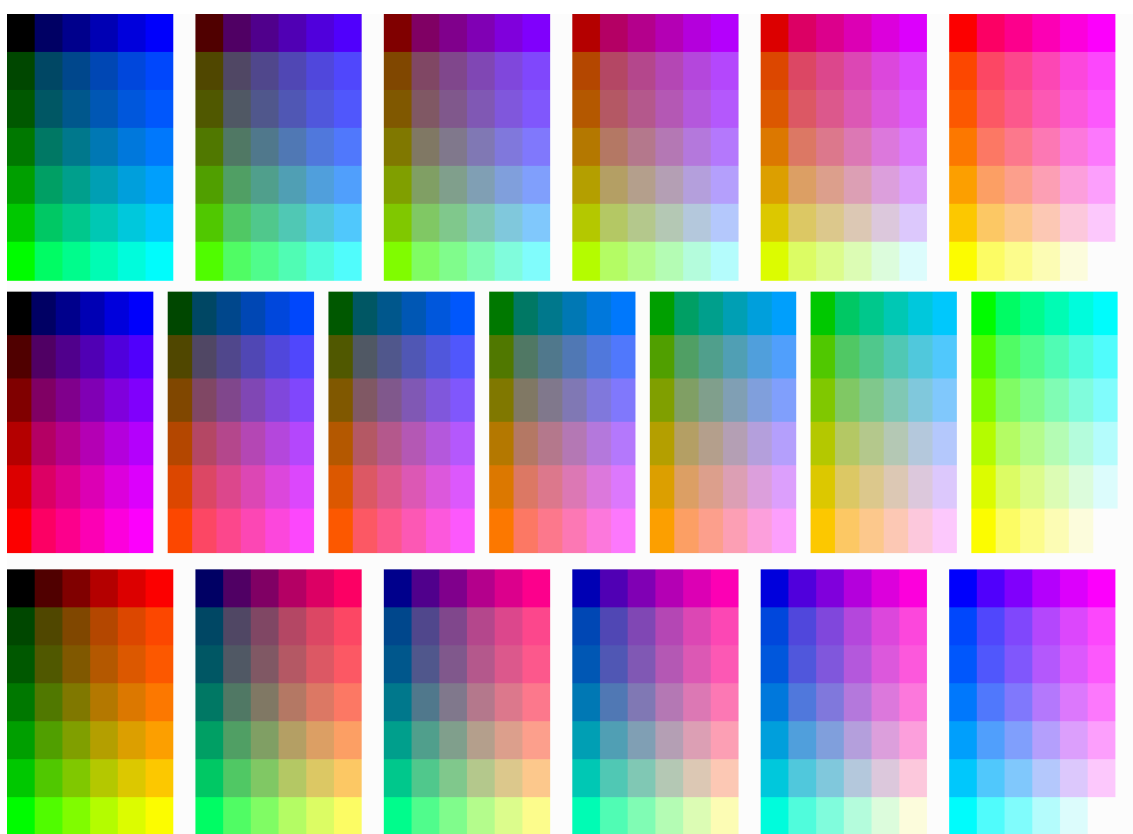


# 5

## El Color en Computación Gráfica



## 5.1 Introducción

El descenso en el costo de los monitores determina que en la actualidad prácticamente en todas las aplicaciones de Computación Gráfica se utiliza intensivamente el color, como medio de representación (por ejemplo, asociar una escala de colores con temperaturas o altitudes), con fines “cosméticos”, para mejorar la apariencia y legibilidad de una interfase gráfica, o para dar realismo a la representación de objetos en una escena tridimensional sintética. El color es un elemento indispensable en las aplicaciones en las que se busca una representación con realismo, porque la simulación de los fenómenos ópticos que ocurren en los objetos reales (reflexión, refracción, etc.) se realiza en forma adecuada a través de una ecuación de iluminación (ver Capítulo 7). Dicha ecuación se basa implícitamente en un modelo de color, cromático o monocromático (escala de grises).

El tema del color es rico y complejo, involucrando conceptos de física, fisiología y psicología, además de los aspectos computacionales que son de nuestro interés. En este Capítulo dedicaremos las primeras Secciones a presentar los elementos fundamentales de la teoría del color, para luego introducirnos en los espacios cromáticos, es decir, espacios que permiten una representación sistemática de los colores, y por último a la representación del color en las tarjetas gráficas.

## 5.2 Aspectos Físicos del Color

El color es una sensación fisiológica producida por la acción de ondas electromagnéticas específicas en los receptores nerviosos de la retina. Es decir, su origen primario es en una distribución de energía electromagnética en el espectro visible. Sin embargo, es una magnitud relativa, dado que dicho espectro en general no depende de la radiación lumínica propia de los objetos. En general el color de un objeto no depende sólo de éste, sino también de las fuentes de luz que lo iluminan y de otras consideraciones que veremos en detalle en el Capítulo 7:

Iluminantes  $\longrightarrow$  Objetos  $\longrightarrow$  Observador

El observador, al mismo tiempo, impone sus características propias, dado que el estímulo producido por una misma distribución espectral de energía no siempre produce la misma percepción visual:

Estímulo  $\rightarrow$  Sensación  $\rightarrow$  Percepción

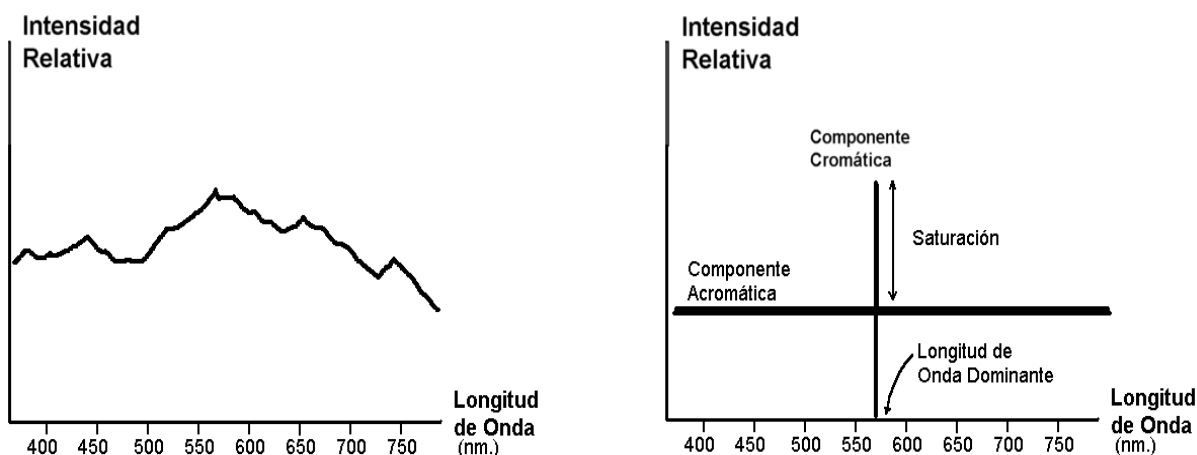
Así, pese a estar originado en una magnitud física objetiva (la longitud de onda de las radiaciones del estímulo) no es posible encontrar una definición intrínseca del color de un objeto, sino que todas las descripciones deben ser relativas a una condición ambiental y fisiológica dada. Una de las características menos problemáticas de comprender en el color es su componente acromática o *intensidad luminosa* (también llamada *luminancia* o luminosidad). La luz acromática es la producida, por ejemplo, en un televisor blanco y negro, en el cual cada punto visible tiene un único atributo (su luminosidad, variando entre 0 = negro y 1 = blanco). Un televisor tiene un continuo de niveles entre 0 y 1, mientras que un monitor de computadora tiene una cantidad limitada (por ejemplo, 2, 16, 256) y una impresora de puntos o laser corriente tiene solo 2.

¿Cuántos atributos debe tener un sistema de reproducción de color cromático? La evidencia experimental al respecto indica que con tres atributos es suficiente. Esta característica se expresa en la *primera ley de Grassman*: cualquier color puede representarse como combinación de tres atributos primarios. Estos atributos pueden ser distintos (como distintas bases en un espacio vectorial), siendo los más comunes en computación gráfica los tres niveles de los colores primarios rojo, verde y azul, o *espacio cromático* RGB. En las Artes Plásticas se asumen otros colores primarios y también otros nombres al referirse a los primarios.

