las distancias de los dos colores C_1 y C_2 a C determinan la cantidad de cada color necesaria para producir luz blanca.

Longitud de onda dominante

Para determinar la longitud de onda dominante de un color, dibujamos una línea recta desde C a través de dicho punto de color, hasta alcanzar un color espectral en la curva cromática. El color espectral C_s en la Figura 2.10 es la longitud de onda dominante para el color C_1 en este diagrama. Así, el color C_1 puede representarse como una combinación de la luz blanca C y el color espectral C_s . Este método para determinar la longitud de onda dominante no sirve para los puntos de color que se encuentren entre C y la línea púrpura. Si dibujamos una línea desde C a través del punto C_2 en la Figura 12.10, llegamos al punto C_p en la línea púrpura, que no se encuentra en el espectro visible. En este caso, tomamos el complementario de C_p en la curva espectral,

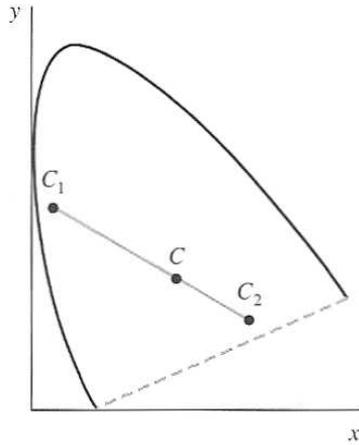


FIGURA 12.9. Representación de colores complementarios en el diagrama cromático.

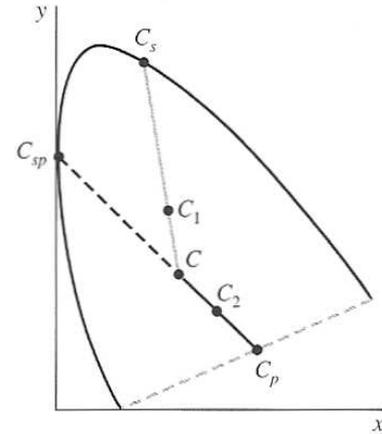


FIGURA 12.10. Determinación de la longitud de onda dominante y de la pureza utilizando el diagrama cromático.

que será el punto C_{sp} , como longitud de onda dominante. Los colores como C_2 en este diagrama tienen distinciones espectrales como longitudes de onda dominantes subtractivas. Podemos describir dichos colores restando de la luz blanca la longitud de onda dominante espectral.

Pureza

Para un punto de color tal como C_1 en la Figura 12.10, determinamos la pureza como la distancia relativa de C_1 a C según la línea recta que une C con C_s . Si d_{c_1} denota la distancia desde C a C_1 y d_{cs} es la distancia desde C a C_s , podemos representar la pureza como el cociente d_{c_1}/d_{cs} . El color C_1 en esta figura tiene una pureza aproximadamente del 25 por ciento, ya que está situado aproximadamente a un cuarto de la distancia total de C a C_s . En la posición C_s , el punto de color sería 100 por cien puro.

12.4 EL MODELO DE COLOR RGB

De acuerdo con la *teoría de los tres estímulos* de la visión, nuestros ojos perciben el color mediante la estimación de tres pigmentos visuales en los conos de la retina. Uno de los pigmentos es más sensible a la luz con una longitud de onda de unos 630 nm (roja), otro tiene su pico de sensibilidad para unos 530 nm (verde) y el tercer pigmento es especialmente receptivo a la luz con una longitud de onda de unos 450 nm (azul). Comparando las intensidades de una fuente luminosa, podemos percibir el color de la luz. Esta teoría de la visión es la base para la visualización de los colores en un monitor de vídeo utilizando los tres primarios rojo, verde y azul, que es lo que se denomina modelo de color RGB.

Podemos representar este modelo utilizando el cubo unitario definido sobre sendos ejes R , G y B , como se muestra en la Figura 12.11. El origen representa el color negro y el vértice diagonalmente opuesto, con coordenadas $(1, 1, 1)$, es el blanco. Los vértices del cubo situados sobre los ejes representan los colores primarios y los restantes vértices son los puntos de color complementario para cada uno de los colores primarios.

Al igual que con el sistema de color XYZ, el esquema de color RGB es un modelo aditivo. Cada punto de color dentro del cubo unitario puede representarse como una suma vectorial ponderada de los colores primarios, utilizando los vectores unitario \mathbf{R} , \mathbf{G} y \mathbf{B} :

$$C(\lambda) = (R, G, B) = R \mathbf{R} + G \mathbf{G} + B \mathbf{B} \quad (12.7)$$

donde los parámetros R , G y B toman valores en el rango que va de 0 a 1.0. Por ejemplo, el vértice magenta se obtiene sumando los valores máximos de rojo y azul para producir la tripleta $(1, 0, 1)$, mientras que el blan-

