

INTERAÇÃO ENTRE OS MECANISMOS CROMÁTICO E ACROMÁTICO NA CROMOESTEREOPSIA.

José Antonio Aznar Casanova
Universidad de Barcelona - Espanha

Resumo: Com o objetivo de esclarecer se o mecanismo acromático é independente do cromático ou, pelo contrário, existem interações entre ambos, realizamos dois experimentos. No primeiro, estudamos a profundidade, induzida pela cromoestereopsia de pares de tiras isoluminantes e anisocromáticas inseridas em fundo acromático, que variou em luminância em relação às partes cromáticas. No segundo experimento, utilizamos quatro pares de tiras cromáticas inseridas em fundo de grade de onda quadrada. Nestes fundos, as listras podiam ser isso ou isoluminantes e isso ou anisocromáticas. Os resultados demonstraram que: 1) a profundidade percebida variava em função da variação da luminância, mudando o sinal da profundidade quando se invertia o sinal da diferença em luminância entre fundo e figura; 2) é possível a cromoestereopsia em baixa luminância; 3) evidenciou-se uma fraca interação entre a variação de contraste cromático e a de contraste de luminância; 4) a interação destes dois mecanismos deve ocorrer em nível pré-retiniano; 5) as respostas dos dois mecanismos são separáveis.

Palavras-chave: Visão de cor, visão binocular, cromoestereopsia, psicofísica, mecanismo cromático, mecanismo acromático.

IIINTERACIÓN ENTRE EL MECANISMO CROMÁTICO Y EL ACROMÁTICO EN CROMOESTEREOPSIS.

Abstract: In order to know if the mechanisms that process luminance are independent of those that process colour, or, conversely, if there is an interaction between them, we have executed two experiments. In the first, we studied how the changes in the perception of depth elicited by chromostereopsis with couples of isoluminants and anisochromatic patches inserted in a uniform background, which varied in luminance from trial to trial. In a second experiment, we used a square-wave grating background, in which every strip changes the luminance of the colour. The different background could be, on the one hand, isoluminant/anisoluminant, or, on the other hand, isochromatic/anisochromatic. The results showed: 1) that perceived depth varied as a function of the luminance variation. That is, reversing the depth when the sign of the difference in luminance between figure and background changes; 2) that it is possible to elicit chromoesteropsis at isoluminance; 3) a weak interaction between the variation of chromatic contrast and achromatic contrast; 4) that interactions between the two mechanisms should occur at pre-retinal levels; and 5) the responses of the two mechanisms are separable.

Key-words: Color Vision, Binocular Vision, Chromostereopsis, Psychophysics, Chromatic mechanism, Achromatic mechanism.

En el mundo visual existen dos grandes fuentes de información, el color y la intensidad de la luz y los seres humanos disponemos de sensores y mecanismos con las que captarlas y procesarlas. Por

un lado, el color es analizado mediante el mecanismo cromático, basado en el procesamiento de la longitud de onda de la luz y, por otro lado, el brillo, claridad y contraste, es analizado mediante el mecanismo acromático, basado en el procesamiento de la luminancia. Según Livingstone y Hubel (1984), el mecanismo cromático es menos eficiente que el mecanismo de la luminancia, en cuanto al

Artigo recebido para publicação em 26/09/2003; aceito em 05/12/2003.
Endereço para correspondência: José Antonio Aznar Casanova,
Departamento de Psicología Básica, Facultad de Psicología, Universidad
de Barcelona, Gran Via Corts Catalanes, 585 - 08007 Barcelona, España
E-mail: jaznar@psi.ub.es

procesamiento de información espacial se refiere.

Actualmente, existe un debate abierto y de gran interés sobre el problema de si los mecanismos cromático y acromático operan independientemente o, por el contrario, están relacionados e interactúan. Asimismo, también hay controversia sobre si es posible la estereopsis en condiciones de isoluminancia (Howard & Rogers, 1995, para una revisión).

En nuestros días, se considera que existen tres grandes autopistas por las que circula y se procesa la información visual (Livingstone & Hubel, 1987): la vía blob, la vía magnocelular y la vía parvocelular interblob de V1. La vía Blob, parece ser que no interviene en el procesamiento estéreo, ni en el de la luminancia, pero sí que interviene en el procesamiento de la apariencia del color y está constituido por células con campos receptores con una configuración doble oponente espectralmente. Según la postura tradicional, iniciada por Lu y Fender (1972), representada por Livingstone y Hubel, (1987) y recalada en Hubel y Livingstone (1990), se considera que el color se transmite por y procesa en la vía parvocelular, estando codificado de modo espectral oponente, mientras que la luminancia se procesa a través de la vía magnocelular, la cual no es espectral oponente, sino oponente en cuanto a la polaridad de la luminancia y la estereopsis solo implica a la vía magnocelular. Estos autores ponen en duda que la estereopsis sea posible en condiciones de isoluminancia, tanto con RDS (Random Dot Stereograms) como con estereogramas figurales, la explicación radica en que estos dos sistemas (parvo y magno) están inconexos, siendo dos vías diferenciadas de procesamiento visual.

No obstante, el hecho de que una de las tres dimensiones del color sea el brillo (juicio sobre la luminancia), además del matiz y la saturación hace sospechar que estas tres propiedades se hallen estrechamente relacionadas y no sean totalmente independientes, por lo que deberán interactuar en alguna localización de las vías visuales, siendo en la actualidad el candidato más verosímil la vía magnocelular. Existen, al menos, otros dos efectos perceptivos que exhiben ciertos tipos de interacción entre brillo y color. Uno de éstos es el efecto Bezold-Brücke, que, básicamente, consiste en que dos

estímulos cromáticos, con la misma longitud de onda dominante, pero que difieren en brillo, pueden percibirse como si tuvieran distinto matiz. El otro es el efecto Helmholtz-Kohlraus, el cual viene a decir que aunque dos estímulos tengan la misma luminancia (o la misma reflectancia) tiende a percibirse con más brillo (o con más claridad) el estímulo cromático que el acromático.

Gur y Akri (1992) defendieron la idea de que la evolución introdujo la visión del color no sólo para posibilitar nuevas discriminaciones, sino, fundamentalmente, para mejorar el procesamiento visual basado en la luminancia. Así, hipotetizaron que para que la información cromática sea eficaz también debe estar presente en el estímulo la variación en luminancia. Complementariamente, en los últimos años han ido apareciendo evidencias que sugieren la existencia de cierta interacción entre el sistema magnocelular y el sistema parvocelular. Así, De Valois y De Valois (1993) propusieron un modelo, que describe cómo se relaciona el mecanismo cromático con el mecanismo acromático. El modelo combina las respuestas excitatorias e inhibitorias de células oponentes del color sensibles a la longitud de onda larga, media o corta. Resumidamente, si bien el color se procesa principalmente en el sistema parvocelular y la luminancia en el sistema magnocelular, en el momento presente, cada vez hay más evidencias que apoyan la tesis de que el color se procesa también en el sistema magnocelular y el área MT, al menos ciertos aspectos temporales (flicker, movimiento de estímulos cromáticos). Ciertamente, Troscianko y asociados (1996) estudiaron a dos sujetos humanos con acromatopsia cerebral (ausencia de conocimiento sobre el color) y encontraron que podían hacer discriminaciones cromáticas, ya que esta tarea también puede ser mediatizada por el sistema magnocelular. Mullen y Losada (1994) midieron y compararon funciones de umbral de detección de la luminancia con funciones de sensibilidad al contraste cromático y acromático, utilizando enrejados sinusoidales que variaban tanto en luminancia como en color. Los resultados sugerían que existen vías separadas, independientes para detectar el contraste en luminancia y en color y que el mecanismo del color y el de la luminancia tienen similar anchura de banda, la cual permanece

constante, en octavas, a través de la excentricidad. Burr y Corsale (2001) compararon el tiempo de detección de enrejados sinusoidales que varían en luminancia y en color y concluyeron que el movimiento es detectado por dos sistemas. Si el enrejado contiene variación en color, entonces la detección es efectuada por el sistema parvocelular, pero si el enrejado contiene variación en luminancia, entonces la detección es efectuada por sistema magnocelular

