







Conceptos Básicos sobre

Anatomía, Fisiología y Física del Color

(Segunda Parte)

Ing. Qco. Elías Jorge Matta

Instituto de Tecnología Celulósica, Facultad de Ingeniería Química, Santiago del Estero 2654, 3000 Santa Fe.
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC) UNL – CONICET, Guemes 3450, 3000 Santa Fe. Universidad Nacional del Litoral, República Argentina. ematta@intec.unl.edu.ar

Resumen. Se analizan los aspectos fundamentales de la anatomía y fisiología de la visión humana, particularmente las células fotorreceptoras (conos y bastones), sus características y distribución en la retina. Especial atención merecen el concepto de tricromaticidad y luminosidad, que involucran necesariamente el principio univariante y el de antagonismo (opponent) color. Muy brevemente se tocan aspectos del sistema colorimétrico CIE, básicamente las funciones de eficiencia luminosa y el espacio color 1931, 1964 y recientes modificaciones.

Palabras Claves: anatomía del ojo; retina; conos y bastones; fotopigmentos; mecanismos visuales; filtros post-receptores; eficiencia luminosa; diagrama cromático CIE.

1. Introducción

En la Primera Parte de este trabajo (Matta, 2010), se revisaron los conceptos físicos involucrados en el color de la luz y de los objetos. Esta Segunda Parte explora, sintéticamente, los aspectos de la anatomía y la fisiología involucrados con la visión humana. También, aún más sucintamente, cómo los mecanismos de la visión se utilizaron para "modelar" el primer y más importante sistema colorimétrico aún vigente, creado durante las décadas de 1920/1930. Todos estos aspectos son de la mayor importancia para comenzar a comprender cómo funciona el color y la colorimetría.

Si la rigurosidad y niveles de abstracción de la Física del Color son difíciles de comprender y manejar, la bastedad y complejidad de los mecanismos de la visión humana nos abruma, no únicamente a los legos en estas disciplinas, también a los científicos expertos que trabajan en ella. Esto motiva al autor (lego él también) a pedir disculpas a los lectores – anticipadamente, por cualquier confusión que pudiera generar este escrito. Su intención no va más allá de poner en contacto al lector con el problema (apasionante, sin dudas) y con los especialistas aquí citados.

2. Anatomía del Ojo Humano

2.1. El Camino de la luz

El recorrido de la luz - desde una fuente luminosa, un ambiente o un obieto iluminado, hasta el cerebro, incluye básicamente dos etapas. En la primera de ellas (etapa óptica), la luz pasa por cinco portales (medios) diferentes dentro del ojo hasta llegar a las capas más lejanas de la Retina, en el siguiente orden (Figura 1): la Córnea, el Humor Acuoso, el Cristalino, el Humor Vítreo y las células transparentes de la Retina próximas al Humor Vítreo. En la segunda etapa, la luz activa los neurotransmisores químicos de la capa más lejana de la Retina, los que transportan su información en sentido inverso a la luz (Figura 2), hasta las células transparentes y desde allí, vía Nervio Optico, al Cerebro (MacEvoy, 2009, Solomon et al., 2007; Willoughby et al., 2010). Describiremos sucintamente estos cinco medios, de gran importancia para la visión (Figura 1).

2.1.1. *La Córnea*. Responsable - junto con el cristalino, de refractar la luz a fin de lograr una nítida imagen en la retina.

Es la parte más externa, clara e importante del sistema óptico del ojo. Está cubierta y protegida por los párpados, que permiten regular a voluntad (aunque sólo imperfectamente) la luz que ingresa al ojo.