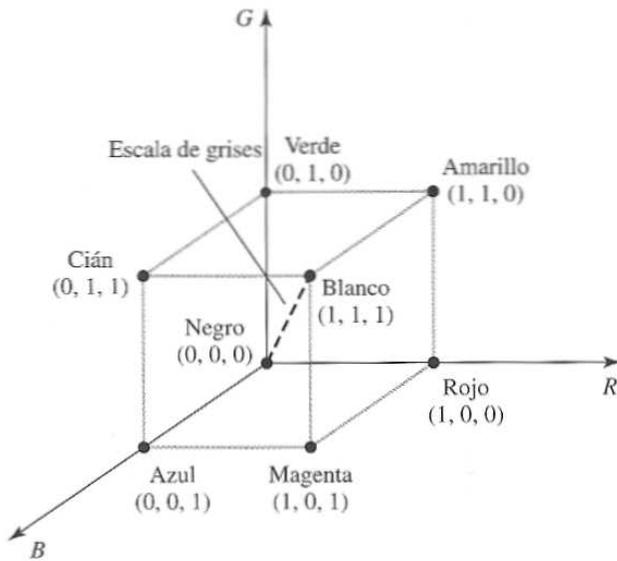


FIGURA 12.11. El modelo de color RGB. Cualquier color dentro del cubo unitario puede describirse mediante la combinación aditiva de los tres colores primarios.

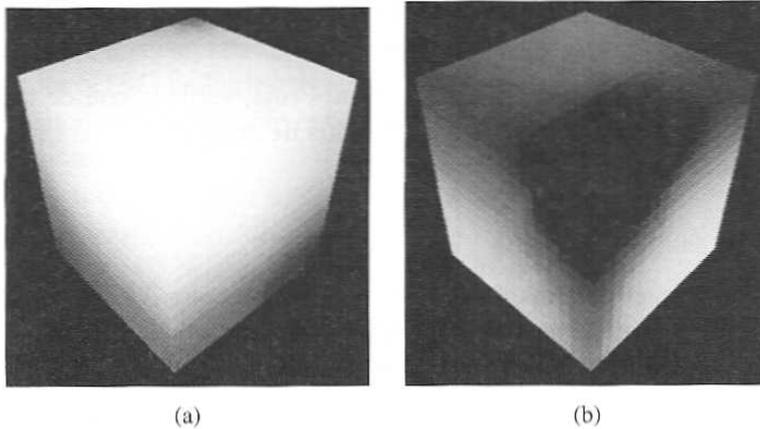


FIGURA 12.12. Dos vistas del cubo de color RGB. La vista (a) es según la diagonal de escala de grises que va de blanco a negro y la vista (b) es según la diagonal de escala de grises que va de negro a blanco.

co en $(1, 1, 1)$ es la suma de los valores máximos de rojo, verde y azul. Las sombras de gris están representadas a lo largo de la diagonal principal del cubo, desde el origen (negro) hasta el vértice blanco. Los puntos situados en esta diagonal tienen una contribución igual de cada uno de los colores primarios, y una sombra de gris a medio camino entre el negro y el blanco se representa como $(0.5, 0.5, 0.5)$. Las graduaciones de color en los planos frontales y superior del cubo RGB se ilustran en la Figura 12.12.

Las coordenadas cromáticas para los fósforos RGB del estándar NTSC (National Television System Committee) se indican en la Tabla 12.1. También se indican las coordenadas cromáticas RGB dentro del modelo de color CIE y los valores aproximados utilizados para los fósforos en los monitores en color. La Figura 12.13 muestra la gama aproximada de colores para los primarios RGB del estándar NTSC.

TABLA 12.1. COORDENADAS CROMÁTICAS RGB (x, y) .

	Estándar NTSC	Modelo CIE	Valores aproximados monitor color
R	(0.670, 0.330)	(0.735, 0.265)	(0.628, 0.346)
G	(0.210, 0.710)	(0.274, 0.717)	(0.268, 0.588)
B	(0.140, 0.080)	(0.167, 0.009)	(0.150, 0.070)

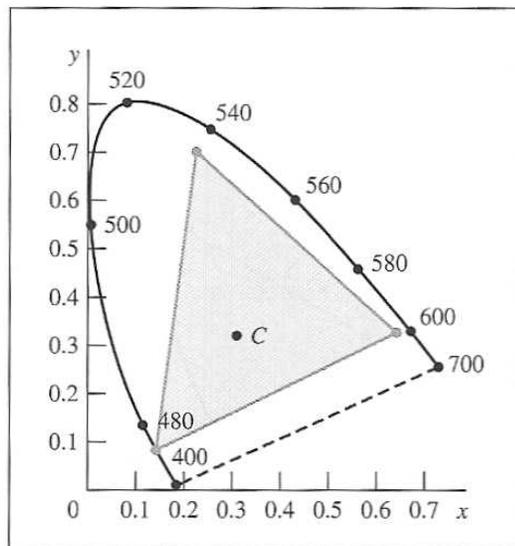


FIGURA 12.13. La gama de colores RGB para las coordenadas cromáticas NTSC. El iluminante C se encuentra en la posición (0.310, 0.316), con un valor de luminancia de $Y = 100.0$.

12.5 EL MODELO DE COLOR YIQ Y LOS MODELOS RELACIONADOS

Aunque un monitor gráfico RGB requiere señales separadas para las componentes roja, verde y azul de las imágenes, los monitores de televisión utilizan una señal compuesta. La codificación de color NTSC para formar la señal de vídeo compuesta se denomina modelo YIQ.