En cuanto a las investigaciones que han puesto en relación el estudio de la esteropsis y la percepción del color, en general, se han ocupado, principalmente, de dos problemas, uno que se refiere a cómo la información cromática puede ayudar a resolver el problema de la correspondencia estereo y, otro, que se refiere a si es posible la esteropsis bajo condiciones de isoluminancia de los esterogramas. Respecto al primero, consideramos que es un falso problema (Aznar-Casanova & Fernandez-Titos, 2001), ya que computando la diferencia de fase entre los campos receptores homólogos, centrados en las mismas coordenadas retinotópicas, se hace innecesario el establecimiento de un alineamiento o correspondencia entre los rasgos de la imagen captada por el ojo izquierdo y el ojo derecho. Y, respecto al segundo problema, Livingstone y Hubel (1984, 1987), describieron células sintonizadas a la disparidad binocular en V1 (sistema magnocelular), en V2 y en MT. Por otra parte, observaron que el sistema magnocelular no procesa el color, por lo que concluyeron que, con estímulos cromáticos, la esteropsis debía fracasar bajo isoluminancia. No obstante, otra serie de evidencias apoyan la existencia de esteropsis en condiciones de isoluminancia. Así, Julesz, (1971), discrepaba de la tesis de Livingstone y Hubel, (1987). En efecto, los RDS vienen a ser la versión de laboratorio de la segregación figura fondo en esteropsis y es posible visualizar la forma emergente usando puntos con contraste cromático, pero sin que exista contraste en el valor de luminancia de figura y fondo. También, Jordan y asociados (1990), Tyler y Cavanagh (1991), Scharff y Geisler (1992) han mostrado que la esteropsis se mantiene bajo isoluminancia (tanto con RDS, como con esterogramas figurales, y con anaglifos). Simmons

y Kingdom (1994), midieron los umbrales de contraste en luminancia para la detección estereo. Y Kingdom y Simmons (1996) compararon la estereoagudeza de esterogramas isocromáticos e isoluminantes. Simmons y Kingdom (1997) utilizaron esterogramas mixtos, que variaban tanto en luminancia como en cromaticidad, para mostrar las contribuciones de los mecanismos cromático y acromático a la percepción de la profundidad estereo. Los resultados se explican mejor mediante dos mecanismos de procesamiento estereo, que operaban independientemente, uno sensible al contraste acromático y otro sensible al contraste cromático. Finalmente, Kingdom, Li y MacAulay (2001) estudiaron si la diferencia en luminancia o en color facilitaba o dificultaba la esteropsis con RDS, los resultados mostraron que solo se facilitaba si había pocos estímulos objetivo (*targets*).

En síntesis, a partir de la evidencia obtenida en la investigación, en nuestros días, se considera que la vía parvocelular, además de intervenir en el procesamiento del color, también intervienen en el procesamiento de la forma, en cuanto que esta sintonizadas a la frecuencia espacial y orientación. Y según Schor y Wood (1983) también parecen implicadas en el procesamiento de pequeñas disparidades binoculares. Por otra parte, el sistema magnocelular, además de intervenir en el procesamiento de la luminancia, del movimiento, y de la estereoscopia, existen evidencias que apuntan a que también interviene en el procesamiento del color, particularmente si el estímulo está en movimiento o sometido a *flicker*. Es decir, que estaría más relacionado con los aspectos temporales que con los espaciales del procesamiento.

Existe un efecto perceptivo, directamente relacionado con la percepción del color y la percepción de la profundidad y esteropsis, se trata de la cromostereoscopia¹ (véase Allen & Rubin, 1981, para una breve revisión del tema). Dado que, como se ha dicho el color se procesa en el sistema parvocelular y la luminancia (y también la estereoscopia) en el sistema magnocelular, el hecho de que se produzca este efecto, parece ser una prueba de la existencia de cierta interacción entre ambos sistemas. Por ello, en este trabajo tratamos de estudiar las relaciones entre el mecanismo cromático

y el acromático utilizando una tarea cromostereoscópica. Es decir, solicitando a los sujetos juicios de estimación de la profundidad ante estímulos de color contra un fondo, que pueden diferir en contraste acromático y en contraste cromático. En el experimento 1, el fondo contra el que se insertan los parches cromáticos es acromático, mientras que en el experimento 2, el fondo es también cromático.

Experimento 1

En este experimento el objetivo consistía en verificar los efectos de la variación del fondo en luminancia sobre la profundidad cromostereoscópica, percibida ante dos parches de distinto matiz cromático, pero isoluminantes e isosaturados. De este modo, pretendíamos dar respuesta a la cuestión de si es posible la cromostereopsis bajo estímulos isoluminantes y al mismo tiempo, tratábamos de esclarecer si existe o no interacción entre el mecanismo cromático y el acromático. Para ello, la tarea de los sujetos consistió en realizar juicios de estimación de la profundidad entre dos muestras (parches) circulares cromáticas isoluminantes con respecto a un fondo gris (acromático), cuya luminancia fluctuaba con respecto a la luminancia de las muestras cromáticas. Es decir, tratamos de estudiar la función psicofísica que se establece al estimar la profundidad cromostereoscópica cuando varía tanto el contraste cromático de los parches que constituyen la figura como el contraste acromático entre figura (parches cromáticos) y fondo (acromático), manteniendo constante el contraste en luminancia de los parches (isoluminantes) y el contraste cromático del fondo (al ser acromático era nulo).

Método

Sujetos. Tres sujetos (dos hombres y una mujer), edad promedio de 24 años, desviación estándar de 1,8, todos ellos con agudeza visual normal 20/20 y agudeza estereoscópica superior a 60 seg de arco, según TNO y el

Titmus-Wirt Test. Los tres sujetos eran tricromáticos, de acuerdo con el test de las láminas isocromáticas de Ishihara (38 plates Edition).

Estímulos. Los estímulos consistían en parches cromáticos de forma circular. La forma de círculo fue elegida por dos razones. Primero, por tener un contorno más definido que, por ejemplo, los parches gaussianos o los de Gabor (funciones bidimensionales de la luminancia), lo que facilita la ilusión de profundidad. Y, segundo, porque de este modo se mantiene uniforme tanto la luminancia como la cromaticidad del matiz contenido en el interior del círculo, estableciéndose una función escalón entre el contraste de luminancia y el contraste cromático con el fondo (Figura 5). En la Figura 1 se muestra una imagen que integra tres posibles ensayos.