2.1.2. El humor acuoso. Es un líquido transparente que nutre y oxigena la córnea y el cristalino. Genera también la presión intraocular que contribuye a mantener la forma de la cornea. Está compuesto por aqua y un 2% de sales, glucosa y material proteico. Si bien contribuye a la refracción de la luz, su aporte es muy inferior a la del cristalino. 2.1.3. El Cristalino (the lens, en inglés). Es una estructura multicapas, perfectamente clara, transparente y bastante elástica en los seres humanos menores de 40 años. Con menor capacidad de refracción que la córnea, su capacidad de conformación (acomodación) la convierte en la herramienta de "ajuste fino" para lograr una imagen nítida y bien enfocada, se trate de objetos lejanos o muy cercanos. El trabajo del cristalino está asistido por el *Iris*, una membrana que se abre o se cierra involuntariamente regulando con mucha eficacia la cantidad de luz que llega a la retina. Esta regulación de la apertura del iris (Pupila) permite enfocar nítidamente dos objetos muy distantes en la direc-

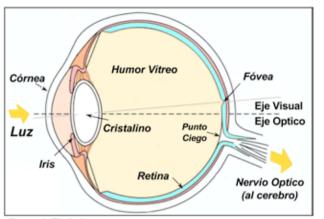


Figura 1. El ojo humano

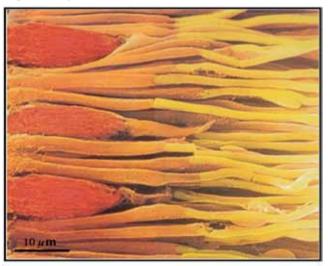


Figura 3. Bastones y Conos (Kolb, 2007)

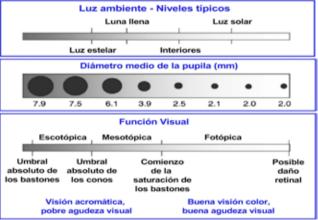


Figura 6. Ilumínación y Funciones Visuales (Sharpe et al., 2008)

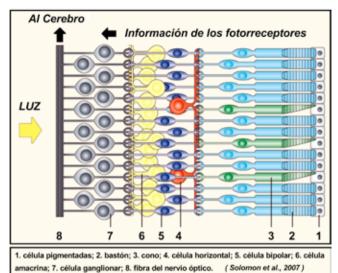


Figura 2. Células de la Retina

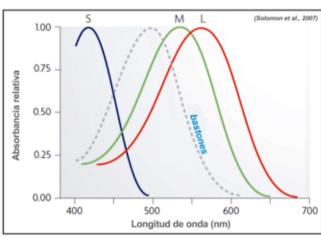


Figura 4. Distintos Fotopigmentos de la Retina

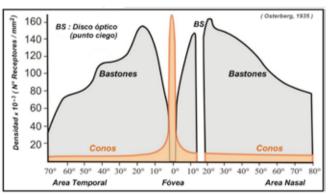


Figura 5a. Distribución de los Fotorreceptores en la Retina

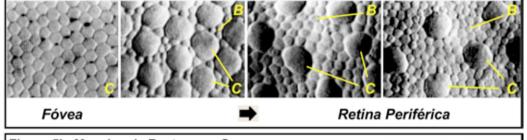
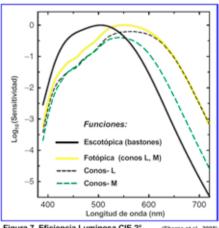
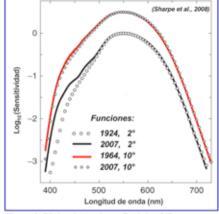


Figura 5b. Mosaico de Bastones y Conos

(Glassner, Wandell y otros)





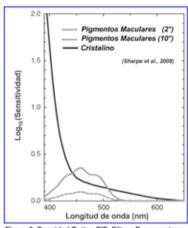
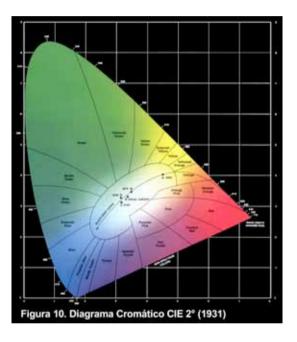
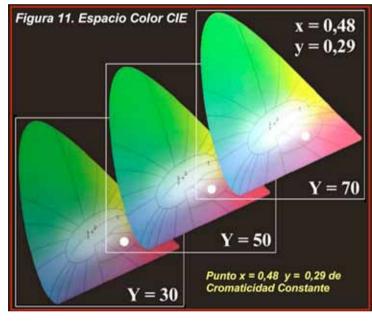