Los parámetros YIQ

En el modelo de color YIQ, el parámetro Y es igual que la componente Y del espacio de color XYZ de CIE. La información de luminancia (brillo) está contenida en el parámetro Y , mientras que la información cromática (tono y pureza) está incorporada en los parámetros I y Q . Para el parámetro Y se elige una combinación de rojo, verde y azul para obtener la curva de luminosidad estándar. Puesto que Y contiene la información de luminancia, los monitores de televisión en blanco y negro sólo utilizan la señal Y . El parámetro I contiene la información de color naranja-cian que proporciona el tono de sombreado de la piel, mientras que el parámetro Q comunica la información de color verde-magenta.

La señal de color compuesta NTSC está diseñada para proporcionar la información de tal manera que pueda ser recibida por los monitores de televisión en blanco y negro, que obtienen la información de escala de grises para una imagen dentro de un ancho de banda de 6 MHz. Así, la información YIQ está también codificada dentro de un ancho de banda de 6 MHz, pero los valores de luminancia y cromáticos están codificados en señales analógicas separadas. De esta forma, la señal de luminancia no tiene porqué cambiar con respecto a la de los monitores en blanco y negro, añadiéndose simplemente la información de color dentro del mismo ancho de banda. La información de luminancia, el valor Y , se comunica como una modulación de amplitud sobre una señal portadora con un ancho de banda de 4.2 MHz. La información cromática, los valores I y Q , está combinada sobre una segunda señal portadora que tiene un ancho de banda de unos 1.8 MHz. Los nombres de los parámetros I y Q hacen referencia a los métodos de modulación utilizados para codificar la información de color sobre esta portadora. Una codificación de modulación de amplitud (la señal «en fase») transmite el valor I , utilizando unos 1.3 MHz del ancho de banda, mientras que una codificación por modulación de fase (la señal «en cuadratura»), que utilizan unos 0.5 MHz, transporta el valor Q .

Los valores de luminancia están codificados con mayor precisión en la señal NTSC (ancho de banda de 4.2 MHz) que los valores cromáticos (ancho de banda 1.8 MHz), porque los humanos podemos detectar más fácilmente los pequeños cambios de brillo que los pequeños cambios de color. Sin embargo, esta menor precisión de la codificación cromática hace que las imágenes NTSC presenten una cierta degradación de la calidad del color.

Podemos calcular el valor de luminancia para un color RGB utilizando la Ecuación 10.27, y un método para producir los valores cromáticos consiste en restar la luminancia de las componentes roja y azul del color. Así,

$$\begin{aligned} Y &= 0.299 R + 0.587 G + 0.114 B \\ I &= R - Y \\ Q &= B - Y \end{aligned} \quad (12.8)$$

Transformaciones entre los espacios de color RGB e YIQ

Un color RGB puede convertirse a un conjunto de valores YIQ utilizando un codificador NTSC que implemente los cálculos de la Ecuación 12.8 y que module las señales portadoras. La conversión del espacio RGB al espacio YIQ se lleva a cabo utilizando la siguiente matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.701 & -0.587 & -0.114 \\ -0.299 & -0.587 & 0.886 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (12.9)$$

A la inversa, una señal de vídeo NTSC puede convertirse a valores de color RGB utilizando un decodificador NTSC, que primero separa la señal de vídeo en las componentes YIQ y luego convierte los valores YIQ a valores RGB. La conversión desde el espacio YIQ al espacio RGB se lleva a cabo mediante la transformación inversa 12.9:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.000 & 0.000 \\ 1.000 & -0.509 & -0.194 \\ 1.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} \quad (12.10)$$

Los sistemas YUV e $Y C_r C_b$

Debido al menor ancho de banda asignada a la información cromática en la señal de vídeo analógico compuesta NTSC, la calidad del color de una imagen NTSC no es la que debiera. Por tanto, se han desarrollado variaciones de la codificación YIQ para mejorar la calidad del color en las transmisiones de vídeo. Una de tales codificaciones es el conjunto YUV de parámetros de color, que proporciona la información de color compuesto para transmisiones de vídeo en sistemas tales como PAL (Phase Alternation Line) Broadcasting, que se utiliza en la mayor parte de Europa, así como en África, Australia y Eurasia. Otra variación de YIQ es la codificación digital denominada $Y C_r C_b$. Esta representación del color se utiliza para manipulación de vídeo digital, y está incorporada en diversos formatos de archivo gráfico, como por ejemplo el sistema JPEG (Sección 15.4).

12.6 LOS MODELOS DE COLOR CMY Y CMYK

Un monitor de vídeo muestra los patrones de color combinando la luz emitida por los fósforos de pantalla, lo cual es un proceso aditivo. Sin embargo, los dispositivos de obtención de copias impresas, como las impresoras y trazadoras gráficas, generan una imagen en color recubriendo el papel con pigmentos coloreados. Nosotros vemos los patrones de color del papel mediante la luz reflejada, lo cual es un proceso substractivo.