En algunas ramas de la física (así como en TV color), sin embargo, los atributos considerados son la luminosidad, la cromaticidad y la saturación. La cromaticidad distingue la característica de “color” propiamente dicho en una determinada distribución (a qué “color puro” se parece el color), mientras que la saturación se refiere a la pureza del color. En términos físicos la luminosidad es análoga a la amplitud de energía de la onda luminosa (o a la cantidad de fotones) por unidad de tiempo. La cromaticidad es análoga a la longitud de onda dominante y la saturación a la relación entre la energía de la longitud de onda dominante y la energía total.

### 5.3 Aspectos Fisiológicos del Color

Muchas posibles distribuciones espectrales dan origen a sensaciones cromáticas idénticas. Si bien por un lado es posible que estímulos idénticos produzcan percepciones distintas en algunos casos, es también posible observar que estímulos radicalmente diferentes producen sistemáticamente la misma percepción. Esta característica del aparato visual humano se denomina *metamerismo*, y es la que en definitiva determina que las sensaciones cromáticas puedan definirse con solo tres parámetros.



**Figura 5.1** Distribución espectral de un estímulo cromático y su equivalente metamérico.

Dada una distribución espectral de energía lumínica en las frecuencias visibles, el sistema visual humano detecta la energía total (luminosidad), la longitud de onda dominante (crominancia) y la relación entre la energía de esta última con la energía total (saturación), y en base a esto se elabora la sensación visual. Si el estímulo visual no tiene una longitud de onda dominante, entonces se percibe como luz acromática (blanca). De esa forma, es posible decir que cualquier estímulo luminoso tiene una componente acromática y una componente cromática pura. La crominancia es, entonces, la longitud de onda de la componente cromática del estímulo (excepto en algunos casos que veremos más adelante), y la saturación es la relación de energías entre la componente cromática y la acromática (ver Figura 5.1).

Los aspectos físicos del color mencionados más arriba y los aspectos fisiológicos humanos se relacionan a través de la teoría triestímulo del color. Según esta teoría, existen en la retina tres tipos de receptores en los conos (células nerviosas sensibles a la luz) con sensibilidades centradas a los 650nm. (rojo), 530nm. (verde) y 425nm. (azul) respectivamente, y cuya sensibilidad relativa responde a las curvas de la Figura 5.2, obtenidas experimentalmente.

La suma de las sensibilidades de cada receptor corresponde a la curva de sensibilidad total del aparato visual humano (ver Figura 5.3). Lo importante del caso es que cualquier estímulo cromático puede sintetizarse con una combinación de iluminantes rojo, verde, y azul (llamados por ende los colores iluminantes primarios).

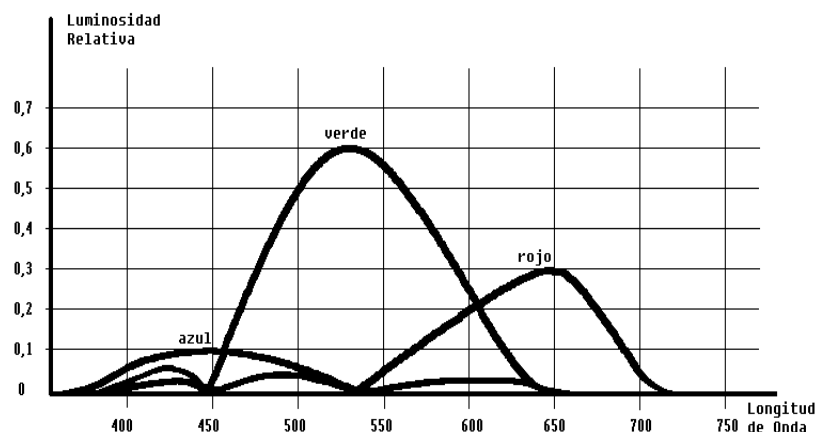


Figura 5.2 Sensibilidad relativa de los receptores de la retina.

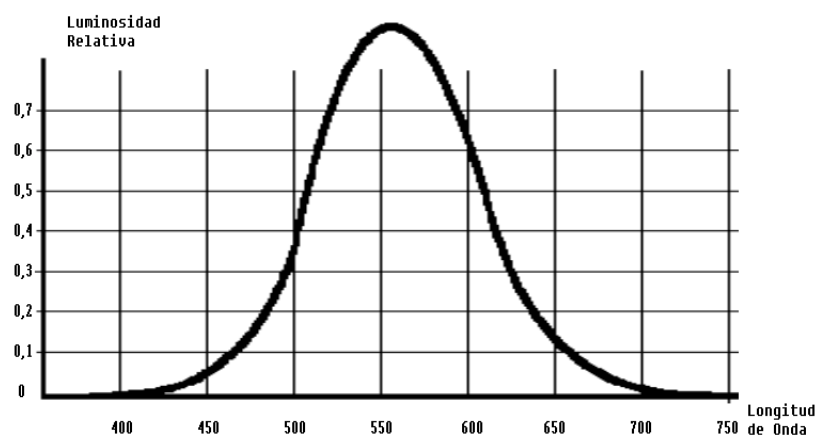
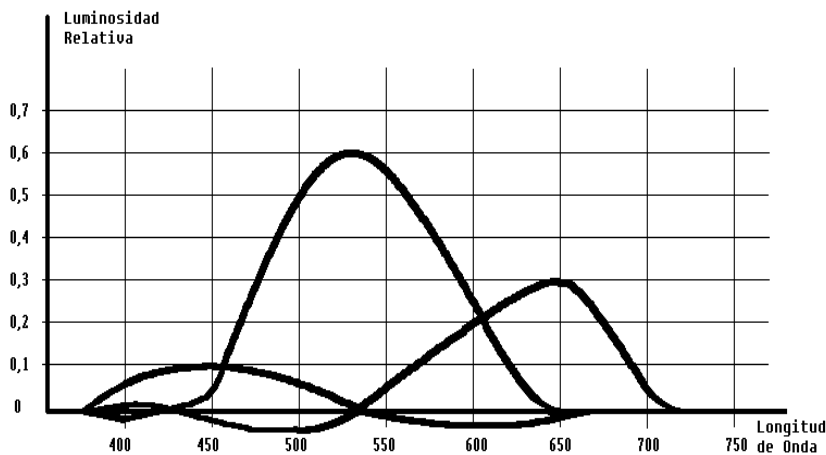


Figura 5.3 Sensibilidad espectral del aparato visual humano.

Este modelo de síntesis cromática falla, sin embargo, en el caso de los colores complementarios a los primarios (cyan, magenta, y amarillo, respectivamente), cuando estos últimos se encuentran muy saturados. Esto quiere decir que un objeto de color magenta muy puro produce un estímulo cromático que no puede sintetizarse exactamente con luz roja y azul; con dichos iluminantes solamente se podrá producir un estímulo cromático de la misma longitud de onda dominante, pero con saturación menor. Sin embargo, si el objeto magenta es iluminado con luz levemente saturada con verde, entonces la síntesis



**Figura 5.4** Refinamiento de las curvas de sensibilidad relativa, teniendo en cuenta la respuesta “negativa” de los receptores.

puede efectuarse. Esto es equivalente a *restar* luz verde a la mezcla. Del mismo modo un amarillo saturado podrá sintetizarse sumando rojo y verde, y restando una pequeña proporción de azul. Evidentemente la resta de luces no puede realizarse con los dispositivos actuales (televisores o monitores), por lo que algunos colores muy saturados de la gama de los complementarios a los iluminantes primarios no pueden reproducirse con total fidelidad con dichos dispositivos. Experimentalmente, sin embargo, esta deficiencia demuestra ser de una importancia menor.