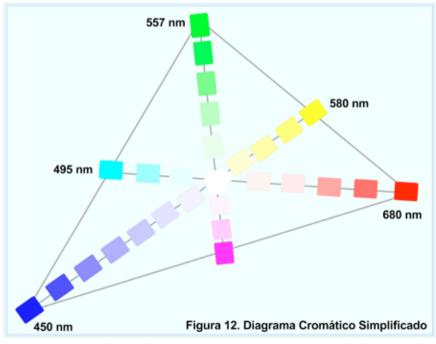
Figura 7. Eficiencia Luminosa CIE 2°

Figura 8. Eficiencia Luminosa Fotópica CIE

Figura 9. Densidad Optica CIE. Filtros Pre-receptores







ción del eje óptico, así como "aislar" un objeto de otros relativamente cercanos. Esta función, conocida como "control de la profundidad de campo" (control de la distancia focal) es similar al trabajo de apertura/cierre del diafragma en una cámara fotográfica.

2.1.4. El Humor Vítreo. Es un líquido gelatinoso, claro y transparente que llena el espacio comprendido entre el cristalino y la retina. Más denso que el humor acuoso, es 99% aqua y sólo 1% de sales y proteínas. El humor vítreo contribuye a mantener la forma del ojo y consequir una superficie uniforme de la retina, esencial para formar una imagen nítida.

2.1.5. La Retina. Es un conjunto de células, cuya principal función es convertir (trasducir) la luz (la imagen) en señales químicas comprensibles para el cerebro.

La luz llega a la retina por el eje visual, justo sobre la **fóvea**, un área de sólo 1,5 mm de diámetros, contenida dentro de la **mácula** (macula lutea), región de poco más de 5 mm de diámetro. Esto constituye la llamada retina central; la retina periférica se extiende varios mm más allá, siguiendo el eje nasal-temporal. El eje óptico (anatómico) no coincide exactamente con el eje visual (el camino de la luz) porque el cristalino se encuentra ligeramente descentrado hacia abajo y en dirección a la nariz (Willoughby et al., 2010).

Las capas de la retina interiores al ojo (Figura 2) están formadas por células transparentes, mientras que hacia el exterior (al fondo del ojo) se encuentran las únicas células fotorreceptoras (photoreceptors) del sistema visual, conos y bastones (ver también Figura 3). La luz llega hasta las células pigmentadas de los conos y bastones y es absorbida por los fotopigmentos. La información que cada cambio genera se mueve hacia atrás, pasando por todas las células entre el fotorreceptor y la fibra del nervio óptico. Estas células cumplen una importante función en la interpretación y selección de la información que llegará al cerebro ("filtrado"), que no cubriremos en el texto. En adelante las mencionaremos únicamente como los "filtros postreceptores" (Solomon et al., 2007).

En los humanos hay toda una línea de estos filtros post-receptores y una fibra del nervio óptico por cada fotorreceptor, generando una conexión directa del mismo con el cerebro, a diferencia del sistema de visión en otros seres vivos. Detrás de la retina y al final de la ruta de la luz hay un epitelio pigmentado (pigment epithelium), que contiene células que absorben prácticamente toda la luz no capturada por los fotorreceptores. Su función primaria es reducir la "recirculación" de la luz por reflexión dispersa (scattering) (Matta, 2010), lo que generaría pérdida de aqudeza visual. Todas las especies diurnas poseen epitelios oscuros, mientras que las nocturnas poseen un "tapetum", una adaptación muy reflectante que duplica la sensibilidad luminosa, devolviendo como un espejo todos los fotones no absorbidos en primera instancia (McCourt, 2003).

2.2. Conos y Bastones

2.2.1 Un Balance de los Fotorreceptores Sólo hay un tipo de bastones y tres clases de conos; los pigmentos o cromóforos de cada uno de ellos responden preferentemente a una definida sensibilidad y absorbancia espectral (Figura 4). Los bastones, con un máximo relativo un poco superior a los 500 nm; los conos-S a los 430 nm (azul), los conos-M a 530 nm (verde) y los conos-L a los 560 nm (rojo). Estos valores varían según el método de medición y el grupo de individuos analizados (Solomon et al., 2007).