Los parámetros CMY

Podemos formar un modelo de color substractivo utilizando los tres colores primarios cian, magenta y amarillo. Como hemos indicado, el cian puede describirse como una combinación de verde y azul; por tanto, cuan-

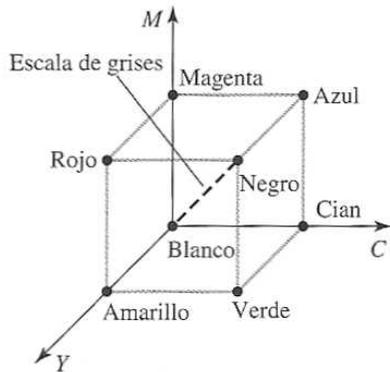


FIGURA 12.14. El modelo de color CMY. Las posiciones dentro del cubo se describen restando del blanco las cantidades especificadas de los colores primarios.

do se refleja luz blanca en una tinta de color cian, la luz reflejada sólo contiene las componentes verde y azul, y la componente roja es absorbida, o restada, por la tinta. De forma similar, la tinta magenta resta la componente verde de la luz incidente y la tinta amarilla resta la componente azul. En la Figura 12.14 se ilustra un cubo unitario que sirve para representar el modelo CMY.

En el modelo CMY, la posición espacial (1, 1, 1) representa el negro, porque se restan todos los componentes de la luz incidente. El origen representa la luz blanca. Si se utilizan cantidades iguales de cada uno de los colores primarios, se obtienen las sombras de gris, situadas a lo largo de la diagonal principal del cubo. Una combinación de cian y magenta produce luz azul, porque las componentes roja y verde de la luz incidente se absorben. De forma similar, una combinación de tinta cian y amarilla produce luz verde, mientras que una combinación de tinta magenta y amarilla nos da la luz roja.

El proceso de impresión CMY utiliza a menudo una colección de cuatro puntos de tinta, que están dispuestos en un determinado patrón, de modo similar a cómo se utilizan en un monitor RGB los tres puntos de fósforo. Así, en la práctica, el modelo de color CMY se denomina modelo CMYK, donde K es el parámetro de color negro. Se utiliza un punto de tinta para cada uno de los colores primarios (cian, magenta y amarillo) y otro punto de tinta es negro. Se incluye un punto negro porque la luz reflejada a partir de las tintas cian, magenta y amarilla sólo produce normalmente sombras de gris. Algunos trazadores gráficos producen diferentes combinaciones de color indexando las tintas de unos colores primarios sobre otros y permitiéndolas mezclarse antes de que se sequen. Para impresión en blanco y negro o en escala de grises, sólo se utiliza la tinta negra.

Transformaciones entre los espacios de color CMY y RGB

Podemos expresar la conversión de una representación RGB a una representación CMY utilizando la siguiente matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (12.11)$$

donde el punto blanco del espacio RGB está representado mediante el vector columna unitario. Asimismo, podemos convertir de una representación en color CMY a una representación RGB utilizando la matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} \quad (12.12)$$

En esta transformación, el vector columna unitario representa el punto negro del espacio de color CMY.

Para la conversión de RGB al espacio de color CMYK, primero hacemos $K = \max(R, G, B)$ y luego restamos K de cada uno de los valores C, M e Y en la Ecuación 12.11. De forma similar, para la transformación de CMYK a RGB, primero hacemos $K = \min(R, G, B)$ y luego restamos K de cada uno de los valores R, G y B de la Ecuación 12.12. En la práctica, estas ecuaciones de transformación se suelen modificar con el fin de mejorar la calidad de impresión de cada sistema concreto.

12.7 EL MODELO DE COLOR HSV

Las interfaces para selección de colores por parte de los usuarios emplean a menudo un modelo de color basado en conceptos intuitivos, en lugar de en un conjunto de colores primarios. Podemos especificar un color en un modelo intuitivo seleccionando un color espectral y las cantidades de blanco y de negro que hay que añadir a ese color para obtener diferentes sombras, tintas y tonos (Sección 12.2).

Los parámetros HSV

Los parámetros de color en este modelo se denominan *tono* (H), *saturación* (S) y *valor* (V). Podemos definir este espacio de color tridimensional relacionando los parámetros HSV con las direcciones del cubo RGB. Si pensamos en la visualización del cubo según la diagonal que va desde el vértice blanco hasta el origen (negro), podremos ver el contorno del cubo con forma hexagonal que se muestra en la Figura 12.15. El contorno del hexágono representa los distintos tonos y se utiliza como parte superior del cono hexagonal HSV (Figura 12.16). En el espacio HSV, la saturación S se mide según un eje horizontal y el parámetro de valor V se mide según un eje vertical que pasa por el centro del cono hexagonal.

El tono está representado como un ángulo con respecto al eje vertical, yendo de 0° para el rojo a 360° . Los vértices del hexágono están separados por intervalos de 60° . El amarillo se encuentra en 60° , el verde en 120° y el cian (opuesto al punto rojo) se encuentra en $H = 180^\circ$. Los colores complementarios están separados por 180° .

El parámetro de saturación S se utiliza para especificar la pureza de un color. Un color puro (color espectral) tiene el valor $S = 1.0$ y los valores de S decrecientes tienden hacia la línea de escala de grises ($S = 0$), situada en el centro del cono hexagonal.

El valor V varía entre 0 en el vértice del cono hexagonal y 1.0 en el plano superior. El vértice del cono hexagonal es el punto negro. En el plano superior, los colores tienen su máxima intensidad. Cuando $V = 1.0$ y $S = 1.0$, tendremos los tonos puros. Los valores de los parámetros para el punto blanco son $V = 1.0$ y $S = 0$.

