

La teoría de color de Hering: Una posibilidad en procesamiento de imágenes y visión artificial*

César Julio Bustacara Medina**

Alfredo Restrepo Palacios***

Resumen: La idea básica de la teoría de color de Hering, es que la información de color puede ser transmitida y codificada a través de tres canales, y la información a lo largo de cada canal no es simplemente el valor percibido por los fotorreceptores de la retina, como plantea Young-Helmholtz [3], sino que es la suma o diferencia de la información de color derivada de los fotorreceptores.

Abstract: The basic idea behind Hering's color theory is that the color information can be transmitted and coded using three channels, and the information on each channel is not just the value perceived by the retina photoreceptors, as expressed by Young-Helmholtz [3], but it is the sum or difference of the color information derived from the photoreceptors.

1. Introducción

Dentro del estudio del tratamiento de imágenes a color, es importante tener claro cuál es el sistema de color que permite obtener un mayor rendimiento; por ejemplo, en la detección de bordes juega un papel muy importante, ya que permite obtener mayor o menor información dependiendo de la selección de los canales de color utilizados. Los canales utilizados obviamente dependen del sistema de color utilizado. En la actualidad la mayoría de investigaciones utilizan el sistema de tricromaticidad, el cual permite obtener muy buenos resultados en las diferentes tareas de visión y en el procesamiento de imágenes en general. Pero es importante retomar el funcionamiento del sistema visual para ver que el fenómeno de tricromaticidad se

* Artículo basado en el documento de tesis para optar por el título de Magister en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Los Andes, Santa Fe de Bogotá, D.C., Colombia, agosto de 1997.

** Ingeniero de Sistemas. Profesor-Investigador del Departamento de Ingeniería de Sistemas de la Pontificia Universidad Javeriana

*** Ingeniero Electrónico de la Pontificia Universidad Javeriana, MS. y PhD. en Ingeniería Eléctrica de The University of Texas at Austin. Profesor Asociado de la Universidad de Los Andes.

presenta al nivel de la retina y que en el nervio óptico se da un fenómeno de oponencia de color, la cual fue estudiada en primera instancia por Ewald Hering. El objetivo de este artículo es profundizar en cómo funciona la teoría de colores oponentes desde el punto de vista computacional.

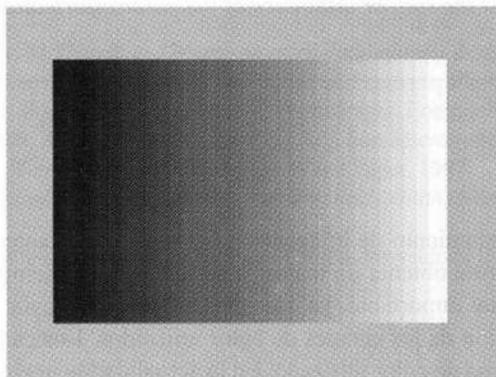
2. El sistema de color natural

Los colores pueden ser divididos en dos grupos que son el de los cromáticos (matices) y el de los acromáticos. Dentro de los colores cromáticos se encuentran el rojo, amarillo, verde, azul y todas las "transiciones" entre ellos, y en los acromáticos están los negros, grises y blancos [1]. La teoría de colores acromáticos ha sido designada como la teoría del sentido de la luz, y la teoría de colores cromáticos como la teoría del sentido del color.

2.1. Colores acromáticos

Los colores acromáticos pueden ser considerados como una serie ordenada que en un extremo contiene el color más negro posible y en el otro el blanco más puro, y entre ellos todos los colores acromáticos como negro, grisáceo-negro, negroso-gris, gris, blancuzco-gris, grisáceo-blanco y blanco, los cuales son alineados en una secuencia continua, como se muestra en la Figura 1. Esta serie acromática puede ser llamada la serie de color negro-blanco, por sus colores extremos.