El espesor de la retina humana es de unos 0,2 mm de espesor, y tiene una superficie de 1.100 mm2. El total de células neuronales es aproximadamente de 200 millones, de las cuales 120 millones son bastones y sólo 1 millón son conos. Para marcar aún más las diferencias, se estima que cada bastón posee 109 moléculas de cromóforos, contra alrededor de 105 o 106 moléculas para cada cono. La relación de conos L/M varía desde aproximadamente 1 en la fóvea, creciendo hacia la periferia hasta 10 o más, aunque en la mayoría de los individuos no supera el valor de 3,0 -3.5. Los conos-S representan únicamente el 5-10% del total de conos (MacEvoy, 2009; Mollon, 1992; Tham, 2007).

2.2.2 Distribución de Conos y Bastones en la Retina

Conos y bastones no están distribuidos uniformemente sobre la retina. La fóvea contiene únicamente conos L y M, estando totalmente ausentes los bastones y conos-S. A medida que nos alejamos de la misma hacia la periferia, crece el número de bastones y también el tamaño de los conos, hasta un punto en la que la densidad de los bastones comienza a decrecer. En la Figura 5a, el perfil de densidades y en la Figura 5b, micrografías (SEM) del corte transversal de los receptores (MacEvoy, 2009; Mollon et al., 1992; Solomon et al., 2007). Los distintos conos forman en cualquier parte de la retina un mosaico que ha demostrado ser prácticamente aleatorio, o dicho de otra manera, no sique ningún patrón determinado (Solomon et al., 2007).

3. Los Mecanismos de la Visión

3.1 Fotopiamentos

Cada molécula de fotopigmentos consiste en dos partes: un corto cromóforo derivado de la vitamina A retinal v una proteína (opsina). Estos complejos formados por el cromóforo y la proteína, genéricamente llamados rodopsinas, no son tan diferentes en los distintos fotorreceptores; si bien las proteínas varían, la disimilitud principal está en la sensibilidad espectral de la molécula fotosensible o cromóforo (Figura 4). Las rodopsinas tienen un color oscuro opaco. Cuando el cromóforo absorbe un fotón, el complejo sufre un estero-isomerización (un cambio en su estructura tridimensional), cambia su color al amarillo muy claro y se vuelve transparente a la luz. Simultáneamente, envía una señal a las células post-receptores y desde allí – eventualmente, hacia el cerebro. El proceso se denomina usualmente como "blanqueo" del cromóforo. Si todos los cromóforos de un fotorreceptor están blanqueados, este deia de enviar señales al cerebro.

Luego del cambio estructural, el piqmento es regenerado o reensamblado desde los componentes blanqueados. Menos del 1% del total de pigmentos blanqueados en un cono es regenerado cada segundo, de lo que resulta que durante el día únicamente el 50% de los pigmentos no está blanqueado en un momento dado (MacEvoy, 2009). La velocidad de regeneración del los cromóforos depende del fotorreceptor y de la luminosidad que llega hasta los mismos. La sensibilidad a la luz de los bastones es muy superior a la de los conos, pero su velocidad de regeneración es relativamente lenta. Los conos son menos sensibles a la luz, pero su regeneración es rápida, de modo que en menos de 10 min de oscuridad más del 90% de los cromóforos se ha regenerado. En cualquier caso, la regeneración es total luego de 30 min en total oscuridad. Este mecanismo tan familiar de la visión se conoce como "adaptación a la oscuridad" y participan del mismo fundamentalmente los bastones y los conos-M (Sharpe et al., 2008). Además de su inmensa capacidad individual de capturar fotones, aparentemente cada bastón se "comunica" con las

células homólogas vecinas (generando sinapsis). Esto incrementa varias veces más la probabilidad de detectar un único fotón y los convierte en los más aptos para manejar la luminosidad de la visión nocturna (dim vision). Por otra parte, como veremos, los conos L y M controlan la luminosidad a plena luz del día o de fuentes artificiales de alta intensidad (Tham, 2007).