Para la mayoría de los usuarios, este es el modelo más cómodo para la selección de colores. Comenzando con una selección de un tono puro, que especifica el ángulo de tono H y hace $V = S = 1.0$, describimos el

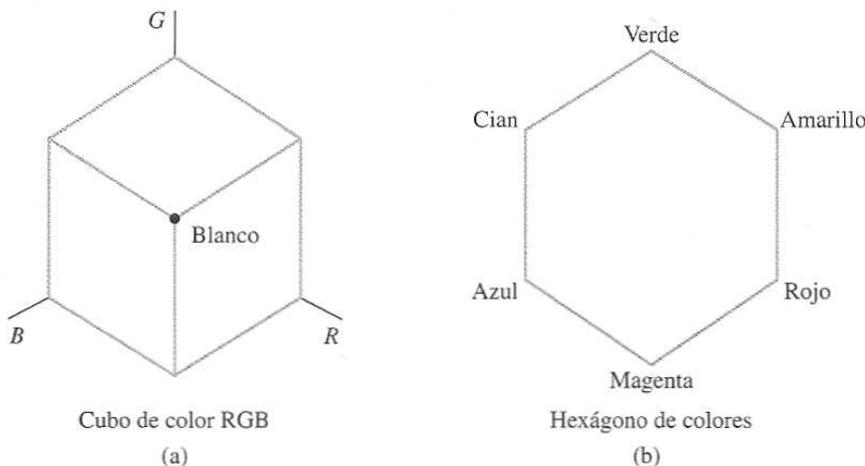


FIGURA 12.15. Cuando vemos (a) el cubo de color RGB según la diagonal que va del blanco al negro, el contorno del cubo de color tiene forma hexagonal (b).

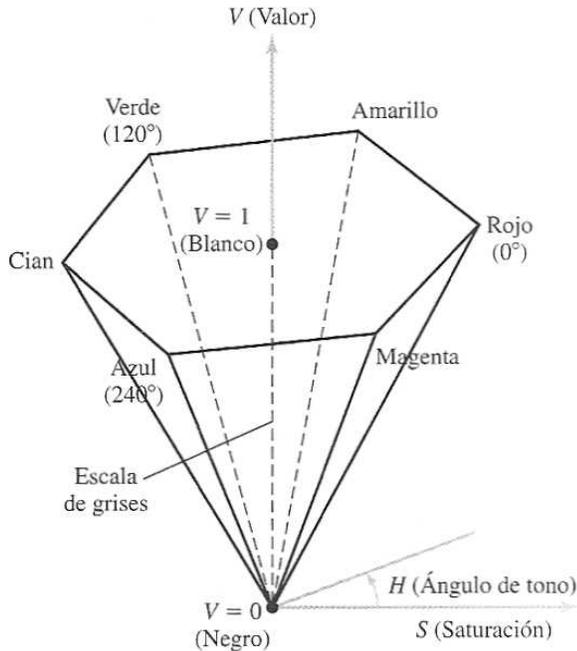


FIGURA 12.16. El cono hexagonal HSV.

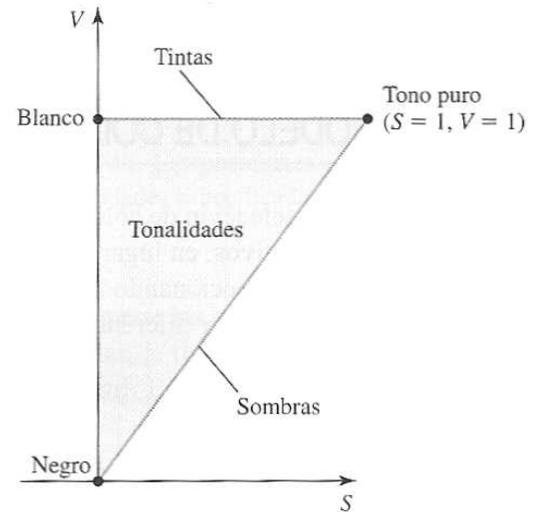


FIGURA 12.17. Sección transversal del cono hexagonal HSV, que muestra las regiones para las sombras, tintas y tonalidades.

color que queremos añadiendo blanco o negro al tono puro. La adición de negro hace que disminuya el valor de V mientras que S se mantiene constante. Por ejemplo, para obtener un azul oscuro, le podríamos asignar a V el valor 0.4 con $S = 1.0$ y $H = 240^\circ$. De modo similar, cuando se añade blanco al tono seleccionado, el parámetro S decrece mientras que V se mantiene constante. Un azul claro podría especificarse con $S = 0.3$, $V = 1.0$ y $H = 240^\circ$. Añadiendo algo de negro y algo de blanco, hacemos que disminuyan tanto V como S . Las interfaces que utilizan este modelo suelen presentar las opciones de selección de los parámetros HSV mediante una paleta de color que contiene deslizadores y una rueda de color.