Figura 1. Serie de Color Negro-Blanco



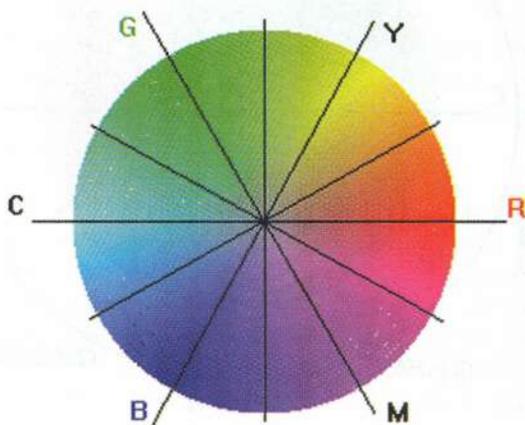
Los colores grises están relacionados debido a que ellos representan simultáneamente negro y blanco; un gris oscuro aparece más similar al color negro que al blanco, un gris claro es más similar al blanco que al negro, y un color que se encuentre entre estos dos grises puede ocasionar dudas si es más similar a blanco o a negro. Debido a lo anterior se pueden encontrar dos características o propiedades, llamadas *negrura* y *blancura*, ya que gracias a éstas se pueden diferenciar dos colores acromáticos diferentes y se especifica diciendo que uno es más negro que el otro o que es más blanco que el otro [1]¹.

1. En la referencia citada se puede encontrar una descripción de la notación simbólica para los colores acromáticos.

2.2. Colores cromáticos

Los colores cromáticos pueden ser ordenados de acuerdo con su matiz en una serie cerrada, llamada círculo de color, de tal forma que la diferencia de color entre dos colores adyacentes sea mínima y la similitud máxima [1], esto se puede ver en la Figura 2.

Figura 2. Círculo de Color, R=rojo, Y=Amarillo, G=Verde, C=Cyan, B=Azul, M=Magenta.



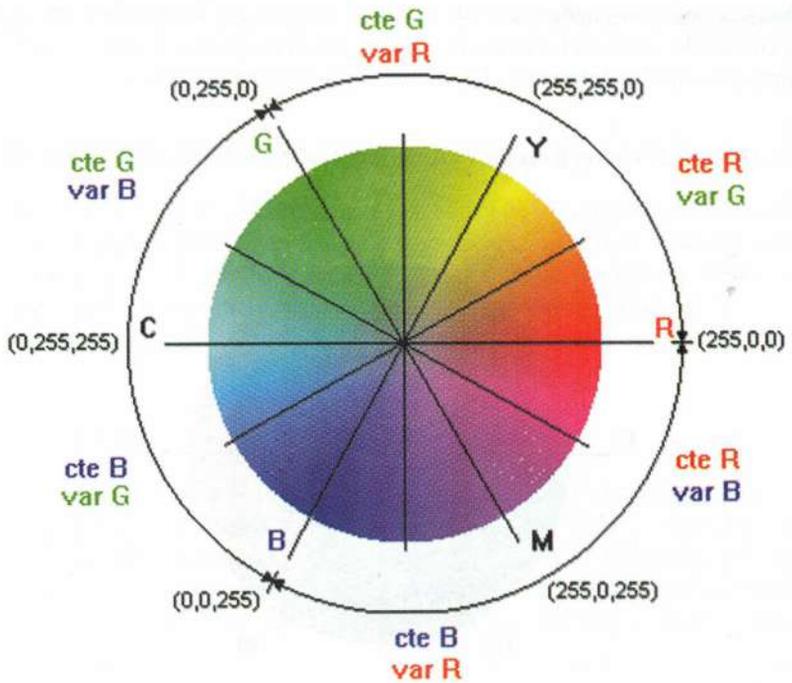
Si el círculo de color se recorre a partir de un color dado, por ejemplo, el rojo, que corresponde a la mayor longitud de onda del espectro visible, se puede pasar por los siguientes colores: rojo, naranja, amarillo-oro, amarillo, amarillo pollito, verde savia, verde, verde mar, azul mar, azul (mínima longitud de onda), violeta azul, violeta rojo, rojo púrpura y finalmente regresar al punto de partida, es decir llegar al color rojo.