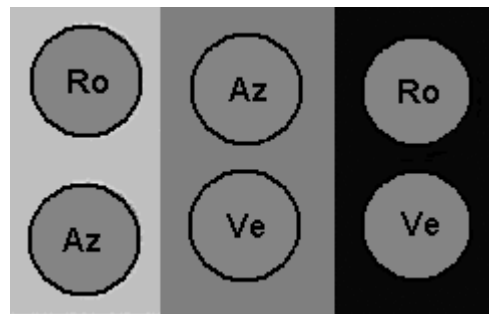


Figura 1. Pantalla que muestra, a la izquierda, el par de estímulos cromáticos (parches circulares) sobre tres diferentes fondos acromáticos que varían en luminancia. Esta imagen muestra, simultáneamente, un recorte de tres ensayos diferentes, al objeto de que el lector pueda comparar la variación en luminancia del fondo acromático contra el que se presentan los parches cromáticos. Clave: Ro= rojo; Ve= verde y Az= Azul.

Los colores de los parches utilizados fueron los tres primarios (RGB), siendo todos ellos isoluminantes y, aproximadamente, isosaturados (Tabla 1). El diámetro de los círculos era de 18mm, por lo que al ser observados a 1m de distancia subtendían un ángulo visual de 1°. Y la separación entre los dos círculos del par cromático que debía inducir la cromostereopsis era de 1.4mm, lo que producía un ángulo visual de 0.08° (4 min 48.7 seg).

¹ La cromostereopsis o estereopsis cromática o estereopsis del color consiste en una ilusión mediante la que se percibe profundidad ante estímulos de distinto matiz cromático, situados a la misma distancia de observación.

Tabla 1. Descripción paramétrica de los estímulos de los experimentos 1 y 2. Y(x,y): Luminancia y coordenadas cromaticas en diagrama de la CIE 1931. (u',v'): coordenadas cromaticas en diagrama de la CIE 1976. (X,Y,Z): componentes tricromáticas. (r,g,b): proporciones tricromáticas, (R,G,B): valores de los componentes R-G-B. L*: claridad. L: luminancia. H:  ngulo cromático. Crom: saturacion (croma, según la CIE).

	Rojo	Verde	Azul	Amarillo
Y(x,y)	31,5 (0.473, 0.348)	31,5 (0.29, 0.59)	31,5 (0.23, 0.198)	31,8 (0.433, 0.428)
(u',v')	(0.303, 0.502)	(0.122, 0.559)	(0.187, 0.362)	(0.24, 0.53)
(X,Y,Z)	(40.82, 31.4, 20.13)	(22.21, 31.4, 17.11)	(34.75, 31.4, 62.54)	(32.18, 31.8, 10.77)
(r,g,b)	(0.7, 0.14, 0.14)	(0, 0.44, 0)	(0.23, 0.23, 0.96)	(0.41, 0.25, 0.06)
(R,G,B)	(214, 98, 98)	(0, 173, 0)	(120, 120, 250)	(165, 131, 63)
L* (claridad)	62.84	62.84	62.84	63.20
L (Luminancia)	31,5 cd/m ²	31,5 cd/m ²	31,5 cd/m ²	31.8
Ang. Crom.(H)	14.6 ^o (≈ 600 nm)	130.2 ^o (≈ 550 nm)	265.6 ^o (≈ 460 nm)	51.65 ^o (≈ 578 nm)
Croma	92.7	90.8	91.35	58.62

Tabla 2. Variación de la luminancia y los correspondientes valores tricromáticos del fondo acromático del Experimento 1

LUMINANCIA-FONDO	Lumi (cd/m ²)	(R,G,B)
L ₁	0.0 cd/m ²	(0, 0, 0)
L ₂	15.8 cd/m ²	(92, 92, 92)
L ₃	31.5 cd/m ²	(133, 133, 133)
L ₄	63.2 cd/m ²	(177, 177, 177)
L ₅	126.4 cd/m ²	(245, 245, 245)

La iluminación de la sala de examen se mantuvo estable a 500cd/m². El fondo sobre el que se insertan lo parches cromáticos era acromático, siendo la variación en luminancia de dicho fondo la variable independiente objeto de estudio, cuyos valores de los cinco niveles de luminancia que hemos seleccionado se muestran en la Tabla 2.

Aparatos. Los estímulos fueron generados y, posteriormente, presentados a los sujetos mediante un Personal Computer Dell Pentium-IV, que dispone de una tarjeta gráfica VSG5/2 (Cambridge Research Systems). La pantalla en la que se mostraron fue un monitor Eizo FlexScan F56, 17", utilizando una resolución gráfica de 800x600pixels, una profundidad del color de 2²⁴bits (3bytes/pixel), y tasa refresco pantalla de 120Hz. La calibración de la luminancia del sistema gráfico fue realizada con un fotómetro Minolta

LS100, lo que nos permitió corregir las no linealidades de los tres tipos de fósforos RGB (corrección gamma).

Procedimiento. En este trabajo, hicimos uso de una tarea de esteropsis cromática. Solicitamos a los sujetos que emitiesen juicios juicios de estimación de la profundidad cromostereoscópica a nivel fotográfico y sin gafas pinhole. La prueba constaba de 90 ensayos, en cada uno de los cuales el sujeto debía juzgar la profundidad cromostereoscópica entre dos parches cromáticos uniformes de forma circular. Los 90 ensayos resultaban de combinar cinco tipos de fondo, que variaban en sus valores de luminancia (Tabla 2), con seis parejas de parches cromáticos (R-G, R-B, R-B, G-B, B-G) y, cada uno de estos 30 estímulos, de acuerdo con el método de los estímulos constantes era presentado 3 veces (repeticiones) en un orden aleatorio. Un programa de ordenador controlaba la secuencia experimental, específicamente aleatoria para cada sujeto, así como también la presentación de estímulos y permitía la introducción de la respuesta del sujeto, a cada ensayo, por parte del experimentador.

Los sujetos emitían sus respuestas indicando verbalmente la profundidad percibida, en un rango de valores de ±10 (juicios de estimación de magnitudes) y el experimentador introducía la respuesta arrastrando una barra de Windows (TrackBar), que podía variar en un intervalo de valores entre ±10. Cada sujeto realizaba la prueba individualmente, colocándose en una mesa del laboratorio a una distancia de 1m de la pantalla, apoyado en una mentonera, que delimitaba su posición. Los tres sujetos estaban entrenados en la tarea de cromostereoscopia, así como en la realización de pruebas en psicofísica visual. No obstante, previamente, se les aplicó cinco ensayos de entrenamiento, a fin de familiarizarse con el

interfaz de respuesta y la tarea.

La secuencia experimental comenzaba al aparecer, en la parte izquierda de la pantalla, un par de parches cromáticos, cada uno de distinto color, sobre un fondo acromático de luminancia variable. Una vez que el sujeto veía estos dos círculos, sin límite temporal alguno, formulaba oralmente su juicio de estimación de la profundidad, el cual introducía el experimentador arrastrando una barra de Windows. La duración media de un ensayo era de unos 8seg (aproximadamente), lo que hacía durar la prueba alrededor de 12min.