Selección de sombras, tintas y tonalidades

Las regiones de color para la selección de sombras, tintas y tonos están representadas en el plano de sección transversal del cono hexagonal HSV que se muestra en la Figura 12.17. Añadiendo negro a un color espectral, el valor de V decrece a lo largo del lado del cono hexagonal, desplazándonos hacia el punto negro. Así, las distintas sombras estarán representadas por los valores $S=1.0$ y $0.0 \leq V \leq 1.0$. La adición de blanco a los colores espectrales produce las distintas tintas situadas en el plano superior del cono hexagonal, donde los valores de los parámetros son $V = 1.0$ y $0 \leq S \leq 1.0$. Las diversas tonalidades se obtienen añadiendo tanto blanco como negro a los colores espectrales, lo que genera los puntos de color situados dentro del área triangular de sección transversal del cono hexagonal.

El ojo humano puede distinguir aproximadamente unos 128 tonos distintos y unas 130 tintas (niveles de saturación) distintas. Para cada uno de estos, podemos detectar diversas sombras (valores), dependiendo del tono seleccionado. Con los colores amarillos, podemos distinguir unas 23 sombras, mientras que en el extremo azul del espectro sólo podemos distinguir 16. Esto significa que el número de colores distintos que podemos distinguir es de aproximadamente $128 \times 130 \times 23 = 382,720$. Para la mayoría de las aplicaciones gráficas, 128 tonos, 8 niveles de saturación y 16 valores suelen ser suficientes. Con este rango de parámetros en el modelo de color HSV, habrá disponible 16,384 colores para el usuario. Estos valores de color pueden almacenarse con 14 bits por píxel, o bien pueden utilizarse tablas indexadas de colores y un número de bits por píxel menor.

Transformaciones entre los espacios de color HSV y RGB

Para determinar las operaciones requeridos para las transformaciones entre los espacios HSV y RGB, vamos a ver primero cómo puede construirse el cono hexagonal HSV a partir del cubo RGB. La diagonal del cubo RGB que va de negro (el origen) a blanco se corresponden con el eje V del cono hexagonal. Asimismo, cada subcubo del cubo RGB se corresponde con un área hexagonal de sección transversal del cono. En cada sección transversal, todos los lados del hexágono y todas las líneas radiales que van del eje V hasta cualquier vértice tienen el valor V . Así, para cualquier conjunto de valores RGB, V será igual al valor de la componente RGB máxima. El punto HSV correspondiente a este conjunto de valores RGB estará en la sección transversal hexagonal correspondiente al valor V . El parámetro S puede entonces determinarse como la distancia relativa de este punto con respecto al eje V . El parámetro H se determinará calculando la posición relativa del punto dentro de cada sextante del hexágono. En el siguiente procedimiento se proporciona un algoritmo para mapear cualquier conjunto de valores RGB sobre los correspondientes valores HSV:

Podemos obtener la transformación desde el espacio HSV al espacio RGB realizando las operaciones inversas a las que se muestran en el procedimiento anterior. Estas operaciones inversas se llevan a cabo para cada sextante del cono hexagonal y las ecuaciones de transformación resultantes están resumidas en el siguiente algoritmo:

```
class rgbSpace {public: float r, g, b;};
class hsvSpace {public: float h, s, v;};

const float noHue = -1.0;
inline float min(float a, float b) {return (a < b)? a : b;}
inline float max(float a, float b) {return (a > b)? a : b;}

void rgbTOhsv (rgbSpace& rgb, hsvSpace& hsv)
{
    /* Los valores RGB y HSV están en el rango 0 a 1.0 */
    float minRGB = min (r, min (g, b)), maxRGB = max (r, max (g, b));
    float deltaRGB = maxRGB - minRGB;
    v = maxRGB;
    if (maxRGB != 0.0)
        s = deltaRGB / maxRGB;
    else
        s = 0.0;
    if (s <= 0.0)
        h = noHue;
    else {
        if (r == maxRGB)
            h = (g - b) / deltaRGB;
        else
            if (g == maxRGB)
                h = 2.0 + (b - r) / deltaRGB;
            else
                if (b == maxRGB)
                    h = 4.0 + (r - g) / deltaRGB;
        h *= 60.0;
        if (h < 0.0)
```

```

        h += 360.0;
    h /= 360.0;
}
}

```

12.8 EL MODELO DE COLOR HLS

Otro modelo basado en parámetros intuitivos de color es el sistema HLS utilizado por Tektronix Corporation. Este espacio de color tiene la representación de doble cono que se muestra en la Figura 12.18. Los tres parámetros de este modelo de color se denominan tono (H), claridad (L) y saturación (S).

El tono tiene el mismo significado que en el modelo HSV. Especificando un ángulo con respecto al eje vertical que indica un tono (color espectral). En este modelo, $H = 0^\circ$ se corresponde con el azul. Los colores restantes se especifican alrededor del perímetro de cono en el mismo orden que en el modelo HSV. El magenta estará a 60° , el rojo a 120° y el cian a $H = 180^\circ$. De nuevo, los colores complementarios estarán separados 180° en este doble cono.

El eje vertical en este modelo se denomina claridad, L . Para $L = 0$, tendremos el negro, mientras que el blanco se encontrará en $L = 1.0$. Los valores de escala de grises se encuentran a lo largo del eje L y los colores puros están en el plano $L = 0.5$.

El parámetro de saturación S especifica de nuevo la pureza de un color. Este parámetro varía entre 0 y 1.0 y los colores puros son aquellos para los que $S = 1.0$ y $L = 0.5$. A medida que S disminuye, se añade más blanco a un color. La línea de escala de grises se encuentra en $S = 0$.