Nótese que al recorrer el círculo se pueden definir cuatro colores básicos o primarios: rojo, amarillo, verde y azul, porque no pueden ser descritos en términos de combinación alguna de otros colores. Por ejemplo el color violeta se puede definir como un azul-rojoso o un rojo-azuloso, mientras que el rojo, no se puede describir como un amarillo-azuloso o como un azul-amarilloso. En general todos los demás colores pueden ser ordenados en el círculo de color a partir de los colores primarios, los cuales dividen el círculo de color en cuatro cuadrantes (Figura 2).

3. Teoría de colores opoentes

El círculo de colores de la Figura 3 muestra cómo los cuatro colores primarios (Rojo, Verde, Azul y Amarillo) son interconectados por una serie de colores; además, se puede notar que no existen series de colores intermedias en las que existan colores rojo-verdoso o amarillo-azuloso, y esta ausencia muestra una oposición entre rojo y verde, de la misma forma que entre amarillo y azul, por lo cual los colores rojo y verde, como también el amarillo y el azul son mutuamente excluyentes.

Figura 3. Regiones de colores



De un color que sea rojizo se puede llegar a un color verdoso a través de una secuencia de color, ya sea pasando por el color amarillo o por el color azul, y para ir de un color amarillizo a uno azulado se debe ir por una secuencia de colores que deben pasar ya sea a través del rojo o del verde, por ello se definen cuatro secuencias de color que se comportan de una forma similar a la serie de color negro-blanco, estas secuencias son:

- La secuencia de color que va de un color rojizo a un verdoso pasando por una serie continua de colores intermedios entre los cuales se encuentra el naranja y el amarillo.
- La secuencia de color que inicia en un color rojo y finaliza en un verdoso, pasando a través de una serie continua de colores intermedios, entre los cuales están el magenta, el azul y el cian.
- La serie de color para ir de un color amarillizo a uno azulado pasando por la serie de colores continua que pasan por colores como el rojo y el magenta.
- Y finalmente la serie de color para ir de un color amarillizo a un color azulado pasando por la serie de colores intermedios, que incluye colores como el verde y el cian.

Es importante notar, que el círculo de color generado está basado en transformaciones del modelo de color HSI (*Hue, Saturation, Intensity*) al modelo RGB (*Red, Green, Blue*). Esto se debe a la necesidad de definir las componentes de color con que se maneja la pantalla del computador (RGB), para relacionarlas con las coordenadas del modelo HSI. En el modelo de

color RGB se manejan valores para cada componente de color, los cuales están entre 0 y 255. Cuando el valor es igual a 0, no existe ningún aporte de la componente a la definición de color, y cuando el valor es 255, es máximo su aporte a la definición del color. Por ejemplo, para definir un color rojo puro se definen valores para las componentes RGB de la siguiente forma: $R=255$, $G=0$ y $B=0$, por lo cual el resultado es $(255,0,0)$, y de la misma forma para los demás colores². Es importante tener claro el manejo de los valores de cada componente para definir las transformaciones de las cuatro secuencias de color, en busca de series de color para ir de rojo a verde y de amarillo a azul, que se comporten de la misma forma que la serie de color blanco-negro.

Entre los colores rojo y verde de igual forma que entre amarillo-azul, existen series de color continuas, pero éstas no tienen el mismo comportamiento que la serie de color blanco-negro. Es por ello que se deben realizar unas transformaciones, con el fin de lograr una serie continua que satisfaga las condiciones.