Conociendo la proporción de sumas y restas necesarias para sintetizar cualquier color, (según la teoría triestímulo) la respuesta de los receptores especializados en la retina contiene una parte *negativa* cuando la longitud de onda del estímulo corresponde aproximadamente a la longitud de onda de su color complementario. Por ejemplo, los receptores del rojo tienen un máximo a los 650nm. y un máximo negativo aproximadamente a los 470nm. (correspondiente al color denominado *cyan*). Esto puede deberse a que los receptores específicos realicen una asimilación anabólica en un caso y catabólica en el otro. Las curvas que intentan reproducir este fenómeno se muestran en la Figura 5.4 y fueron obtenidas por medio del análisis de la sensibilidad de sujetos videntes normales y con problemas de percepción visual en uno o más de los receptores (daltónicos y otros cinco casos posibles).

## 5.4 El Diagrama CIEXY de Cromaticidad

Es posible suponer la existencia de una fuente luminosa cuya densidad de energía corresponda a las curvas de sensibilidad de cada uno de los receptores. Por ejemplo, una fuente luminosa que radie energía con un máximo alrededor de los 650nm. y con un máximo negativo alrededor de los 470nm. coincide con la curva de sensibilidad del receptor para el rojo. Dicho color se denomina *iluminante X*. Del mismo modo las curvas de los receptores verde y azul se corresponden con los iluminantes Y, y Z, respectivamente. Es importante tener en cuenta, sin embargo, que estos colores no se pueden crear físicamente, y por lo tanto son “invisibles”. Podemos sin embargo pensar en ellos como “primarios super-saturados”.

Los iluminantes X, Y y Z son tales que cada uno posee una función de distribución de densidad de energía relativa en función de la longitud de onda. Si suponemos el plano de los estímulos visuales con luminosidad constante  $X+Y+Z=1$ , obtenemos en el mismo todos los estímulos cromáticos posibles a una luminosidad total dada. Esto es, de los tres parámetros podemos variar dos: la cromaticidad y la saturación. La combinación de ambos se denomina *cromaticidad*. Es posible, entonces, construir diagramas planos con todas las cromaticidades posibles, denominados precisamente *diagramas de cromaticidad*. Fueron estandarizados en 1930 por la CIE (Comision International de l'Eclariage) y existen varios tipos, siendo el más común el XY, que representa el plano  $X+Y+Z=1$ , aunque el XZ tambien es utilizado.

Podemos observar la forma que asume el diagrama de cromaticidad CIEXY en la Figura 5.5. El interior de la zona demarcada contiene todas las cromaticidades visibles por el ojo humano. Los colores “puros” o con máxima saturación, que corresponde a una única longitud de onda, se ubican en la parte curva de la frontera. La parte recta inferior de la misma corresponde a la línea del magenta saturado (que no corresponden a una longitud de onda única). A medida que nos acercamos al centro los colores se vuelven menos saturados.

En la Figura 5.6 podemos ver otros detalles del diagrama. En la frontera del mismo está marcada la longitud de onda asociada a un estímulo monocromático. Así, por ejemplo, el punto marcado con 580nm. corresponde a una radiación amarilla saturada. También está marcada en el interior la curva de cromaticidad de la radiación de un cuerpo negro en función de su temperatura (denominada también *curva de la temperatura cromática*). Dicha función, conocida como ley de Planck, predice que un objeto radia fotones cuya distribución espectral es función de la temperatura. Esta ley es la que permite, entre otras cosas, determinar la temperatura en la superficie de las estrellas por la distribución cromática de la luz que radian.

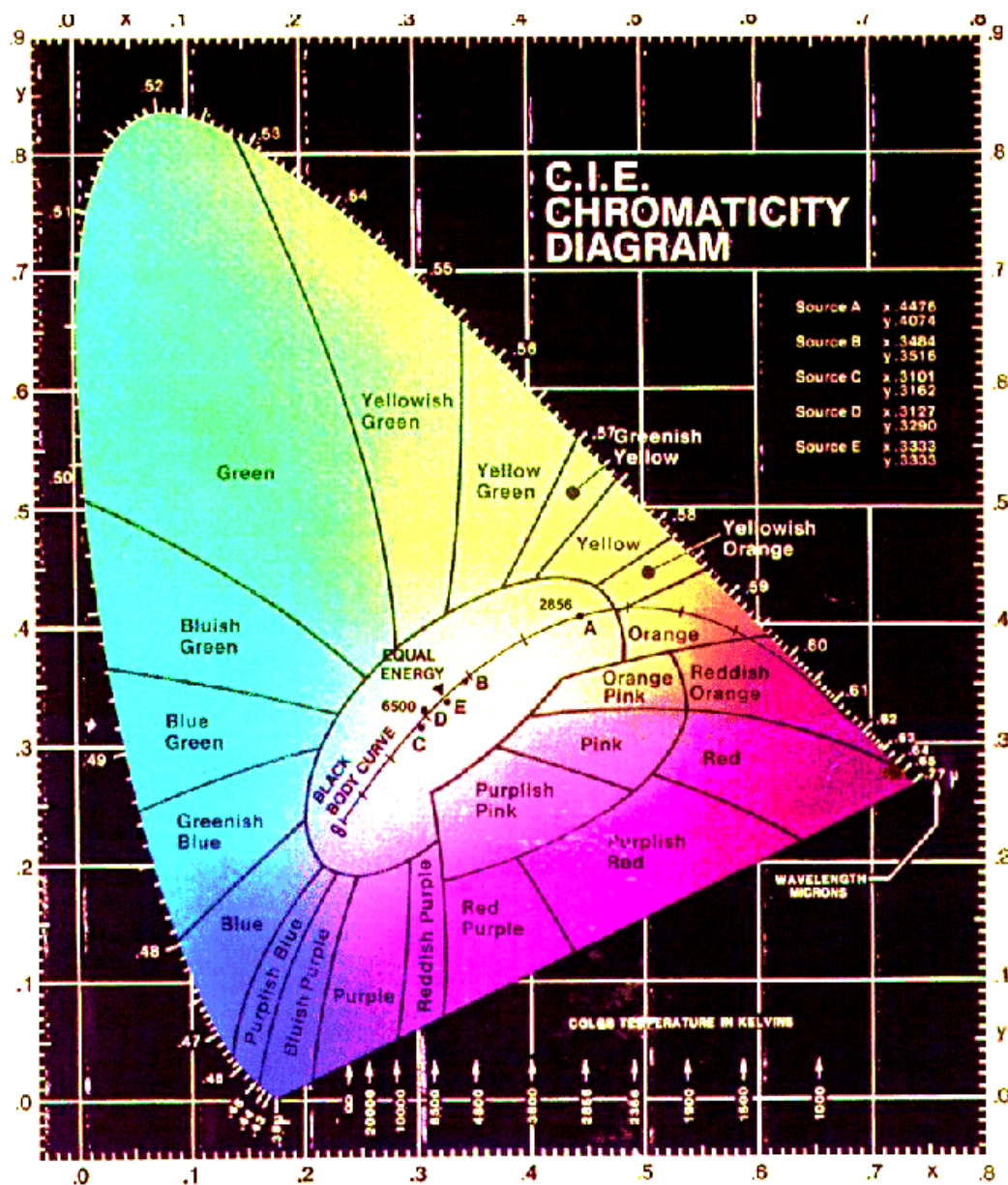


Figura 5.5 Diagrama CIEXY de cromaticidad.