Resultados y Discusión

Para cada pareja de colores presentados en la prueba (R-G, R-B, G-B) se realizó un análisis de la varianza simple (ANOVA) para verificar la influencia de los cinco niveles de luminancia sobre las profundidades cromoestereoscópicas juzgadas por

los sujetos. En todas las parejas de colores, la estimación de la profundidad en función del contraste en luminancia (entre los parches y el fondo), globalmente consideradas, alcanzaron el nivel de significación establecido ($p < .001$). Debemos recordar que los parches cromáticos eran isoluminantes y casi de la misma saturación (isosaturados). Por tanto, estos estímulos variaban, por un lado, en cromaticidad entre los parches y, por otro lado, en luminancia entre fondo y figura (parche).

Cuando comparamos las profundidades percibidas por los sujetos en el par rojo-verde, en función de la variación de la luminancia con respecto al fondo, encontramos diferencias significativas [$F(14, 4) = 80.58$; $p < .001$], atribuibles al contraste acromático (variación de la luminancia). Estos resultados (Figura 2 izquierda) muestran que la profundidad percibida fluctúa de acuerdo con un mecanismo oponente de la luminancia, lo que parece reflejar que interviene el sistema magnocelular en el

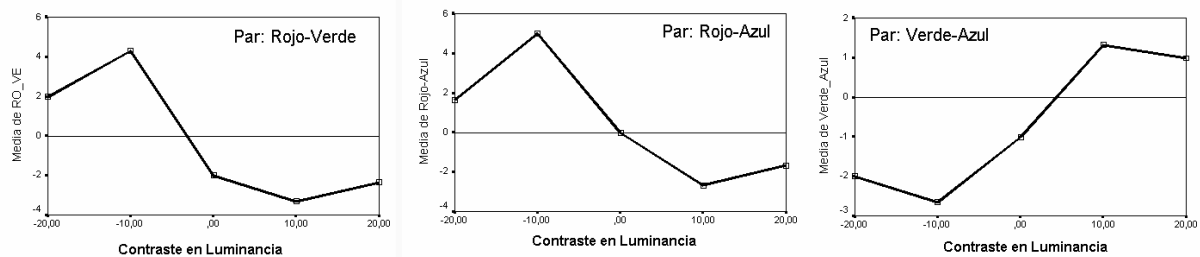


Figura 2. En los tres pares de colores (Rojo-Verde, Rojo-Azul y Verde-Azul), variación de la profundidad media percibida por los tres sujetos, en función del contraste acromático entre las luminancias de los parches (isoluminantes entre sí) y la luminancia del fondo.

procesamiento cromoestereoscópico.

Análogamente, la función de estimación de la profundidad cromoestereoscópica en el par rojo-azul, según la variación de la luminancia con respecto al fondo, también alcanzó el nivel de significación prefijado [$F(14, 4) = 68.58$; $p < .001$]. Los resultados (Figura 2 centro) también parecen ajustarse a las características de un mecanismo con organización oponente centro-periferia, como el que se ocupa del procesamiento de la luminancia y que modula la percepción cromática.

Finalmente, las estimaciones de la profundidad cromoestereoscópica en el par verde-azul, en función de la variación de la luminancia con respecto al fondo, también se revelaron significativas [$F(14, 4) = 71.25$; $p < .001$]. Los resultados (Figura

2 derecha), de nuevo, parecen ajustarse a la respuesta de un mecanismo que procesa la luminancia que interacciona de modo opuesto con los colores juzgados.

Los resultados anteriores, tomados en conjunto, parecen revelar que el procesamiento de la profundidad percibida en la cromoestereopsis parece adoptar las características del mecanismo procesador, mas concretamente, del mecanismo acromático que interviene en un procesamiento cromoestereoscópico, lo que sugiere la interacción entre este mecanismo y el mecanismo cromático. Además, se observa que cuando el contraste en luminancia fondo-figura es nulo, entonces la profundidad media percibida por los sujetos solo es nula en el par R-B, siendo en el par R-G de valor -2 y en el par G-B de valor -1 . Por

tanto, podemos concluir que en condiciones de isoluminancia la cromostereopsis es posible y que conforme varía la luminancia del fondo de menor a mayor valor, con respecto a la luminancia de los estímulos cromáticos, se invierte el sentido de la estimación de la profundidad. Finalmente, la forma de las funciones obtenidas muestra que, en la estereoscopia del color, opera un mecanismo cuya configuración es opuesta en luminancia, similar al *modus operandi* del mecanismo acromático. Ello sugiere, alguna interacción entre el mecanismo que procesa la variación en luminancia (mecanismo del contraste acromático) y el mecanismo que procesa la variación en color (mecanismo del contraste cromático).

Experimento 2

En el experimento anterior verificamos que la profundidad percibida variaba en función de la diferencia de luminancia entre figura y fondo, siempre que existiera una diferencia cromática entre los pares de parches (figuras). Aunque los datos del Experimento 1 sugieren la existencia de una interacción entre el mecanismo cromático y el acromático, tan solo hemos verificado parcialmente dicha interacción, ya que solo hemos estudiado la respuesta del sujeto ante fondos acromáticos uniformes, haciendo variar, de ensayo en ensayo, la luminancia y, por tanto, el contraste acromático respecto a las figuras. Nos quedaba por estudiar la respuesta del sujeto ante fondos que puedan ser isocromáticos o anisocromáticos respecto a las figuras. En consecuencia, para verificar de un modo más completo si existe, o no, interacción entre ambos mecanismos, en este Experimento 2, aplicamos a los sujetos cuatro condiciones de prueba de la cromostereoscopia, resultantes de combinar dos tipos de contraste acromático del fondo (enrejados con franjas isoluminantes o anisoluminantes) con otros dos tipos de contraste cromático del fondo (enrejados con franjas isocromáticas o anisocromáticas). Para este fin, diseñamos cuatro tipos de fondo contra los que se insertan las figuras, que denominaremos enrejados cromáticos de onda cuadrada, en los que tanto la luminancia como la cromaticidad puede variar de modo acorde con la función escalón que caracteriza a la onda cuadrada.

De este modo, pudimos disponer de cuatro condiciones de prueba, las cuales nos permitieron verificar si los sujetos, al estimar la profundidad cromostereoscópica, se basaban: a) solo en la variación en luminancia; b) solo en la variación en color; o c) alguna combinación de ambos. Otra modificación que se introduce en este Experimento 2 consiste en que solicitábamos a los sujetos juicios de profundidad relativa y no absolutos como en el Experimento 1. Es decir, los sujetos tendrán que estimar las profundidades percibidas entre todos los estímulos de cada franja del enrejado (verticalmente) y, a su vez, ajustar la métrica de modo acorde con las profundidades percibidas lateralmente (horizontalmente).

Método

Sujetos. Ocho sujetos (cuatro hombres y cuatro mujeres), edad promedio de 32,4 años, desviación de 2,6, todos ellos con agudeza visual corregida de 20/20 y agudeza estereoscópica superior a 60 seg de arco, según TNO y el Titmus-Wirt Test. Todos los sujetos eran tricromáticos, de acuerdo con el test de las láminas isocromáticas de Ishihara (38 plates Edition).