3.2 Los Conos y la Cromaticidad (Color Vision)

3.2.1 El Principio Univariante Cada único fotopigmento es "ciego al color" o acromático (color blind), ya que cualquier combinación adecuada de longitud e intensidad de la onda puede resultar en una idéntica respuesta neuronal. Este es el principio univariante (univariance principle). Dicho de otra manera, la sensibilidad de un sólo tipo de pigmento a una longitud de onda determinada (530 nm para los conos-M) sólo indica la mayor posibilidad de absorber fotones en ese rango espectral. Después de la absorción, la probabilidad no se aplica a la respuesta del fotorreceptor y la "identidad" cromática del fotón se pierde. Si hay dos o tres tipos de numerosos pigmentos con diferentes afinidades espectrales, la cuestión cambia sustancialmente. Ahora las respuestas serán sin duda diferentes: la visión del color, la habilidad de distinquir la luz de diferentes composiciones espectrales, independientemente de la intensidad, depende de la comparación de las señales entre conos con diferentes sensibilidades espectrales (Brainard et al., 2000; Solomon et al., 2007).

La presencia de tres tipos de conos fotorreceptores hace de la visión humana "tricromática" o "tristímulo". Unicamente es dicromática en la fóvea (ver 2.2.2) o cuando se producen anomalías genéticas que dejan al individuo con sólo dos tipos de conos y alteraciones en la vision color. Se sabe desde hace tiempo que la percepción cromática se altera "de a pares" en dos dimensiones principales: rojo-verde, por cambios en la sensibilidad espectral de los conos-M (deuteroanomalía, "daltonismo") y azulamarillo, por mutaciones que modifican los conos-L (protoanomalía). Volveremos

con la alteración "de a pares" en la sección siguiente (Solomon et al., 2007). También los bastones obedecen el principio univariante, pero debido al funcionamiento de los filtros post-receptores, la respuesta de los mismos es acromática y únicamente aporta al eje de la luminosidad.

3.2.2 La relación L/M. El Concepto de Antagonismo (opponents)

Trataremos de explicar aquí la posible incidencia en la visión de la sensible diferencia numérica entre conos-L v conos-M, así como la percepción de las dimensiones rojo-verde (L v M), un capítulo aun no concluido por la ciencia. Se ha visto que la distinción espectral de la luz sólo es posible cuando se comparan las señales de todos los fotorreceptores simultáneamente. Un mecanismo bastantes similar hace que la combinación de respuestas de los conos-L (rojos) y conos-M (verde) generen en el cerebro la percepción del amarillo. Rojo y verde son antagónicos; si se incrementa la proporción de rojo, el amarillo debiera tender al naranja. Está demostrado sin embargo que diferentes observadores con relaciones L/M tan variables como 0,4 a 3,5...perciben ¡el mismo y un único amarillo! Esto deja en claro que la relación L/M no controla por si solo la percepción del amarillo. Otras experiencias - aparentemente contradictoria, muestran claramente que el "único amarillo" varía de longitud de onda para diversos grupos, sin cambios significativos entre unos y otros en la relación L/M. La teoría más aceptada explica que para comprender las variaciones espectrales del amarillo debe asociarse la relación L/M con la experiencia de los individuos o poblaciones con el medio ambiente, las experiencias cromáticas durante su desarrollo que le permitieron "calibrar" su visión color (Brainard et al., 2000).

Por otra parte, como se vio anteriormente, si se altera la sensibilidad de los conos-M dejamos de percibir tanto el verde como el rojo y el rango de los amarillos varía erráticamente. Puede decirse que no pueden percibirse adecuadamente las respuestas de los conos L y M por falta de una referencia antagónica.

3.2.3 Filtros Pre-receptores (prereceptoral filtering)

Varias partes del ojo actúan como filtros, básicamente para evitar que la luz con longitudes de onda corta inferiores a los 420 nm llegue a la retina, dañando los fotorreceptores (como lo hace con la piel) y generando otros problemas de visión. Los filtros más importantes son la córnea, el cristalino y el pigmento protectivo macular (MPP), un pequeño pero denso parche de pigmento protectivo macular amarillo, que aparece como un ligero oscurecimiento sobre el tejido en la retina normal. En todos los casos, el mecanismo de "filtrado" se basa en los principios analizados en la primera parte (Matta, 2010), fundamentalmente la combinación de dispersión (scattering) v absorción luminosa.