Por ejemplo, alrededor de los 1000K el color de la radiación es un rojo intenso. Luego pasa por el anaranjado (temperatura cromática de una vela) y el amarillo (temperatura de las lámparas), cada vez con menos saturación, hasta llegar a un “blanco” aproximado a los 6500K. A mayores temperaturas el color cromático se va tornando azulado, hasta

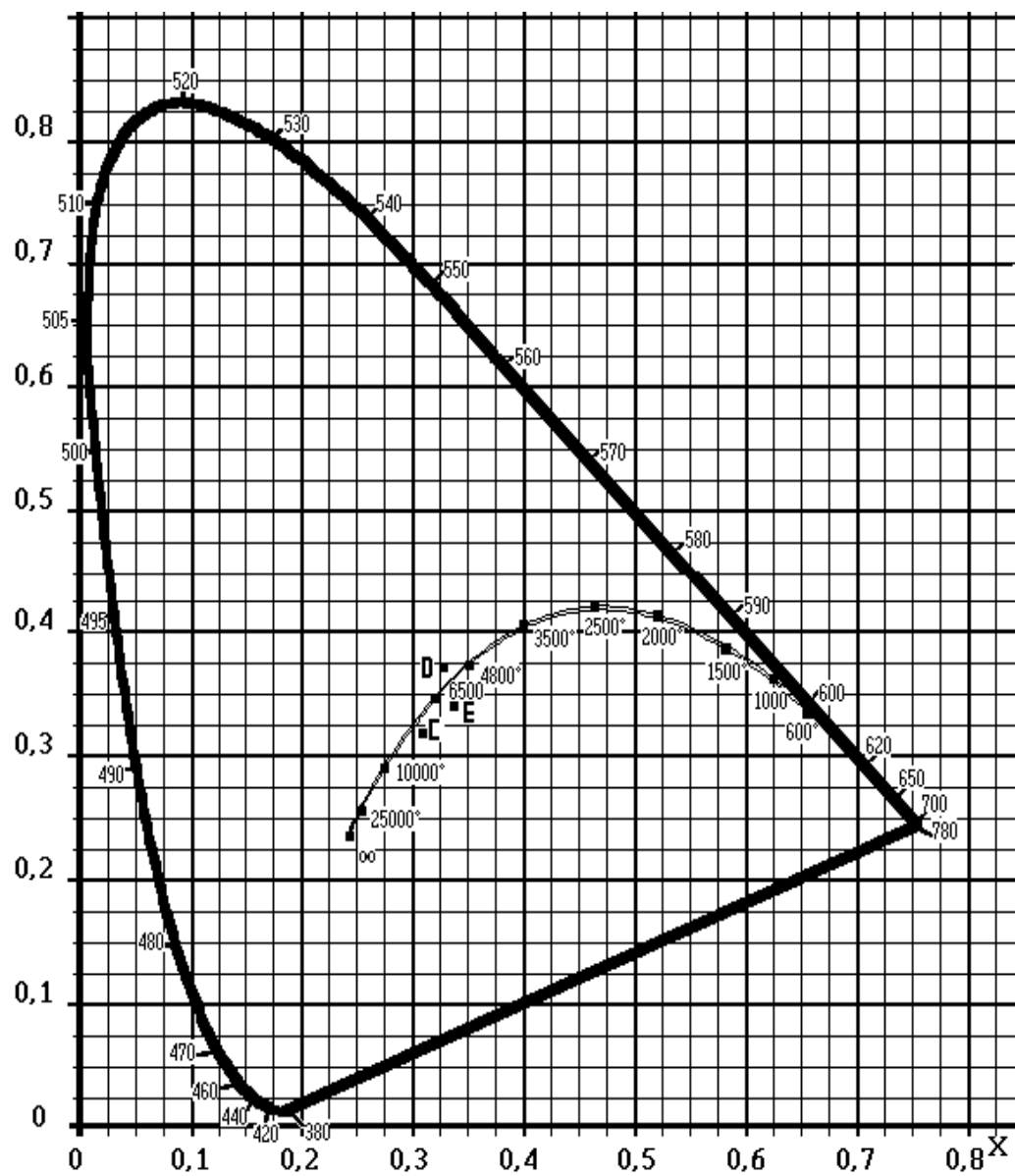


Figura 5.6 Escalas útiles en el diagrama CIEXY de cromaticidad.

llegar al color de la radiación de un cuerpo a “temperatura infinita”, la cual es una radiación de color azul verdoso poco saturado.

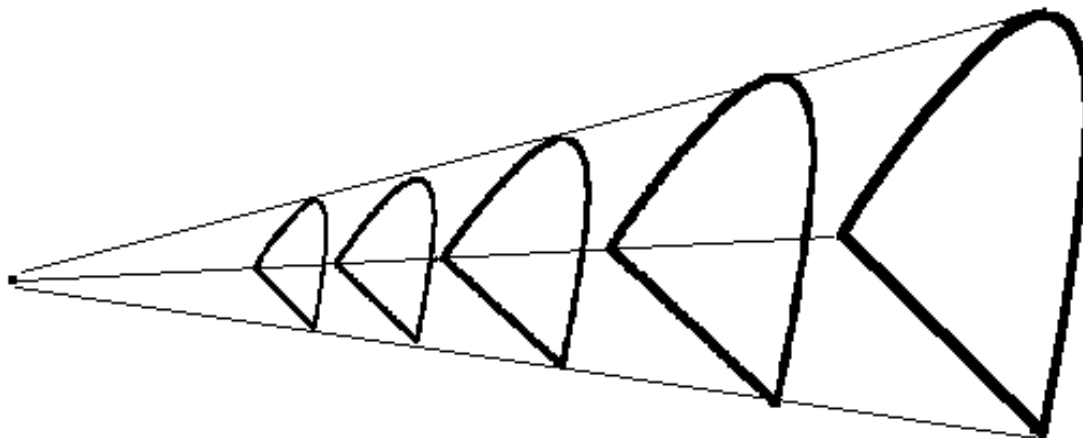


Figura 5.7 Espacio cromático LXY.

En el punto  $X=Y=Z=\frac{1}{3}$  se encuentra el denominado *iluminante E*, con igual energía a toda longitud de onda. Cerca del punto E se encuentra el iluminante D que corresponde aproximadamente al color de la luz solar directa al mediodía, es decir, a la radiación de un cuerpo negro a 6500K –la temperatura cromática del sol– filtrada por la atmósfera. Por debajo de ambos se encuentra el iluminante C, que corresponde al color de la luz diurna (luz solar directa más la reflejada por la atmósfera).

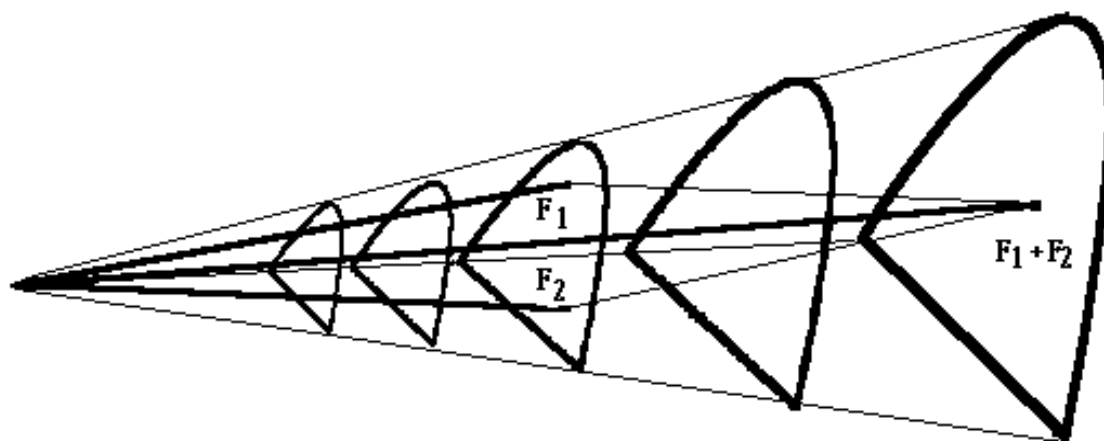
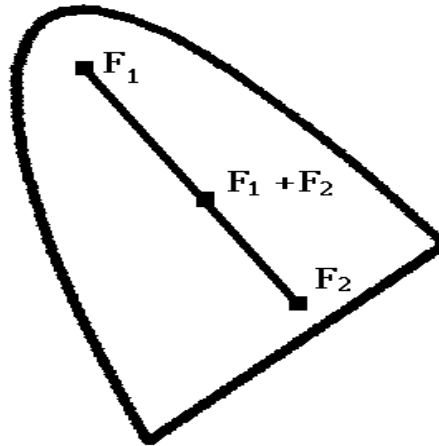


Figura 5.8 Resultante de la suma de dos fuentes luminosas.