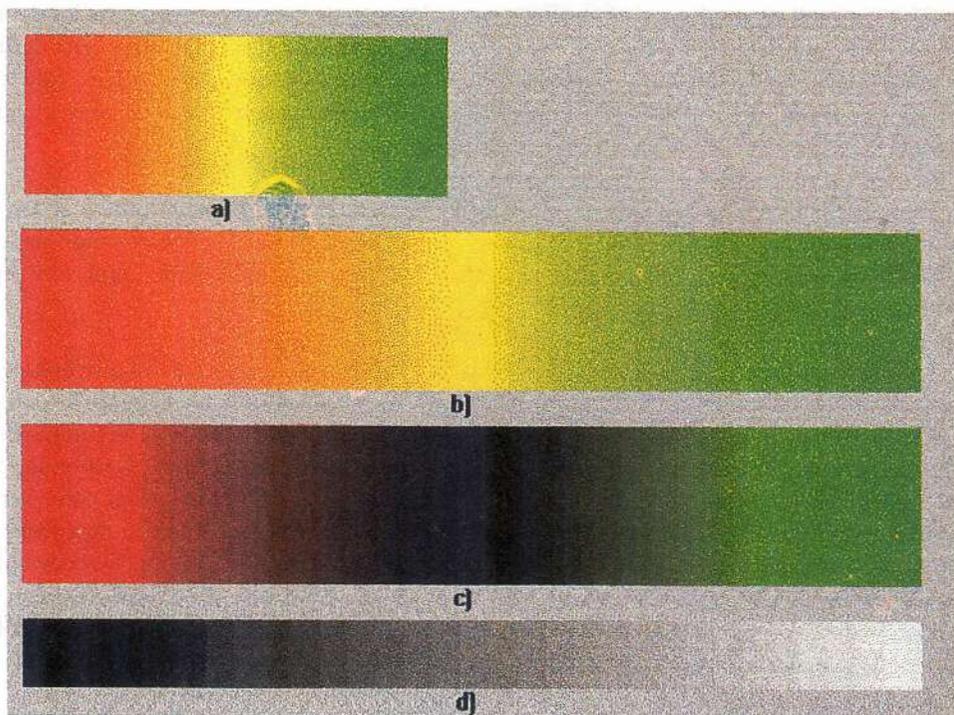
Para obtener la *serie Rojo-Verde*, se debe ir del color rojo al verde y para ello se escoge la que pasa por el color amarillo. Observando la Figura 3 se puede definir que el punto de partida es el color rojo cuyo valor RGB es $(255,0,0)$ y permanece constante el valor de la componente roja, mientras que el valor de la componente verde varía desde 0 hasta alcanzar el valor de 255, esto ocurre cuando se define el color amarillo $(255, 255, 0)$, luego el valor del color verde permanece constante (255) y el valor de la componente de color rojo va decreciendo a partir de 255 hasta 0, para así llegar al valor del color verde $(0,255,0)$. Para generar una serie de color similar a la de blanco-negro se debe restar del valor de la componente de color rojo el valor de la componente de color verde; el resultado de esta diferencia es el segundo canal de color oponente de la teoría de Hering, el cual queda completamente determinado por $RG = R-G$.

Es importante mencionar que la componente de color azul no interviene en la determinación de la serie rojo-verde, ya que se seleccionó el camino que pasa por amarillo y no por azul; esto se puede observar en la parte a) de la Figura 4. Adicionalmente se debe observar que en el momento de pasar a valores de verde mayores que los de rojo, la relación RG toma valores negativos; esto conlleva a usar un intervalo de $[-255, 255]$ para el canal rojo-verde. Estos valores negativos de RG generan problemas desde el punto de vista computacional, ya que los valores para cada componente RGB están dentro del intervalo $[0, 255]$. Para superar este inconveniente, se toma el valor absoluto de RG . Para la detección de bordes se debe tener en cuenta todo el rango de color de la serie $[-255,255]$ y realizar las transformaciones necesarias para visualizar el resultado obtenido de los filtros usados en ese proceso, como se verá más adelante.

En la parte a) de la Figura 4 se puede observar la serie resultante del modelo de color HSI, para ir del color rojo al verde pasando por el amarillo, en b) se amplía la gama de colores de a) en una escala de 2:1, en c) se aprecia la serie de color rojo-verde, resultante de usar la relación $RG = R-G$, teniendo en cuenta que se usó el valor absoluto de RG , y en d) se muestra la gama de colores acromáticos que resultan de la serie de colores rojo-verde usando la relación $(R-G+255)/2$, para obtener una serie que toma valores entre 0 y 255.