Estímulos. Con el fin de variar el contexto (fondo) de la cromostereopsis, de modo que hubiese dos niveles de luminancia (isoluminantes – anisoluminantes) y dos niveles de cromaticidad (isocromaticas – anisocromaticas), insertamos las figuras (parches de forma rectangular) contra enrejados de onda cuadrada (3 ciclos/imagen). Las diferencias entre las franjas de dichos enrejados podían establecerse bien mediante variación en luminancia o bien mediante variación en cromaticidad. Decidimos que la variación (en luminancia o en color) del fondo debía ajustarse a la forma de una onda cuadrada (función escalón), por tener mayor uniformidad en luminancia o cromaticidad dentro de una franja que la función sinusoidal. La Figura 3 muestra los cuatro perfiles correspondientes a los cuatro tipos de fondo diseñados, en estos perfiles se observará una función escalón solo cuando exista variación

en luminancia, como ocurre en la Figura 4.

El fondo tipo-1 se caracteriza por ser isoluminante (=Lo) e isocromático (=Co), es decir, un fondo en el que no varía ni la luminancia ni el color, por tanto, un fondo uniforme. El fondo tipo-2 se caracteriza por ser anisoluminante (¹Lo) e isocromático (=Co), es decir, un estímulo en el que varía la luminancia, pero no el color. El fondo tipo-3 se caracteriza por ser isoluminante (=Lo) y anisocromático (¹Co), es decir, un estímulo en el que varía el color, pero no la luminancia. Finalmente, el fondo tipo-4 se caracteriza por ser anisoluminante (¹Lo), y anisocromático (¹Co), es decir, un estímulo

en el que varía tanto la luminancia, como el color. La anchura de cada una de las seis franjas de que constaba el enrejado de onda cuadrada era de 20mm, subtendiendo un ángulo visual de 1,15° al ser observado a 1 m de distancia. El enrejado completo (fondo) eran de tamaño 120 x 120mm. La figuras eran pequeños rectángulos cromáticos de 12 x 4mm, lo que observado a 1m de distancia subtendía un ángulo visual de 0,69° x 0,23°. Los parámetros de los estímulos cromáticos (parches rectangulares) pueden verse en la Tabla 1.

Aparatos. Los mismos descritos en el

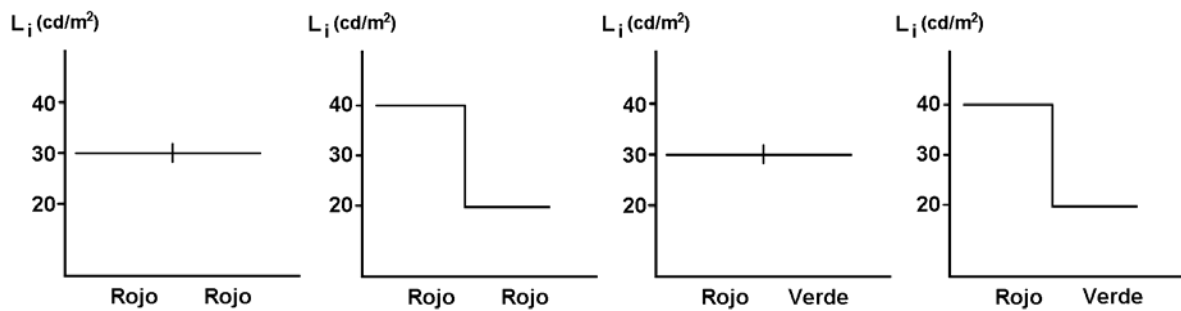


Figura 3. Funciones escalón correspondientes a los cuatro tipos de fondo que definen las condiciones de prueba del Experimento 2. En el eje de abscisas se representa la variación cromática entre las franjas del enrejado cromático (fondo) y en el eje de ordenadas abscisas se representa la variación en luminancia entre dichas franjas del enrejado cromático.

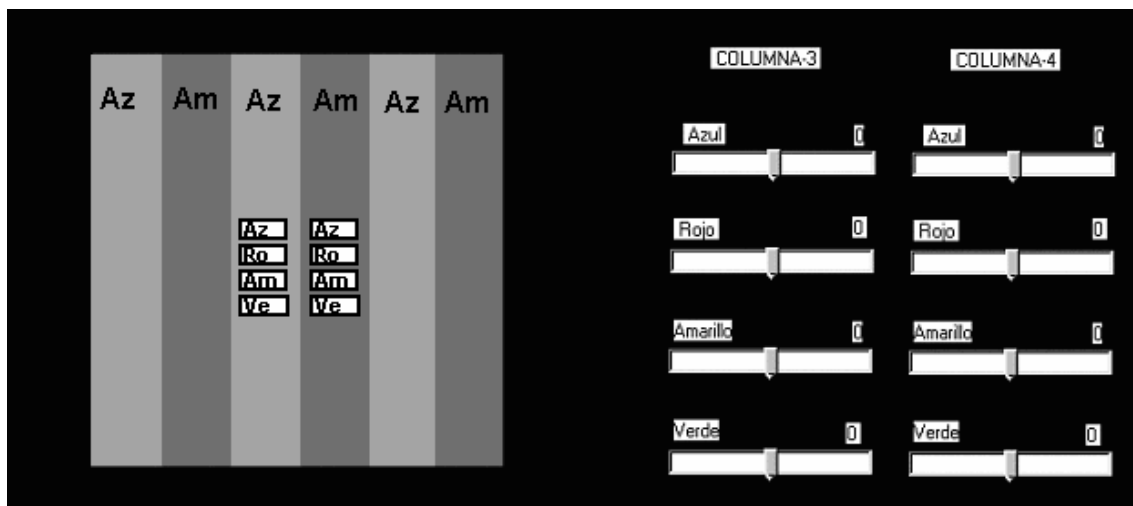


Figura 4. Pantalla que muestra, a la izquierda, los cuatro pares de estímulos cromáticos (parches rectangulares) sobre un fondo de enrejado cromático que varía en luminancia y en cromaticidad. A la derecha se observa el interfaz de usuario con las 8 barras de arrastre (TrackBar) que cuantifican la profundidad relativa percibida por el sujeto. Clave: Ro= rojo, Ve= verde, Az= Azul y Am= amarillo

experimento anterior.

Procedimiento. La prueba constaba de 16 ensayos, en cada uno de los cuales el sujeto debía realizar ocho estimaciones de profundidad cromostereoscópica, una por cada uno de los ocho pequeños rectángulos sobrepuestos contra el enrejado de onda cuadrada que actuaba como fondo. Por tanto, se registraron 128 estimaciones de profundidad cromostereoscópica, resultantes de combinar 16(fondos) x 8(parches). A su vez, los 16 fondos resultan de combinar: 2 diferencias cromáticas (isocromáticas – anisocromáticas) con 2 diferencias en luminancia (isoluminantes – anisoluminantes) y con 4 matices cromáticos (R=rojo, G=verde, B=azul, Y=amarillo). Y los 8 parches (rectángulos cromáticos) surgen de combinar 4 (matices: R-G-B-Y) con 2 (franjas del enrejado: C3 y C4).

En cada ensayo, se le mostraba al sujeto un estímulo complejo de las características del que se muestra en la Figura 4 y el experimentador le pedía que estimase la profundidad relativa de los 8 parches rectangulares existentes en la columna 3 y 4. Las estimaciones debían ser tales que conservasen, de modo coherente con lo que percibía, las profundidades relativas, tanto por filas como por columnas. Es decir, ante cada uno de estos estímulos complejos el sujeto realizaba 8 estimaciones. Las instrucciones informaban al sujeto de su tarea en los siguientes términos:

La variable dependiente que nosotros registramos, en este experimento, fue la profundidad cromostereoscópica relativa, definida operacionalmente como la distancia en profundidad de cada parche rectangular (figura), caracterizada por un cierto color, con respecto al fondo en que inserta. La escala en la que el sujeto efectuaba las estimaciones oscilaba entre ± 10 . La secuencia experimental era analoga a la del Experimento 1.