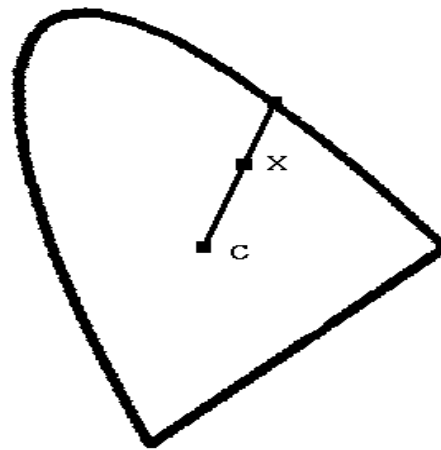


**Figura 5.9** Proyección de la resultante de la suma de dos fuentes luminosas en el plano  $X+Y+Z=1$ .

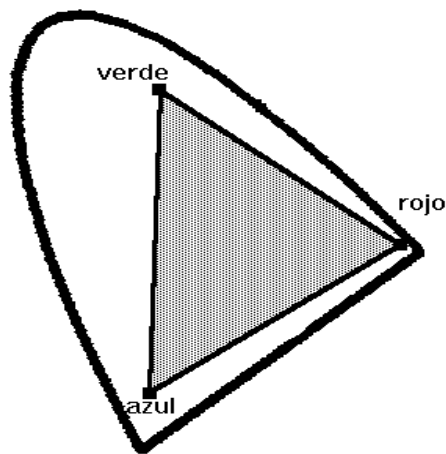
Cada punto  $X, Y$  que yace dentro del área visible del diagrama representa una cromaticidad única y diferente de las demás. La segunda ley de Grassman expresa que *variar escalarmente un estímulo cromático no afecta su cromaticidad*. Esto es: si aumentamos o disminuimos la intensidad de un estímulo, la cromaticidad del mismo, es decir, sus coordenadas en el diagrama  $XY$  no varían. Esto equivale a decir que la intensidad luminosa  $L$  es “perpendicular” al diagrama  $CIEXY$  y que por lo tanto todo estímulo cromático puede representarse en un espacio  $LXY$  (ver Figura 5.7).

La tercera ley de Grassman nos permite establecer la cromaticidad resultante de la suma de dos fuentes luminosas de cromaticidad conocida. En efecto, sean  $F_1$  y  $F_2$  dos fuentes luminosas con sus respectivas intensidades y cromaticidades. El estímulo resultante  $F_1 + F_2$  se puede encontrar por medio de su suma vectorial (ver Figura 5.8). Dicha suma vectorial proyectada sobre el plano  $X+Y+Z=1$  representa la cromaticidad de la suma de ambas fuentes. Esto quiere decir que la cromaticidad resultante yacerá sobre la recta que una a las cromaticidades de los distintos componentes de la suma, estando más cerca de uno o de otro según sean las intensidades respectivas (ver Figura 5.9).

Esto equivale a *interpolar* cromaticidades. La *extrapolación* de colores es también factible. Supongamos que hemos estimado la cromaticidad de un estímulo en el punto  $X$  y que lo suponemos iluminado por el iluminante  $C$  (al cual consideramos entonces como luz blanca). Entonces podemos estimar la longitud de onda dominante del color  $X$  trazando una recta desde  $C$ , pasando por  $X$  y prolongándola hasta intersectar la frontera del diagrama (ver Figura 5.10). La razón de la distancia de  $X$  a  $C$  con respecto



**Figura 5.10** Estimación de la longitud de onda dominante (crominancia) y de la saturación de un estímulo  $X$  dado.



**Figura 5.11** Gama cromática de un monitor típico.

a la longitud total del segmento es también una buena estimación de la saturación del color  $X$ . Es importante destacar que esta determinación depende de la condición de iluminación en que ocurre el estímulo, es decir, si el iluminante tiene una temperatura cromática diferente, entonces la percepción de colores complementarios se modifica.

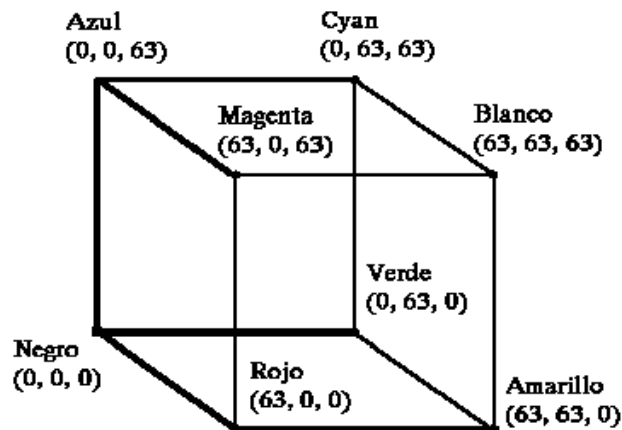
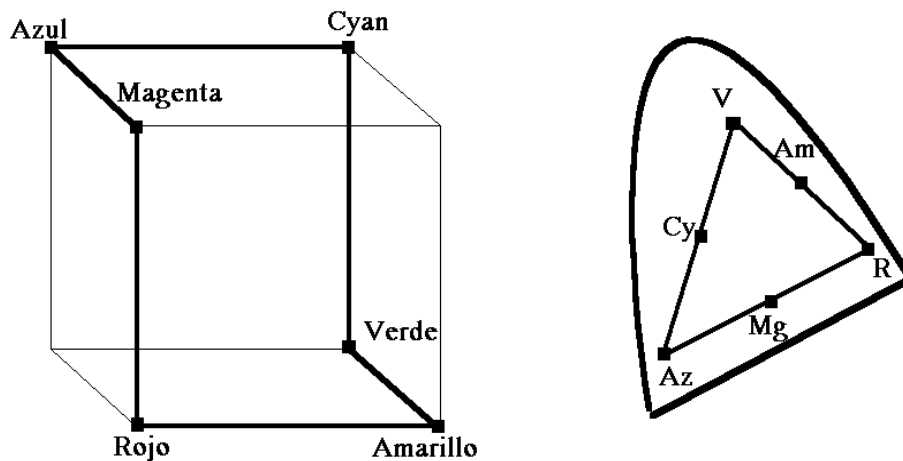


Figura 5.12 Espacio cromático RGB.

La representación de gamas cromáticas es también sencilla en el diagrama CIEXY. La *gama cromática* es el conjunto de todas las cromaticidades representables por un método de reproducción. Por ejemplo, los monitores o televisores tienen tres iluminantes primarios que corresponden a los colores del fósforo de los tres haces electrónicos. La gama cromática de tales dispositivos es, por tanto, el interior del triángulo determinado por los mismos. Un monitor típico tiene fósforos que producen luz saturada a 650nm., 530nm., y 425nm. La gama cromática resultante se muestra en la Figura 5.11. Este procedimiento se puede extender a casos con más colores primarios, aunque al trabajar con tintas la gama cromática resultante puede no ser convexa, debido a que no se cumple la linealidad de la combinación de colores.

## 5.5 Espacios Cromáticos

Los colores primarios de los monitores son entonces el rojo ( $C=650\text{nm.}; Y=0.3$ ), el verde ( $C=530\text{nm.}; Y=0.59$ ), y el azul ( $C=425\text{nm.}; Y=0.11$ ). La gama cromática que se puede obtener con dichos primarios incluye todos los colores visibles excepto algunos amarillos, cian y magentas muy saturados. En las tarjetas gráficas, cada pixel tiene asignada memoria para representar los tres primarios con una cantidad fija de niveles posibles, por ejemplo 64. De esta forma podemos obtener directamente la representación de cualquier color como suma de rojo, verde y azul, en el denominado *espacio cromático RGB* (ver Figura 5.12).



**Figura 5.13** Representación de los colores saturados del espacio RGB en el espacio LXY.

Supongamos que un dispositivo tiene 64 niveles para cada primario (de 0 a 63). La gama representable incluye a  $64^3 = 256K$  colores posibles. Los colores neutros (grises) se ubican en la diagonal entre el blanco y el negro, correspondiendo a valores de la forma  $(i, i, i)$ . Los colores saturados se ubican en la frontera mostrada en la Figura 5.13. Los restantes colores son no saturados, y asumen alguna de las seis permutaciones de la forma  $(i, i + a, i + a + b)$ , donde  $0 \leq i \leq 63$ ,  $0 \leq a \leq 63 - i$  y  $0 \leq b \leq 63 - i - a$ . Por lo tanto, en el espacio RGB, los colores pueden descomponerse en un gris  $(i, i, i)$  sumado a un color saturado  $(0, a, a + b)$ .