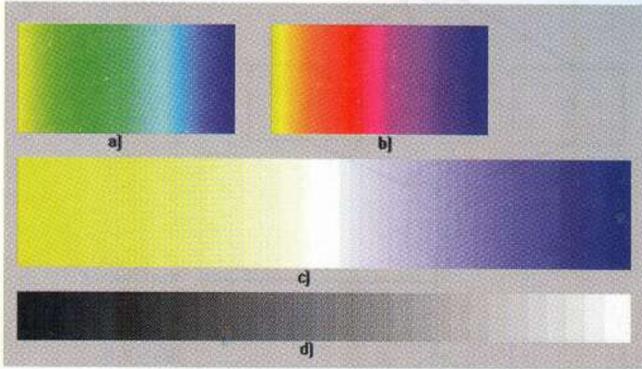
2 Para mayor información se recomienda véase las referencias dadas en el estudio de los modelos de color.

Figura 4. a) Intervalo de color entre rojo y verde pasando por amarillo, b) Ampliación de a) usando una escala 2:1, c) Serie de color Rojo-Verde, d) Serie de color Negro-Blanco a partir de c).



Para la serie Amarillo-Azul, se debe ir del amarillo al azul y para ello se puede pasar por el color rojo o verde como se ve en la parte a) y b) de la Figura 5, pero existe un problema al escoger uno de los dos caminos y es que no se está teniendo en cuenta una de las zonas en las que está dividido el círculo de color; por lo tanto, lo que se plantea es recorrer las dos zonas promediando el valor correspondiente a rojo y verde, ya que presentan propiedades similares y permiten generar una serie de color que tiene características semejantes a las de la serie negro-blanco. Esto se consigue recorriendo los dos cuadrantes de manera simultánea sumando a la vez las componentes roja y verde; este resultado se resta del valor de la componente azul y así se obtiene la serie de color amarillo-azul, como se ve en la parte c) de la Figura 5. Para generar la serie se inicia a recorrer el círculo de color a partir de los colores primarios rojo (255,0,0) y verde (0,255,0), los cuales se mantienen constantes, mientras que el valor de la componente azul va aumentando hasta alcanzar el valor 255; luego en el recorrido simultáneo, los valores de rojo y verde empiezan a disminuir mientras que el valor de azul se mantiene constante, obteniendo de esta manera la serie que se muestra en la parte c) de la Figura 5. Este es el tercer canal de color oponente de la teoría de Hering y es definido por $BY = ((R+G)/2) - B$. De igual forma en la serie de color rojo-verde existen valores negativos, resultantes de un valor mayor de azul que de amarillo, y el intervalo de valores para BY es $[-255,255]$. Adicionalmente en la parte d) de la Figura 5 se muestra la gama de colores acromáticos que resultan de la serie de colores amarillo-azul usando la relación $((R+G)/2 - B + 255)/2$, para obtener una serie que toma valores entre 0 y 255.

Figura 5 a) Intervalo de color para ir de amarillo a azul pasando por verde, b) Intervalo de color para ir de amarillo a azul pasando por rojo, c) Serie de color amarillo-azul, d) Serie de color acromática resultante de la serie amarillo-azul.

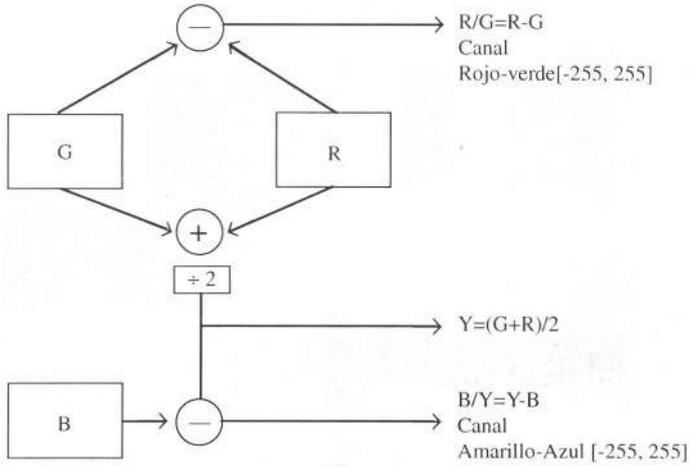


La teoría de colores oponentes de Hering (Figura 6), es consistente con varios hechos de visión de color, entre los cuales están:

- La existencia de cuatro colores intuitivamente “puros” (únicos), a partir de los cuales se puede definir toda la gama de colores intermedios.
- Dificultades en imaginar colores tales como “rojo verdoso” o “amarillo azuloso”³.
- El hecho de que los colores amarillo y azul no puedan ser percibidos simultáneamente como componentes de algún color.
- El hecho de que los colores rojo y verde no puedan ser percibidos simultáneamente como componentes de algún color.
- Los cuatro matices únicos, junto con el blanco y el negro, completan seis (6) colores básicos; y los seis colores constituyen tres (3) pares (rojo-verde, azul-amarillo y blanco-negro) que implican que la teoría de tricromaticidad de visión de color no desaparece, sólo es expresada de una forma diferente.
- Cambio de apariencia de un color cuando es colocado en diferentes entornos.
- La existencia de colores complementarios, los cuales excitan los canales de color oponente en forma contraria.
- La unión de rojo y verde, azul y amarillo, en varias formas de ausencia de color (acromaticidad).

3 Los cuatro únicos matices comprenden dos pares rojo-verde y azul-amarillo; los colores en cada uno de estos pares son oponentes en el sentido que ellos no pueden ser percibidos simultáneamente como componentes de algún color. Esto implica que es imposible tener un color verde-rojoso, o un rojo-verdoso, o un azul-amarilloso, o un amarillo-azuloso. Pero rojos-amarillosos, amarillos-rojosos, y rojos-azulosos son todos posibles.

Figura 6. Modelo de la teoría de color de Hering



4. Conclusiones

Además de lo expuesto anteriormente, una de las conclusiones más importantes en este estudio es el hecho de poder describir el fenómeno de oponencia de colores en una pantalla de computador y así demostrar que se puede aplicar en el tratamiento de imágenes digitales. La variación que tiene con respecto a la teoría de tricromaticidad (RGB) es la escala que maneja para los canales Rojo-Verde y Amarillo-Azul, los cuales varían entre [-255 y 255] en cuanto a valores normales del monitor, lo cual implica una conversión de los datos percibidos por el computador a cada uno de los canales oponentes. En el punto medio de cada uno de los canales Rojo-Verde y Amarillo-Azul, se presenta ausencia de cromaticidad, tal y como lo había expuesto Ewald Hering. Esto indica la cancelación de colores cromáticos en formas acromáticas.

Una de las mayores aplicaciones que puede tener esta linealización de la gama de colores es la detección de bordes en imágenes a color, lo cual puede traer grandes beneficios en el aumento de la información filtrada en este proceso, pues permite encontrar un mayor nivel de contraste entre los *pixeles* que se analizan dentro de la ventana de filtrado, lo cual sugiere un aumento en el desempeño del reconocimiento de patrones en imágenes a color. Otra aplicación se encuentra en el área de visión artificial, dependiendo del rendimiento que tenga la linealización en la velocidad referente al procesamiento de cada imagen que se desee analizar. La determinación del nivel de velocidad para el procesamiento de las imágenes basada en la realización de diferentes pruebas sería el siguiente paso en la investigación de la teoría del color de Hering.

Referencias

[1] Hering, E. *Translated by Hurvich, L.M. and Jameson, D. Outlines of a Theory of the Light Sense.* Cambridge: Harvard University Press, 1964.

- [2] Holway, A., Hurvich, L.M. *Visual differential sensitivity and retinal area*. Reprinted in Readings in Mathematical Psychology by Luce, D., Bush, R. New York: John Wiley, 1965.
- [3] Hubel, D. *Eye Brain and vision*. New York: Scientific American Library, 1988.
- [4] Jameson, D. Hurvich, L.M. *Perceived color and its dependence on focal, surrounding and preceding stimulus variables*. Reprinted in Readings in Mathematical Psychology by Luce, D. and Bush, R. New York: John Wiley, 1965.