Al presionar el experimentador la tecla de función F1, aparecían las ocho barras de respuesta y el botón de Aceptar. El experimentador arrastraba la barra correspondiente a cada rectángulo (figura) de

acuerdo con la respuesta del sujeto, de manera que la distancia desplazada por la barra reflejase la separación entre los rectángulos. La distancia de observación desde el sujeto hasta la pantalla (screen) era de 1m y la duración media de cada ensayo era de unos 90seg, por lo que la duración de la prueba completa era, aproximadamente, de 27min.

Un procedimiento de estas características nos debía permitir evidenciar la influencia del contraste en luminancia y del contraste en color en la percepción de la profundidad cromostereoscópica del sujeto.

Resultados

En primer lugar, con el fin de verificar si existe, o no, interacción entre el contraste en luminancia (mecanismo acromático) y el contraste en color (mecanismo acromático), existente entre los distintos fondos (franjas del enrejado de onda cuadrada) y las figuras (parches cromáticos), que provocan la cromostereopsis, realizamos un análisis de la varianza simple, comparando la profundidad percibida en los cuatro tipos de fondos diseñados, para todos los colores (R-G-B-Y), globalmente considerados. Los resultados mostraron diferencias significativas entre estas cuatro condiciones de prueba [$F(511, 3) = 112.43; p < .001$], como puede verse en Figura 5.

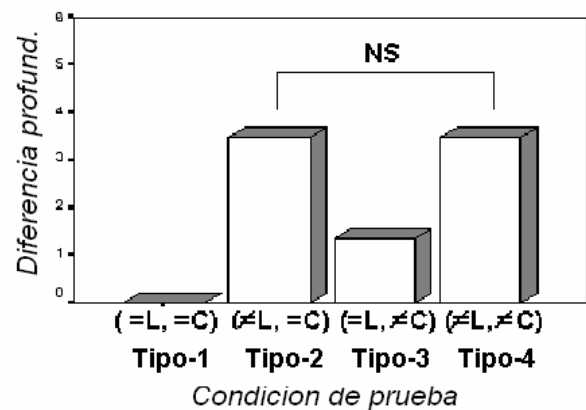


Figura 5. Comparación de la profundidad relativa media, percibida por los sujetos en las cuatro condiciones de prueba, que varían en fondo del enrejado cromático. Tipo-1: fondo isoluminante e isocromáticos (=Lo, =Co). Tipo-2: fondo anisoluminante e isocromáticos (≠Lo, =Co). Tipo-3: fondo isoluminante y anisocromáticos (=Lo, ≠Co). Tipo-4: fondo anisoluminante y anisocromático (≠Lo, ≠Co).

Realizamos la prueba de Bonferroni de contrastes a posteriori y reveló que todas las diferencias entre los pares de tipos de fondo (condiciones de prueba) alcanzaron una significación superior a $p < .001$, excepto entre el tipo-2 y tipo-4, cuya diferencia no se mostró significativa.

Sintéticamente, al comparar las medias de las estimaciones de profundidad relativas, según el tipo de fondo, sobre el que se realizan, podemos observar que: a) como es obvio, cuando no existe contraste ni en luminancia ni en color (fondo: =Lo, =Co), que es lo más parecido que hay a una situación de ganzsfels, al no segregarse una figura (parche rectangular) sobre un fondo, no se puede percibir profundidad; b) cuando está presente la variación en luminancia, la magnitud de la profundidad percibida es siempre mayor; c) al combinar ambas variaciones, en este experimento, no se pone de manifiesto un incremento en la magnitud de la profundidad percibida; d) en la condición de isoluminancia (=Lo, ¹Co), al igual que en el Experimento 1, también es posible percibir profundidad, exclusivamente basada en el color, aunque es de menor magnitud que cuando le acompaña también una variación en luminancia.

En segundo lugar, con el fin de analizar, de modo separado para cada color, si se producen efectos interactivos entre el contraste cromático y el contraste acromático, realizamos cuatro planes factoriales (análisis de la varianza) uno para cada color (RGBY), de acuerdo con el siguiente diseño experimental: 2 (Contrastes Cromáticos) x 2 (Contrastes Acromáticos). El factor Contraste Cromático consta de cuatro niveles, ya que cada color puede diferir en ángulo cromático (o longitud onda), consigo mismo o con los otros tres colores restantes. Por ejemplo, el color rojo será isocromático al insertarse un rectángulo rojo contra una franja roja (R-R), pero será anisocromático en los tres casos en los que el fondo tenga otro color: R-G, R-B, R-Y.

Los resultados de los cuatro planes factoriales realizados se muestran de modo resumido en la Tabla 3. Estos análisis revelaron la existencia de diferencias significativas en los efectos principales de la variación en luminancia de los cuatro colores estudiados. Sin embargo, no siempre se mostró significativo el efecto principal de la variación en color, ya que solo en el caso del color azul se alcanzó el nivel de significación

establecido. No obstante, la interacción de variación en luminancia x variación en color resultó significativa en todos los colores, excepto en el verde.

Tabla 3. Resultados de los tres ANOVAs, uno por cada pareja de colores (Rojo-Verde, Rojo-Azul, Verde-Azul), mostrando también la significación alcanzada, tanto para los efectos principales de los factores ΔL = contraste acromático y ΔC = contraste cromático, como para la interacción de primer orden $\Delta L \times \Delta C$.

	ΔL	ΔC	$\Delta L \times \Delta C$
ROJO	F(1,128)= 126,1 P <.001	F(3,128)= 5,3 P <.002	F(3,128)= 8,58 P <.001
VERDE	F(1,128)= 163,5 P <.001	F(3,128)= 2,9 P <.002	F(3,128)= 0,874 P <.457
AZUL	F(1,128)= 240,28 P <.001	F(3,128)= 30,22 P <.001	F(3,128)= 10,67 P <.001
AMARILLO	F(1,128)= 57,25 P <.001	F(3,128)= 6,81 P <.001	F(3,128)= 13,43 P <.001

A partir de estos resultados, podemos concluir que: 1) existe una débil interacción entre el mecanismo acromático y el cromático, y 2) como muestran las gráficas de la Figura 6, las respuestas de estos mecanismos parecen separables.

En dicha Figura 6, podemos observar con más detalle, y separadamente para cada color, la relación entre los dos factores objeto de estudio (contraste cromático y contraste en luminancia). En efecto, el panel superior izquierdo, que corresponde al color rojo, se observa que cuando no existen diferencias en luminancia entre figura-fondo (isoluminantes), la magnitud de la profundidad percibida es muy pequeña o nula, pero cuando existen diferencias en luminancia entre figura-fondo, la magnitud de la profundidad percibida se magnifica y en una cuantía diferente para cada par de colores. Un comportamiento similar se produce con respecto al color azul (panel inferior izquierdo) y, también, respecto al color amarillo (panel inferior derecho).