El espacio cromático RGB es adecuado para su representación en el hardware, pero el usuario, dado un color  $(i, j, k)$ , no puede conocer intuitivamente el color resultante, su cromaticidad, luminancia y saturación. Tampoco es directo cuál es el color complementario, cuál es el color saturado de la cromaticidad, etc.

Una representación similar a la RGB se utiliza en las impresoras color, donde los primarios son los complementarios a RGB, es decir CMY. El pasaje de RGB a CMY es sencillo: R es K-C, G es K-M y B es K-Y y viceversa, donde K es el negro. Esta conversión no se utiliza en la práctica por dos motivos. Primero, la gama de grises no es estable con respecto a los pigmentos. Esto quiere decir que a distintas intensidades dominan distintos pigmentos. Segundo, la mezcla de pigmentos no tiene las propiedades de la mezcla de luces. Esto quiere decir que la gama cromática puede no ser convexa, el “blanco” en el monitor puede no coincidir con el color del papel. Por ello las impresoras

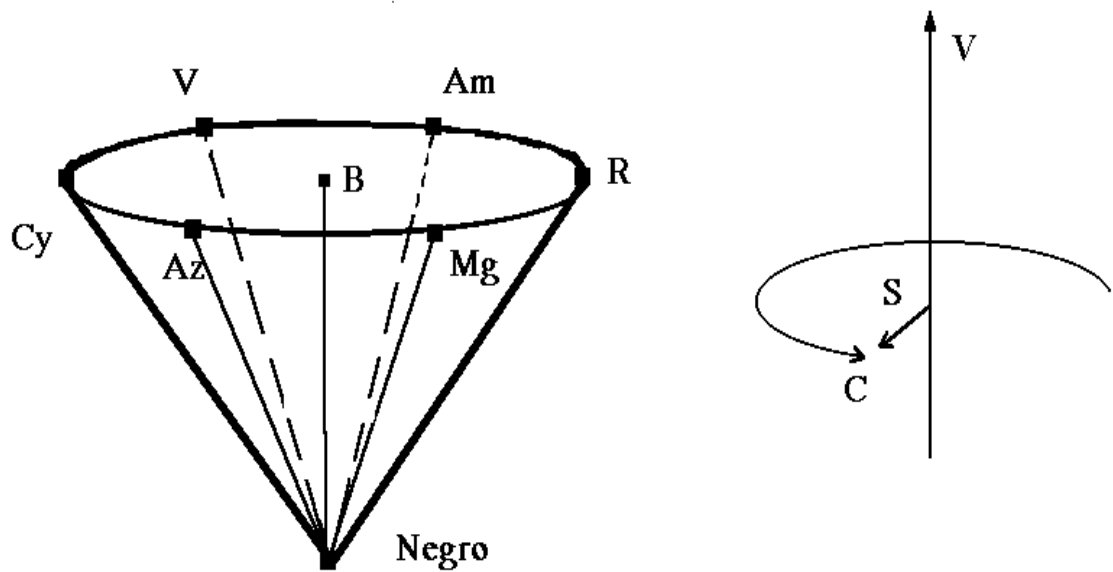


Figura 5.14 Espacio cromático CSV.

utilizan pigmento negro para estabilizar la combinación de pigmentos, denominándose espacio CYMK al modelo de color resultante.

Dado que la estructuración psicológica de los estímulos cromáticos parece realizarse en función de la crominancia, luminancia y saturación, resulta natural utilizar a dichas dimensiones para representarlos. Esto da origen al sistema CSV. C (de crominancia) es un ángulo que generalmente está medido en una escala de 0 a 360 grados, con origen en el rojo y medido en sentido antihorario. Por ejemplo un verde tiene crominancia 120 grados. El color complementario de C tiene crominancia  $C + 180$  grados. S (de saturación) es una magnitud de 0 a 1, donde 0 representa un color neutro (un gris) y 1 representa un color saturado (ver Figura 5.14). V (de “valor” o luminancia equivalente) es una magnitud de 0 a 1, donde 0 es negro en cualquier condición de los otros parámetros, y 1 es la máxima intensidad.

Por ejemplo, el verde que en RGB se representa  $(0, n - 1, 0)$ , en se representa  $(120, 1, 1)$ . De esta forma, todos los colores representables se ubican en un cono, cuyo vértice inferior es el negro y el círculo superior contiene todas las cromaticidades. El eje del cono es la escala de grises.

Para pasar del modelo CSV al RGB es necesario aplicar un algoritmo sencillo que aprovecha las simetrías en dicho espacio. Si el color en CSV tiene saturación cero, entonces devuelve el valor equivalente de L en cada uno de los primarios RGB (es decir, un gris). Si el color tiene saturación mayor que cero, entonces, como vimos, es posible descomponerlo en un primario principal, uno secundario y uno opuesto. La determinación de cuál de los primarios RGB cumple cada uno de esos roles se determina según el “sexto” del círculo de crominancias en que está el color. Así, una crominancia de 70 grados, por ejemplo, tiene al verde como principal, al rojo como secundario y al azul como opuesto, etc. En total son seis casos.

La intensidad del primario principal es el valor equivalente de V, mientras que la intensidad del color opuesto es dicho valor multiplicado por  $(1-S)$ . Es decir que si la saturación es máxima, la intensidad del primario opuesto es cero. La intensidad del secundario depende también de lo cerca o lejos que el color esté del “sexto” del círculo correspondiente. Así, la intensidad del rojo para una crominancia de 70 grados es mayor que para una crominancia de 110 grados.

El procedimiento mostrado en la Figura 5.15 efectúa dichos cálculos, recibiendo como entrada los valores de  $c$  como un ángulo de 0 a 360 grados, y de  $v$  y  $s$  como escalares entre 0 y 1. El pasaje de los valores  $r$ ,  $g$ ,  $b$  de salida se hace por referencia para facilitar el uso del procedimiento, aunque lo correcto hubiera sido definir tipos de datos para color en CSV y en RGB y escribir el algoritmo como función.

Es posible encontrar el procedimiento que transforma un color de RGB a CSV por medio de la misma relación. El valor es la transformación a  $[0,1]$  de la intensidad del primario en RGB más intenso (el principal). La saturación es el cociente entre el menos intenso (el opuesto) y el más intenso, y la crominancia está determinada por el principal y el secundario. Por ejemplo, si el principal es azul y el secundario es rojo, entonces el ángulo base de la crominancia es 240 grados. A medida que el rojo es más importante, se suma a dicha base un ángulo de 0 a 60 grados.

## 5.6 Representación de Color en Computación Gráfica

El color en las tarjetas gráficas, como vimos, se representa por medio del espacio cromático RGB (ver la Sección 2.1). Esto significa que el color de cada pixel se representa por medio de una terna de valores de las componentes en rojo, verde y azul, respectivamente, que tiene dicho color. Si cada pixel tiene asignada memoria para sus componentes RGB, se trata del modo *true color*. En cambio, si el pixel guarda un

```

procedure csvrgb(c,s,v:real; var r,g,b:integer);
  var  x,y,z,i,vv:integer;
        f:real;

begin
  l:=255*l;                                     % luminancia a [0..255]
  if s=0 then begin                             % color no saturado
    r:= g:= b:= trunc(v);
  end
  else begin
    i:=trunc(c/60);                             % determinar el sexto
    f:=c/60-i;                                  % cerca de comienzo o final
    x:=trunc(v*(1-(s*f)));                       % comienzo
    y:=trunc(v*(1-(s*(1-f))));                   % final
    z:=trunc(v*(1-s));                           % opuesto
    vv:=trunc(v);                                % principal
    case i of
      0: begin r:=vv; g:=y; b:=z; end;
      1: begin r:=x; g:=vv; b:=z; end;
      2: begin r:=z; g:=vv; b:=y; end;
      3: begin r:=z; g:=x; b:=vv; end;
      4: begin r:=y; g:=z; b:=vv; end;
      5: begin r:=vv; g:=z; b:=x; end;
    end;
  end;
end;

```

**Figura 5.15** Transformación del espacio CSV a RGB.

índice a una entrada en una tabla de colores donde está definido el color del cual está pintado el pixel, estamos en modos gráficos más económicos.