La córnea filtra hasta el 40% de la luz incidente de baja longitud de onda. El cristalino bloquea al menos el 25% de la luz por debajo de 450 nm y el 50% o más en longitudes de onda por debajo de 430 nm. Por último, el pigmento macular filtra el 25% o más de luz entre 430 nm y 500 nm que llega a la fóvea. En el adulto promedio, todos los filtros combinados eliminan la mitad o más de la luz incidente en longitudes de onda por debajo de 490 nm y casi toda la luz por debajo de 400 nm. Sin embargo, este filtrado pre-receptores varía significativamente entre individuos de cualquier grupo y entre distintos grupos de población. El filtrado resulta particularmente efectivo con la retina expuesta a luz intensa (pequeño tamaño de la pupila y elevado blanqueo de los fotopigmentos).

Por otro lado, todo el trayecto ocular absorbe luz por arriba de 650 nm, aunque estaría demostrado que el cristalino no participa directamente en el filtrado de luz en el rojo o longitudes mayores (MacEvoy, 2009; UCL, 2010).

Es obvio que la presencia de estos filtros modifica la sensibilidad espectral de los fotorreceptores, que resulta así diferente a la sensibilidad de los pigmentos correspondientes (Figura 4), especialmente en el caso de conos-S (ver también la Figura 9).

La variabilidad en la densidad del cristalino y la pigmentación macular de diferentes individuos son también la fuente de gran incertidumbre cuando se mide la sensibilidad espectral de los conos a través de la cornea.

4. La Luminosidad y la Efectiva Percepción de la Luz

4.1 Rangos de la Visión

La visión humana puede funcionar en un amplio rango de energía radiante: desde la luz estelar débil, de donde se absorben tan poco como 7 fotones por cada bastón (el umbral de detección) hasta la intensa luz solar, donde se absorben tanto como 106 fotones por cono y por segundo, lo que "blanquea" todos sus fotopigmentos y encandila al observador. El rango se divide en tres regiones dependiendo de cuál de los dos tipos de fotorreceptores, bastones o conos, está funcionando (Figura 6).

La región escotópica u oscura, en la que sólo los bastones pueden desenvolverse, comprende el nivel luminoso que va del umbral absoluto de los bastones (mínimo nivel de luz) hasta el umbral absoluto de los conos. La *mesotópica* (central), donde operan correctamente tanto los bastones como los conos, va desde el umbral absoluto de los conos hasta el punto donde comienza la saturación de los bastones. Finalmente la región más luminosa o *fotópica*, donde únicamente intervienen los conos, que va desde la saturación de los bastones hasta el más alto nivel de "blangueo" de los conos (Sharpe et al., 2008).

Dentro de cada región, la luminosidad percibida incrementa con el aumento de la energía radiante exterior, aunque no en forma lineal, debido a diferentes mecanismos de la visión, entre los cuales la disminución de las pupilas es la más importante fuera de la retina, pero muy por debajo en eficiencia respecto a los mecanismos post-receptores y cerebrales (Brainard et al., 2000; Sharpe et al., 2008).

4.2 El Sistema Colorimétrico CIE

La Comisión Internacional de Iluminación - conocido comúnmente como CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), es una organización independiente, sin fines de lucro, que se dedica a la cooperación mundial y el intercambio de información sobre todos los asuntos relacionados con la ciencia

y el arte de la luz y la iluminación, el color y la visión. En las últimas décadas, aplicada también a la fotobiología y la tecnología de la imagen. Desde su creación en 1913, el CIE se ha convertido en una organización profesional y ha sido aceptado como la representación de la mejor autoridad en la materia y como tal está reconocido por la ISO como un organismo internacional de normalización.

Uno de sus mayores logros fue desarrollar - a partir de 1920 y con el concurso de numerosos profesionales de la medicina, la física, la psicología y la matemática, diversos modelos, normas y Standard, que permitieron consolidar en 1931 un sistema colorimétrico único en el mundo para la fecha. El mismo se fue ampliando y corrigiendo con los años, pero las bases generadas en sus primeros 20 años perduran y están vigentes en la actualidad.