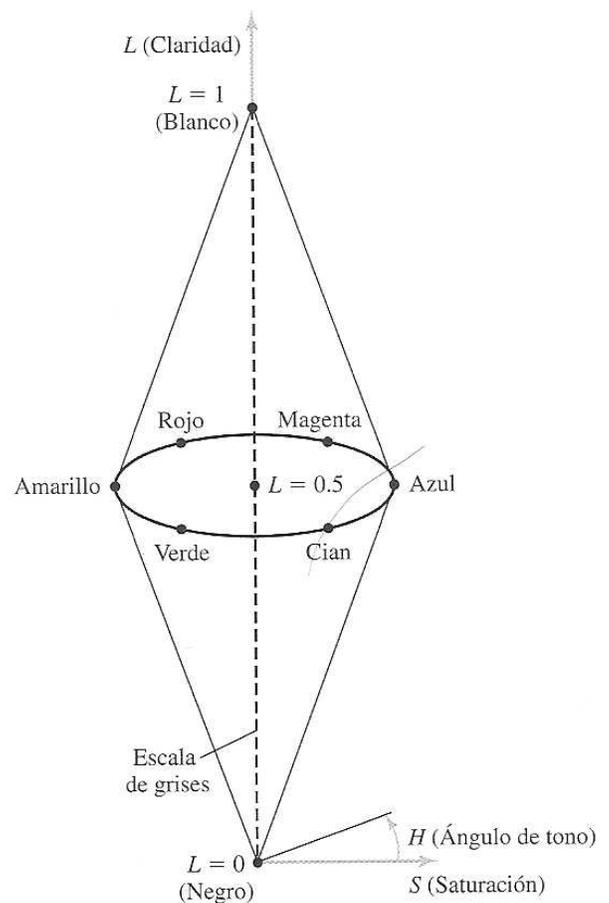


FIGURA 12.18. El doble cono HLS.

Para especificar un color, comenzamos seleccionando el ángulo de tono H . Entonces, podemos obtener una sombra, tinta o tonalidad correspondientes a dicho tono ajustando los parámetros L y S . Se obtiene un color más claro incrementando L , mientras que si se disminuye L el color que se obtiene es más oscuro. Cuando se reduce S , el punto de color espacial se mueve hacia la línea de escala de grises.

12.9 SELECCIÓN Y APLICACIONES DEL COLOR

Los paquetes gráficos pueden proporcionar capacidades de color que nos ayuden a seleccionar los colores necesarios. Por ejemplo, una interfaz puede contener deslizadores y ruedas de color en lugar de exigirnos que todas las especificaciones de color se proporcionen como valores numéricos que definan las componentes RGB. Además, pueden proporcionarse facilidades para seleccionar combinaciones de color armoniosas, así como directrices para la selección básica de colores.

Un método para obtener un conjunto de colores coordinados consiste en generar las combinaciones de color a partir de un pequeño subespacio del modelo de color. Si los colores se seleccionan a intervalos regulares situados a lo largo de cualquier línea recta dentro del cubo RGB o CMY, por ejemplo, cabe esperar que obtengamos un conjunto de colores bien adaptados. Los tonos aleatoriamente seleccionados producen normalmente combinaciones de color duras y muy chocantes. Otra consideración que hay que tener en cuenta en las imágenes de color es el hecho de que percibimos los colores con profundidades diferentes. Esto sucede porque los ojos enfocan los colores de acuerdo con su frecuencia. Por ejemplo, los azules tienden a parecer más lejanos de lo que están en realidad. Si se muestra un patrón azul al lado de uno rojo los ojos tenderán a fatigarse, ya que necesitaremos continuamente ajustar el enfoque cuando desplazemos nuestra atención de un área a otra. Este problema puede reducirse separando estos colores o utilizando colores extraídos de una mitad o menos del hexágono de colores del modelo HSV. Con esta técnica, la imagen contendrá azules y verdes o rojos y amarillos, por ejemplo.

Como regla general, la utilización de un número menor de colores produce imágenes con mejor aspecto que si se utilizara un gran número de colores. Asimismo, las tintas y las sombras tienden a mezclarse mejor que los tonos puros. Para un fondo, el gris o el complementario de uno de los colores de primer plano suelen ser las mejores elecciones.

12.10 RESUMEN

La luz puede describirse como una radiación electromagnética con una cierta distribución de energía y que se propaga a través del espacio, y los componentes de color de la luz se corresponden con las frecuencias situadas dentro de una estrecha banda del espectro electromagnético. Sin embargo, la luz exhibe otras propiedades, y podemos caracterizar los diferentes aspectos de la luz utilizando diversos parámetros. Con las teorías de la luz basadas en la dualidad onda-corpúsculo, podemos explicar las características físicas de la radiación visible, mientras que para cuantificar nuestras percepciones sobre una fuente luminosa utilizamos términos tales como la frecuencia dominante (tono), la luminancia (brillo) y la pureza (saturación). El tono y la pureza se suelen denominar, conjuntamente, propiedades cromáticas de un color.