En dichos modos, el seteo del índice del color de un pixel se efectúa por medio de la sentencia `putpixel(x,y,c)`, mientras que asignar una entrada en la tabla de colores se realiza por medio de la sentencia `setrgbpalette(c,r,g,b)`. En dicho modelo se utiliza la sentencia `putpixel(x,y,c)` para acceder al buffer de pantalla y setear el pixel en la posición `x`, `y` con el índice de color `c`, con `x`, `y`, `c` de tipo `word`. En los modos gráficos VGA y super VGA, los parámetros `r`, `g`, `b` son de tipo `word`, pero se truncan los dos bit menos significativos, dado que el rango efectivo de cada componente es de

0 a 63. Por lo tanto es conveniente utilizar una aritmética dentro de dicho rango para representar los colores, y multiplicar por 4 en el momento de la llamada.

Los modos gráficos VGA y SVGA permiten definir en general 256 colores simultáneos (la “paleta” gráfica) de entre 256K colores posibles. Estas posibilidades pueden ser, en algunos casos, poco satisfactorias, no solo porque la paleta sea limitada, sino porque los colores son definibles con poca precisión en algunos casos. Si bien el ojo humano detecta aproximadamente 350.000 colores diferentes (y es capaz de distinguir aproximadamente 50.000 en forma simultánea), esta sensibilidad no es uniforme en todo el espacio cromático, sino que es mucho mayor en ciertas áreas (por ejemplo en el eje naranja-violeta) y mucho menor en otras (por ejemplo en el eje magenta-verde).

Esto quiere decir que el ojo detecta a simple vista una gran diferencia entre los colores (63,63,0) y (63,63,1) o (63,62,0), por ejemplo, pero no detecta diferencias entre (0,63,0) y (0,62,0) o (0,62,1) y probablemente tampoco con (5,63,5)! De los 256K colores definibles, miles de ellos son idénticamente percibidos, mientras que otros no se representan con una fidelidad adecuada. En otras palabras, el espacio RGB es una forma muy ineficiente de representar colores porque la información está codificada de una manera muy “despareja” con respecto a la capacidad del ojo.

En los modos gráficos *true color* el problema se soluciona con un costo muy grande (3 bytes por pixel es mucho más de lo necesario). Sin embargo, hay personas con visión cromática muy sensible que siguen encontrando diferencias de matiz entre colores contiguos en la gama del amarillo-anaranjado y del violáceo. Probablemente la mejor solución hubiera sido contar con tecnología CSV en las tarjetas gráficas, dado que la conversión al RGB del monitor se puede hacer dentro de la controladora de video.

## 5.7 Paletas Estáticas y Dinámicas

En muchas circunstancias la capacidad de manejo de colores en las tarjetas gráficas está restringida a una paleta de 256 colores simultáneos. Esto puede deberse a varios factores. Por ejemplo, puede ser necesaria la mayor resolución posible, y sin una cantidad de memoria adecuada para el *frame buffer* puede no ser suficiente para soportar el modelo *true color*. Puede ocurrir también por limitaciones tecnológicas (tarjetas o monitores obsoletos, falta de *drivers*, etc.). La limitación en la cantidad de colores simultáneos se sobrelleva, en general, con un esquema cromático que utiliza una paleta con los 256 colores más significativos de la imagen. Estos 256 colores son obtenidos durante la generación de la misma (generalmente con histogramas y técnicas de separación), por lo que las paletas se denominan *dinámicas*.

Sin embargo, en un sistema gráfico de propósito general el esquema dinámico de paletas puede ser inadecuado cuando se desea manejar dos o más imágenes desarrolladas independientemente, porque cada una de ellas reclamará lo que considera que son los colores más adecuados. El sistema tiene que llegar a una solución de compromiso, sacrificando algunos de los colores de cada una de las imágenes. Esto produce como resultado un deterioro impredecible en la calidad gráfica. Al mismo tiempo, una paleta dinámica resulta inaceptable en aplicaciones interactivas, porque al modificar cualquier propiedad de la escena (el agregado de un nuevo objeto, los atributos de un objeto ya dibujado, las condiciones de iluminación, etc.) se requiere el recálculo de los histogramas de la escena completa, y el redibujado completo de la misma, lo cual insume un tiempo muy grande.

En las paletas *estáticas*, por su parte existe un esquema cromático predefinido. Es decir, se define de antemano un conjunto de colores adecuados para graficar cualquier escena, en cualquier condición de iluminación y bajo cualquier algoritmo. Los resultados gráficos tienden a ser de menor calidad. Sin embargo, la calidad de las imágenes, una vez graficadas, no se deteriora con el ulterior agregado de otras imágenes. Al mismo tiempo, la referencia al índice de color que corresponde a cada pixel puede calcularse a partir del color que debería corresponder al mismo. De esa forma, la imagen es graficada al mismo tiempo que es computada, sin un costo adicional debido al manejo de color.

Un esquema estático de color ubica el índice de color con el que corresponde colorear un pixel en función del color reclamado por el modelo de iluminación, y los colores más cercanos disponibles en la paleta, probablemente por medio de interpolación. En el Capítulo 7 estudiaremos cómo funcionan los modelos de iluminación. Supongamos ahora que para un punto  $p$  de cada cara en la escena se computan ecuaciones que determinan la componente del color para cada primario RGB. Cada pixel de cada cara reclamará un color determinado, es decir, una terna de reales  $(R(p), G(p), B(p))$ . Esta terna debe transformarse a una terna  $(R, G, B)$  dentro de la aritmética de la tarjeta gráfica. Al mismo tiempo, los valores de  $(R, G, B)$  deben estar asociados a uno de los índices de color disponibles.

Una forma de diseñar paletas estáticas proviene de las siguientes consideraciones. Normalmente las tarjetas representan la intensidad de cada primario con una precisión de 6 bit en una escala entera de 0 a 63, lo cual permite 256K combinaciones de colores. De dichos 256K colores, es necesario elegir los 256 más representativos para un uso general. Más aún, deben ser elegidos de manera tal que cualquier aplicación gráfica que reclama un color no existente en la paleta, pueda encontrar rápidamente el índice de un color perteneciente a la paleta que sea el más adecuado para reemplazarlo. Es necesario, entonces, elegir un subconjunto de las 64 intensidades permitidas para cada primario, de modo tal que el producto de la cantidad de elementos en cada conjunto sea menor o

```

procedure inicializar_paleta();
var rojo : array[0..5] of integer = (0, 20, 32, 45, 55, 63);
    verde : array[0..6] of integer = (0, 15, 22, 30, 40, 50, 63);
    azul : array[0..5] of integer = (0, 25, 35, 45, 55, 63);
    r,g,b : integer;
begin
    for r := 0 to 5 do
        for g := 0 to 6 do
            for b := 0 to 5 do
                setrgbpalette(42*r+6*g+b, 4*rojo[r], 4*verde[g], 4*azul[b]);
            end;
        end;
    end;
end;

```

**Figura 5.16** Inicialización de la paleta estática.

igual que 256. En los modos graficos de 64K colores (conocidos como *hi-color*), se utiliza una partición en  $32 \times 64 \times 32$ , asignándole mayor resolución cromática al primario verde, dada la gran sensibilidad del ojo al mismo. Pero en nuestro caso, combinaciones como  $8 \times 8 \times 4$  quedan eliminadas, porque 4 intensidades posibles para un primario es un valor demasiado pequeño, aún para el primario azul. La combinación que empíricamente resultó ideal fue  $6 \times 7 \times 6$ , ya que su producto es 252, es decir, desaprovecha solamente 4 índices de color, y representa una buena solución de compromiso.