En este trabajo únicamente podremos dar una rápida mirada a dos pilares del sistema, las Funciones de Eficiencia Luminosa y el Espacio Color CIE.

4.3 Funciones de Eficiencia Luminosa

Para la fotometría y la colorimetría, es importante lograr métodos que permitan conocer la luminosidad efectivamente percibida por el cerebro, de cualquier longitud de onda o mezcla de ellas, denominadas usualmente Funciones de Eficiencia o Sensibilidad Luminosa. En los humanos no hay relación directa entre estímulo y percepción en todos los casos; además, las funciones deben ser aditivas, para poder componer las señales de diferentes receptores cuando los mismos operan simultáneamente, lo que es sencillo en algunos casos e imposible en otros (Sharpe et al., 2008). Se debe tener en cuenta los tres niveles de luminosidad; considerar que bastones v conos no tienen la misma sensibilidad espectral. También que no todas las longitudes de onda contribuyen a la sensación luminosa de la misma manera. Tanto en el caso de los bastones como de los cono, las longitudes en el centro del espectro visible - las que denominamos verdes, son mucho mas efectivas visualmente (luminosidad) que aquellas en los extremos del rango y que conocemos como azules y rojos. En

parte debido a la respuesta espectral de sus fotopigmentos (Figura 4), en parte debido a la acción de los filtros pre-receptores y en gran medida por la función que desempeñan los filtros postreceptores.

En consecuencia, es imprescindible desarrollar las funciones tanto desde los principios como en forma experimental, con modelos aproximados o exactos, aplicable en un amplio rango o sólo en zonas muy acotadas. Problema muy usual en ciencias, que no invalida su practicidad y rigurosidad, sólo restringe su generalización.

4.3.1 Función Luminosa Escotópica

La medición de la eficiencia luminosa escotópica es relativamente directa, porque sólo depende de los bastones, cuya respuesta es univariante y también aditiva. En Figura 7, la Eficiencia Luminosa CIE 2°, publicada en 1951. Aquí la luminosidad está restringido a la visión de un ángulo sólido de 2º con respecto al eje visual, es decir que involucra fundamentalmente a los bastones en la mácula. También a los conos de dicha superficie, largamente dominados por los conos-L y M de la fóvea, lo que permite incluir la Eficiencia Fotópica, aguí una función aditiva de la eficiencia de dichos conos. En ambos casos, la fuente de luz debe estar perfectamente definida por su curva intensidad-longitud de onda.

4.3.2 Función Luminosa Mesotópica

La medición, estimación o modelado de la eficiencia mesotópica ha demostrado ser inaccesible para la ciencia hasta la fecha, en gran medida por la operación simultánea de bastones y conos. Todos los intentos resultaron inadecuados, motivo por el cual no existe un Standard internacional en uso (Sharpe et al., 2008).

4.3.3 Eficiencia Luminosa Fotópica (conos)

Las dificultades que se presenta aquí pueden resumirse en dos. Primero, están operando al menos dos tipos de conos y entran en juego los filtros post-receptores. Si estos resultan color-antagónicos (color opponents) y por lo tanto las respuestas no son aditivas, estas se

vuelven espectro-dependiente (longitud de onda dependiente) y también la función eficiencia luminosa. Segundo, incluso para casos muy concretos y restringidos donde puede aceptarse la aditividad, la función no cuenta con una sensibilidad espectral definida, sino que cambia con la adaptación cromática del observador a su medio ambiente de referencia (ver 3.2.2). Por ello, cualquier función de eficiencia luminosa fotópica sólo es estrictamente aplicable bajo las condiciones en que se midió.

La Figura 8 muestra las funciones fotópica CIE 2° (1924) y 10° (1964) y sus modificaciones: en 2007 se publicaron correcciones a esta funciones, recomendadas por CIE, donde se aplican las mas recientes mediciones de la densidad óptica media del cristalino y el área pigmentada que protege la mácula (Figura 9). Como era previsible, prácticamente no hay modificaciones en las funciones de 10°, que incluye una superficie retinal mayor y un número discreto de conos-S. La de 2° tampoco muestra mayores cambios, exceptuando el área de bajas longitudes de onda, mostrando el efecto de alguna sobreestimación del efecto del cristalino y los pigmentos maculares (en las mediciones 1924) sobre la luz de baja longitud de onda (comparar Figuras 8 y 9).