En el panel superior derecho correspondiente al color verde, podemos observar que las profundidades percibidas, cuando el factor Contraste en luminancia es nulo, también son pequeñas; sin embargo, son mayores cuando el contraste en luminancia es alto. En otras palabras, el factor

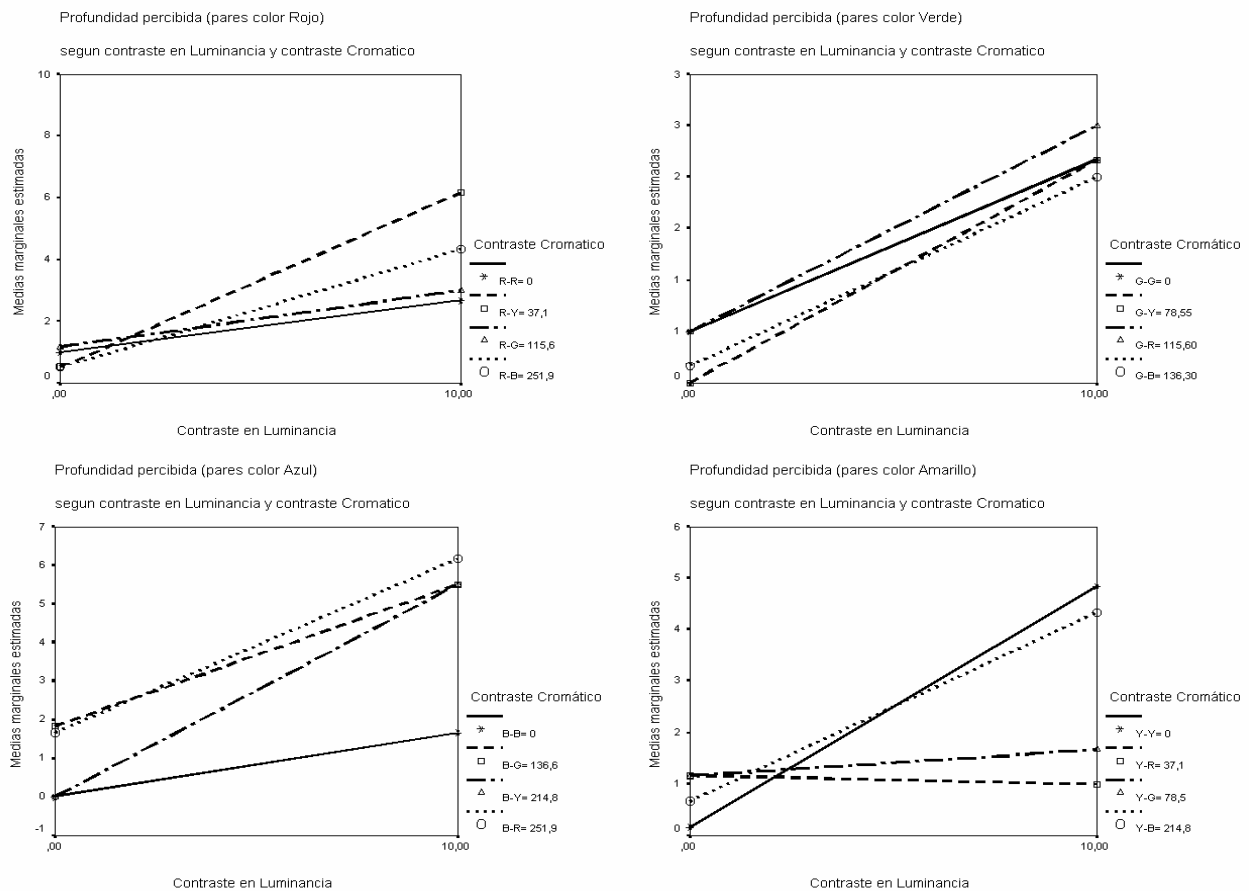


Figura 6. Para cada uno de los colores estudiados (R, G, B, Y) variación de la profundidad relativa media, en función del contraste cromático y acromático del fondo (enrejado) contra el que aparecen los parches cromáticos. Panel superior izquierdo, color rojo. Panel superior derecho, color verde. Panel inferior izquierdo, color azul. Panel inferior derecho, color amarillo.

Contraste en luminancia es independiente del factor Contraste cromático, lo que sugiere que, en este caso, los mecanismos respectivos actúan de modo aditivo.

Discusión general

El Experimento 1 ha puesto de relieve la importancia del contexto envolvente de las figuras, ya que la profundidad percibida depende de la diferencia de luminancia y no solo de la diferencia de longitud de onda entre el par de parches. Los datos de este experimento sugirieron la existencia de una interacción entre el mecanismo cromático y el mecanismo acromático. Para verificar, de un modo más completo, si existe o no existe interacción y, en caso afirmativo, que tipo de interacción relaciona ambos mecanismos, diseñamos el Experimento 2.

Del análisis de los resultados de estos experimentos podemos extraer las siguientes conclusiones. Primero, en contra de la tesis defendida por Gur y Akri (1992), el mecanismo cromático no parece contribuir a mejorar los logros basados en la luminancia. Ciertamente, la presencia de contraste cromático no aumenta la profundidad percibida en la cromoestereopsis. En segundo lugar, parece evidenciarse una débil interacción entre el mecanismo de la luminancia y el mecanismo del color, lo que implica que el sistema magnocelular interviene, de algún modo en el procesamiento del color. Efectivamente, hemos encontrado significativa la interacción *Contraste cromático x contraste acromático*, en todos los colores, excepto en el azul. Este hallazgo, está en contra de la tesis de Livingstone y Hubel (1987), y a favor de la tesis de Simmons y

Kingdom (1997), sin embargo, en el caso de la cromesteropsis no parece que operen estos mecanismos de modo independiente y aditivo, como ellos señalan, sino que interactúan para obtener mejor el efecto. En tercer lugar, como ha mostrado el experimento-1, el sentido de la profundidad cromostereoscópica parece venir dado por la diferencia de luminancia entre el fondo y la figura. Además, parece ser que el mecanismo acromático es fundamental en la génesis de la ilusión de profundidad cromostereoscópica, ya que la magnitud de la profundidad percibida viene modulada completamente por la variación en luminancia, jugando un papel secundario la variación en color. También es de resaltar, el hecho de que cuando se invierte el signo de la diferencia en luminancias (figura-fondo) también se invierte el signo de la profundidad percibida (flotando delante del fondo o hundido detrás del fondo, el parche cromático). Este *modus operandi* es acorde con un mecanismo que opera con polaridad oponente a la intensidad de la luz, precisamente como el mecanismo de procesamiento de la luminancia. Y, finalmente, las respuestas de estos dos mecanismos parecen separables.

Gur y Akri (1992) reflexionaron sobre la principal razón existente para utilizar estímulos isoluminantes con el fin de verificar si el mecanismo cromático es independiente o está relacionado con el mecanismo acromático. Según estos autores, la utilización extendida de estímulos cromáticos isoluminantes partió de De Valois y Jacobs (1984), quienes creían que al usar estímulos isoluminantes se estudiaba el mecanismo cromático aisladamente de la influencia del mecanismo acromático. Sin embargo, Gur y Akri señalaron que este razonamiento solo sería legítimo si fueran dos mecanismos independientes y aditivos. No obstante, cabe la posibilidad de que no sean independientes, sino que estén relacionados y, tal vez, se trate de dos respuestas separables producidas por un mismo mecanismo. Por ejemplo, como señalan Sankeralli y Mullen (2001) puede ser que exista un solo mecanismo con base fisiológica, cuya respuesta pueda separarse mediante la rectificación de semi-onda (Half Wave Rectification). Así, la respuesta del mecanismo de la luminancia se separaría en las vías ON y vías OFF

(mecanismo oponente), mientras que las respuestas del mecanismo cromático se separan en dos polos de color, los que la célula oponente espectralmente contenía.