De esa forma, se eligen 6 intensidades permitidas para los primarios rojo y azul, y 7 para el primario verde (que es para el cual el ojo humano es más sensitivo). De esa manera, el espacio RGB de la tarjeta queda “cuantizado” en 150 prismas rectangulares, y todos los colores representables que caen dentro de un mismo prisma se coercionan al valor del vértice más cercano. La determinación de los  $6 \times 7 \times 6$  valores se debe realizar en forma experimental, teniendo en cuenta la corrección- $\gamma$  del monitor utilizado. En un determinado monitor (un NEC MultiSync 3D) para una posición adecuada en las perillas de brillo y contraste, los resultados elegidos fueron rojo = (0, 20, 32, 45, 55, 63), verde = (0, 15, 22, 30, 40, 50, 63) y azul = (0, 25, 35, 45, 55, 63). Debemos recordar que en este modo gráfico, es posible dar un valor entero de 0 a 63 a la intensidad en cada primario (ver Capítulo 2).

La estructura de la cuantización del espacio RGB elegida resulta ser muy práctica en el momento de encontrar el color con el cual pintar un pixel. Antes de ejecutar la graficación, es decir, como paso de inicialización de la interfase, se almacena la paleta en la tabla de colores de la pantalla. Esto se efectúa con el procedimiento mostrado en la Figura 5.16.

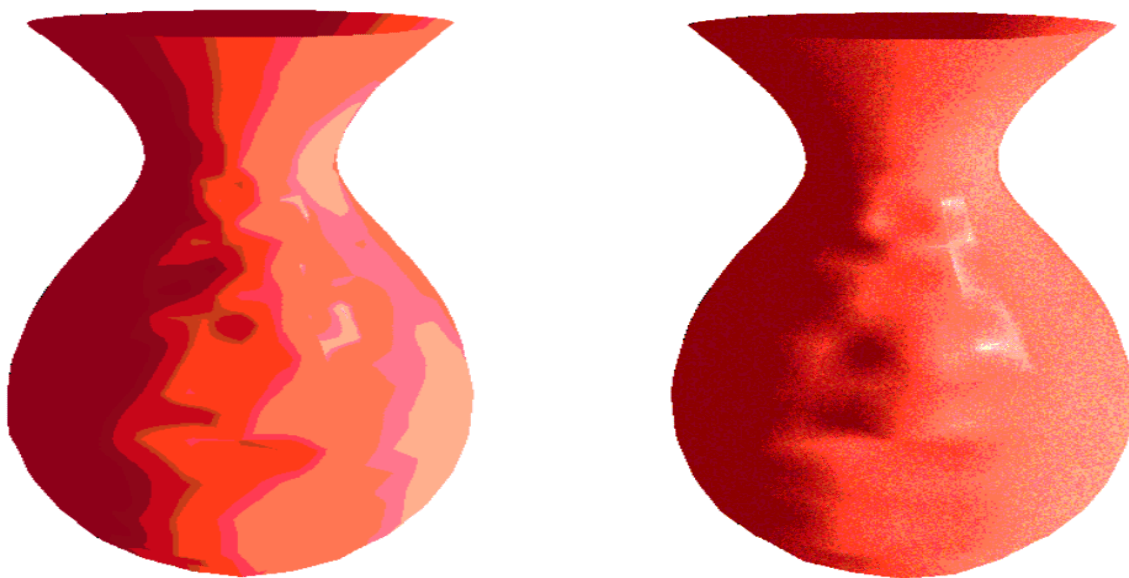


Figura 5.17 Paleta estática sin y con dithering aleatorio.

Cuando es necesario graficar un pixel de un color  $R, G, B$  arbitrario, se buscan los valores  $r, g, b$  tales que  $\text{rojo}[r]$ ,  $\text{verde}[g]$ ,  $\text{azul}[b]$  sean los valores más cercanos, y luego se grafica el pixel con el índice de color  $42*r+6*g+b$ . Por ejemplo, si el modelo de iluminación reclama un color  $(35,42,48)$ , se ubican  $r=2$ ,  $g=4$ ,  $b=3$  y se grafica el pixel con el índice de color 111. Con este esquema se produce el efecto de “bandas de Mach” cuando se pintan áreas contiguas con colores parecidos. Este efecto es producido por la capacidad del ojo de amplificar localmente pequeñas variaciones cromáticas, lo cual le permite, entre otras cosas, reconocer los bordes y las formas de los objetos. Sin embargo, el efecto que producen las bandas de Mach al utilizar esta paleta de colores es indeseado (ver Figura 5.17). Pero a diferencia de lo que sucede con las paletas dinámicas, en nuestro esquema es posible utilizar una técnica de *dithering* aleatorio, es decir, se puede “perturbar” aleatoriamente un color dado cambiándolo por alguno de sus vecinos más próximos en la paleta. Esto es así porque en nuestro modelo, dado un determinado color de la paleta, es posible ubicar rápidamente a sus colores vecinos, los cuales, además, son muy similares.

Una forma muy económica de producir este efecto consiste en perturbar para cada primario la cuantización elegida. Si para el primario  $R$  se reclama un valor  $R$ , el cual está comprendido entre  $\text{rojo}[r]$  y  $\text{rojo}[r+1]$  se perturbará la elección del valor  $r$  o  $r+1$  en la generación del índice de color asociado al pixel (lo propio se efectúa con

los otros dos primarios). Para ello se genera un número aleatorio  $rnd$  uniformemente distribuido entre 0 y 1. Si  $rnd \geq \frac{R-rojo[r]}{rojo[r+1]-rojo[r]}$  se utiliza  $r+1$ , y en caso contrario se utiliza  $r$ . En el ejemplo mencionado más arriba, la elección para la cuantización del rojo está circunscripta a los valores predefinidos 32 o 45. Como 35 es más cercano a 32 que a 45, la probabilidad de que se utilice dicho valor es mayor a la de utilizar 45. De esa manera, se transforma el *aliasing* cromático producido por la baja frecuencia de muestreo en un ruido uniforme (ver Figura 5.17).

## 5.8 Ejercicios

1. Implementar tipos de datos para representar colores en los espacios RGB y CSV en precisión real, y en el espacio RGB con la precisión de la tarjeta gráfica. Implementar los algoritmos de conversión entre espacios cromáticos.
2. Determinar experimentalmente en qué cromaticidades el ojo es menos sensible o más sensible a cambios cromáticos. Determinar aproximadamente la distancia entre diferencias apenas perceptibles, es decir, cuánto es necesario alterar la definición de un color hasta que se distinga que hay una diferencia.
3. Implementar la paleta estática descrita en este capítulo, y graficar un rectángulo pintando todas las cromaticidades para una luminosidad dada (por ejemplo, recorrer los colores del arco iris de izquierda a derecha, y las saturaciones de arriba abajo). Pauta: asignando C a la coordenada  $x$  y S a la coordenada  $y$  del rectángulo (con las debidas escalas), se genera una secuencia bivariada CSV.

## 5.9 Bibliografía recomendada

Los aspectos físicos y fisiológicos del color así como los elementos de la teoría de color, las determinaciones experimentales y los diagramas cromáticos pueden consultarse en [17] o en [65]. Una referencia adecuada para colorimetría, espacios cromáticos CIE, sensibilidad del ojo, etc. es [81]. La descripción del manejo de colores en el hardware, la representación de los espacios cromáticos y los algoritmos para convertir colores de una representación a otra figuran en el Capítulo 13 del libro de Foley et. al. [33]. En [31] se describe la relación entre el espacio CLS y los nombres asociados a los colores. Pueden conocerse y compararse los diversos espacios cromáticos y sus ventajas en el trabajo de Schwarz et. al [75].

Es interesante consultar algunas técnicas para el diseño de secuencias de colores, porque muchos de los problemas discutidos en este Capítulo deben resolverse también en esos casos. Recomendamos consultar los trabajos de P. Robertson [72, 73] y M. Stone [76, 77]. En [47] se discute el problema del muestreo en los espacios cromáticos. También se pueden conocer los detalles para la calibración de monitores en el trabajo de W. Cowan [22].

La paleta estática aquí descripta fue presentada en [25]. Hay otros acercamientos posibles, por ejemplo el presentado por P. Heckbert [49] o el de M. Gervautz [39]. La construcción de paletas dinámicas es una técnica compleja, donde cada autor presenta ideas de un modo diferente. Recomendamos consultar el trabajo de A. Voloboj [82]. Otros principios relacionados con la elección de colores pueden consultarse en [64].