También utilizamos los modelos de color para explicar los efectos de la combinación de fuentes luminosas. Un método para definir un modelo de color consiste en especificar un conjunto de dos o más colores primarios que se combinan para generar otros colores. Sin embargo, no hay ningún conjunto finito de colores primarios capaz de producir todos los colores o de describir todas las características de color. El conjunto de colores que puede generarse a partir del conjunto de primarios se denomina gama de colores. Dos colores que puedan combinarse para producir luz blanca se denominan colores complementarios.

En 1931, la CIE (Comisión Internacional de Iluminación) adoptó como estándar un conjunto de tres funciones hipotéticas de ajuste de color. Este conjunto de colores se denomina modelo XYZ, donde X , Y y Z

representan las cantidades de cada color necesarias para generar cualquier color del espectro electromagnético. Las funciones de ajuste de color están estructuradas de modo que todas las funciones sean positivas y que el valor de Y correspondiente a cada color represente la luminancia. Los valores X e Y normalizados, denominados x e y , se utilizan para situar las posiciones de todos los colores espectrales en el diagrama cromático CIE. Podemos utilizar el diagrama cromático para comparar gamas de colores correspondientes a diferentes modelos de color, para identificar colores complementarios y para determinar la frecuencia dominante y pureza de un color especificado.

Otros modelos de color basados en un conjunto de tres primarios son los modelos RGB, YIQ y CMY. Utilizamos el modelo RGB para describir los colores que se muestran en los monitores de vídeo. El modelo YIQ se utiliza para describir la señal de vídeo compuesta utilizada en las emisiones de televisión. Por su parte, el modelo CMY se emplea para describir el color en los dispositivos de obtención de copias impresas.

Las interfaces de usuario proporcionan a menudo modelos de color intuitivos, como los modelos HSV y HLS, para las selecciones de valores de color. Con estos modelos, especificamos un color como una mezcla de un tono seleccionado y ciertas cantidades de blanco y de negro. La adición de negro produce las distintas sombras de color, la adición de blanco produce las tintas y la adicción tanto de negro como de blanco produce las tonalidades.

La selección del color es un factor importante en el diseño de imágenes efectivas. Para evitar las combinaciones de color chillonas, podemos seleccionar colores adyacentes en una imagen que no difiera grandemente en cuanto a su frecuencia dominante. Asimismo, podemos seleccionar las combinaciones de color extrayéndolas de un pequeño subespacio de un cierto modelo de color. Como regla general, un pequeño número de combinaciones de color formadas por tintas y sombras, en lugar de por tonos puros, da como resultado imágenes en color más armoniosas.

REFERENCIAS

Puede encontrar un análisis detallado de la ciencia del color en Wyszecki y Stiles (1982). Los modelos de color y las técnicas de visualización de colores se tratan en Smith (1978), Heckbert (1982), Durrett (1987), Schwartz, Cowan y Beatty (1987), Hall (1989) y Travis (1991). Puede encontrar algoritmos para diversas aplicaciones del color en Glassner (1990), Arvo (1991), Kirk (1992), Heckbert (1994) y Paeth (1995). Para obtener información adicional sobre el sistema visual humano y nuestra percepción de la luz y el color, consulte Glassner (1995).

EJERCICIOS

- 12.1 Calcule las expresiones para convertir los parámetros de color RGB en valores HSV.
- 12.2 Calcule las expresiones para convertir valores de color HSV en valores RGB.
- 12.3 Diseñe un procedimiento interactivo que permita seleccionar parámetros de color HSV a partir de un menú visualizado; entonces, convierta los valores HSV en valores RGB para poder almacenarlos en un búfer de imagen.
- 12.4 Escriba un programa para seleccionar colores utilizando un conjunto de tres deslizadores con los que seleccionar los valores de los parámetros de color HSV.
- 12.5 Modifique el programa del ejercicio anterior para mostrar los valores numéricos de las componentes RGB de cada color seleccionado.
- 12.6 Modifique el programa del ejercicio anterior para mostrar las componentes de color RGB y el color combinado en pequeñas ventanas de visualización.
- 12.7 Calcule las expresiones para convertir los valores de color RGB en parámetros de color HLS.
- 12.8 Calcule las expresiones para convertir valores de color HLS en valores RGB.

- 12.9 Escriba un programa que produzca un conjunto de colores linealmente interpolados a partir de dos posiciones especificadas en el espacio RGB.
- 12.10 Escriba una rutina interactiva para seleccionar valores de color dentro de un subespacio especificado del espacio RGB.
- 12.11 Escriba un programa que produzca un conjunto de colores linealmente interpolados a partir de dos posiciones especificadas dentro del espacio HSV.
- 12.12 Escriba un programa que genere un conjunto de colores linealmente interpolados entre de dos posiciones especificadas del espacio HLS.
- 12.13 Escriba un programa para mostrar dos rectángulos de color RGB adyacentes. Rellene un rectángulo con un conjunto de puntos de color RGB aleatoriamente seleccionados y rellene el otro rectángulo con un conjunto de puntos de color seleccionados de entre un pequeño subespacio RGB. Experimente con diferentes selecciones aleatorias y diferentes subespacios para comparar los dos patrones de color.
- 12.14 Muestre los dos rectángulos de color del ejercicio anterior utilizando selecciones de color del espacio HSV o del espacio HLS.