Llegados a este punto, cabe preguntarse si la variación en color no incrementa la profundidad percibida en la cromostereopsis, respecto a la generada por la variación en luminancia, entonces para qué sirve la variación cromática, qué función desempeña. La respuesta obvia es que la variación cromática permite discriminar regiones isoluminantes que una especie acromatopsica sería incapaz de diferenciar, aunque ello tenga algún coste de procesamiento. Sin embargo, en la naturaleza, a diferencia de en el laboratorio, los estímulos útiles para la supervivencia de una especie varían tanto en luminancia como en color, por lo que disponer de dos mecanismos, que logran lo mismo, sería redundante para una especie con demandas no tan sutiles como las que nos exigimos los humanos. Y por disponer de este lujo de colorido que supone añadir el mecanismo cromático, se incrementaría el tiempo de procesamiento, tan necesario para escapar de sus depredadores, si es presa, o para cazarlos, si es depredador.

No obstante, para una especie como la humana, que requiere establecer tanto parcelaciones globales del espacio como sutiles discriminaciones (pensemos, por ejemplo, en una búsqueda visual sobre un mapa geográfico), el mecanismo del color nos permite establecer una segmentación tosca, pero rápida, de las imágenes captadas y, dentro de ese tosco espacio, el mecanismo de la luminancia nos permite detectar o discriminar detalles tan de grano fino como la separación entre dos parches cromáticos, o la localización de un pequeño pueblo en un mapa.

Por otra parte, si el sistema óptico del ojo es emétrope para el fondo amarillo (luz clara), entonces no puede enfocar correctamente los otros colores, por lo que será miope para el azul e hipermétrope para el rojo. Estas diferencias de enfoque de la lente producen la llamada Aberración cromática transversa (ACT) que, junto con la desigual eficiencia espectral provocada por la distinta oblicuidad de los rayos de una mancha de luz que alcanzan los conos (Efecto Stiles-Crawford), generan diferencias en la retina, tanto en la separación o desvío nasal (o temporal) de

los colores como en la intensidad de la luz que registran los fotosensores. Por tanto, parece claro que la causa responsable de la profundidad cromostereoscópica sea de naturaleza doble: cromática y acromática, pero en cualquier caso la causa será pre-retiniana y la interacción debe darse en este tempranísimo nivel del procesamiento visual.

Referencias

- Allen, R.C., & Rubin, M.L. (1981). Chromostereopsis. *Survey of Ophthalmology*, 26(1), 22-27.
- Aznar-Casanova, J.A., & Fernández-Titos, G. (2001). Modelos de computación de la disparidad binocular. *Cognitiva*, 13(1), 97-122.
- Burr, D.C., & Corsale, B. (2001). Dependency of reaction times to motion onset on luminance and chromatic contrast. *Vision Research*, 41(8), 1039-1048.
- Gur, M., & Akri, V. (1992). Isoluminant stimuli may not expose the full contribution of color to visual functioning: Spatial contrast sensitivity measurements indicate interaction between color and luminance processing. *Vision Research*, 32(7), 1253-1262.
- Howard, I.P., & Rogers, B.J. (1995). *Binocular Vision and Stereopsis*. Oxford: Oxford University Press.
- Hubel, D.H., & Livingstone, M.S. (1990). Color and contrast sensitivity in the lateral geniculate body and primary visual cortex of the macaque monkey. *The Journal of Neuroscience*, 10, 2223-2237.
- Jordan, J.R., Geisler, W.S., & Bovik, A.C. (1990). Color as a source of information in the stereo correspondence process. *Vision Research*, 30(12), 1955-1970.
- Julesz, B. (1971). *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago, University of Chicago Press.
- Kingdom, F.A.A., & Simmons, D.R. (1996). Stereo acuity and colour contrast. *Vision Research*, 36, 1311-1319.
- Kingdom, F. A. A., Li, H.C., & MacAulay, E.J. (2001). The role of chromatic contrast and luminance polarity in stereoscopic segmentation. *Vision Research*, 41, 375-383.
- Livingstone, M.S., & Hubel, D.H. (1984). Anatomy and physiology of a color system in the primate visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 4, 309-356.
- Livingstone, M.S., & Hubel, D.H. (1987). Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *Journal of Neuroscience*, 7, 3416-3468.
- Lu, C., & Fender, D.H. (1972). The interaction of color and luminance in stereoscopic vision. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 11, 482-490.
- Mullen, K.T. & Losada, M.A. (1994). Evidence for separate pathways for color and luminance detection mechanisms. *Journal of the Optical Society of America A*, 11(12), 3136-3151.
- Sankeralli, M.J., & Mullen, K.T. (2001). Bipolar or rectified chromatic detection mechanisms? *Visual Neuroscience*, 18(1), 127-135.
- Scharff, L.V., & Geisler, W.S. (1992). Stereopsis at isoluminance in the absence of chromatic aberrations. *Journal of the Optical Society of America*, 9(6), 868-876.
- Schor, C.M., & Wood, I. (1983). Disparity range for local stereopsis as a function of luminance spatial frequency. *Vision Research*, 23, 1649-1654.
- Simmons, D.R., & Kingdom, F.A.A. (1994). Contrast thresholds for stereoscopic depth identification with isoluminant and isochromatic stimuli. *Vision Research*, 34, 2971-2982.
- Simmons, D.R., & Kingdom, F.A.A. (1997). On the independence of chromatic and achromatic stereopsis mechanisms. *Vision Research*, 37, 1271-1280.
- Troscianko, T., Davidoff, J., Humphreys, G., Landis, T., Fahle, M., Greenle, M., Burgger, P., & Phillips, W. (1996). Human color discrimination based on a non-parvocellular pathway. *Current Biology*, 6(2), 200-210.

- Tyler, C.W., & Cavanagh, P. (1991). Purely chromatic perception of motion in depth: two eyes as sensitive as one. *Perception and Psychophysics*, 49(1), 53-61.
- De Valois, R.L., & Jacobs, G.H. (1984). Neural mechanisms of color vision. In I. Darian-Smith (Ed.), *Handbook of Physiology*, Sect. I, Vol. 3, (pp 425-456). Bethesda: American Physiological Society.
- De Valois, R.L., & De Valois, K.K. (1993). A multi-stage color model. *Vision research*, 33(8), 1053-1065.

Agradecimientos:

Le expreso mi gratitud al Dr Julio Lillo Jover, por su contribución en la selección de los parámetros de los estímulos cromáticos. También agradezco su ayuda a Daniel Linares, estudiante de postgrado que me ayudó a preparar algunas figuras y parte de la bibliografía. Finalmente, la ayuda de Elton H. Matsushima contribuyó a mejorar el trabajo, haciéndolo más compacto y sintético. Esta investigación fue financiada por una beca del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Dirección General de Investigación) de España (Ref.: BSO2001-3639).