En cualquier caso, resulta evidente que la eficiencia luminosa máxima está en la zona del verde, entre 520 y 560 nm, un poco mas baja para la función escotópica que para la fotópica. También que el aporte luminoso que llega al cerebro es proporcionalmente muy pobre debajo de 430 nm y por arriba de 650 nm (Sharpe et al., 2008).

5. El Espacio Color CIE

De los conceptos básicos sobre la visión humana revisados en este trabajo, resalta la diferenciación muy clara entre una dimensión (o plano) cromática y una dimensión (o eje) luminosa – independientes entre sí, que en conjunto dan forma al espacio del color para la visión fotópica (diurna y cotidiana). En 1931, CIE plasma este concepto en el mundo de la colorimetría con su Diagrama Cromático de 2º (Figura 10), diversas normas de estandarización y el cálculo de la Luminosidad correspondiente.

El Diagrama Cromático sintetiza (con algunas simplificaciones menores) la tricomaticidad de la visión humana (3.2.1 v 3.2.2), que en términos colorimétricos implica la medición de la respuesta de un espectrofotocolorímetro en tres diferentes longitudes de onda, equivalentes a la respuesta (output) de los tres tipos de conos para poder determinar tanto la cromaticidad como la luminosidad de la muestra. Para el Standard CIE (a partir de la Eficiencia Luminosa y otras funciones no analizadas aquí) esas respuestas se miden a 450 nm (conos-S, azul), 557 nm (conos-M, verde) y 685 nm (conos-L, rojo). La luminosidad es un invariante del sistema que se corresponde con la lectura a 557 nm (verde), de acuerdo a lo expuesto en 4.3.3 y Figura 8 (Mark et al., 1983).

Se han construido diferentes proyecciones del espacio color, pero el esquema simple de la Figura 11 explica claramente lo expuesto. En la misma, tres diferentes colores, con la misma cromaticidad (x,y) se representa en el mismo Diagrama Cromático, pero a tres diferentes niveles de Luminosidad (Y). En 1964, CIE presenta una nueva versión de la Eficiencia Luminosa, más representativa de la luz día (iluminante D65) y ángulo sólido nominal de 10° y simultáneamente un modificado Diagrama Cromático. Ambos Diagramas aun están vigentes al día de hoy, a pesar de las correcciones que se le han introducido; han aparecido también diferentes proyecciones, impuestas por el uso en diferentes tecnologías (L,a,b es una de las más conocidas), pero se pasa de una cualquiera a todas las demás con diferentes coeficientes CIE y el cálculo de simples ecuaciones algebraicas.

La Figura 12 es un esquema simplificado y "discreto" del Diagrama Cromático, que permite visualizar los conceptos sobre color explicados en la Primera Parte (Matta, 2010): colores luz aditivos y colores objeto sustractivos, todos sobre un mismo plano; también claramente definidos los colores complementarios Amarillo-Azul, Cian-Rojo y Magenta-Verde. Recordar que el centro del Diagrama no representa al Blanco sino al acromático Gris, mezcla proporcional de cualquiera de los complementarios.

Bibliografía

Brainard, H., Roorda, A., Yamauchi, Y., Calderone, J., Metha, A., Neitz, M., Neitz, J., Williams, D., Jacobs, G. (2000) "Functional consequences of the relative numbers of L and M cones" J. Opt. Soc. Am. (JOSA A). Vol. 17, No. 3, pp. 607-614. ISSN 1084-7529. OCIS codes 330.1690, 330.1720, 330.5510, 330.5310.; doi:10.1364/JOSAA.17.000607. Kolb, H. (2007) "Photoreceptors" http://www.ncbi.nlm.nih.gov/bookshelf/ br.fcgi?book=webvision&part=A112 MacEvoy, B. (2009) "Color Vision. Light and the eye" http://www.handprint.com/HP/WCL/color1.html Mark, R., Murukami, K. (1983) "Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard. Volume 1, Section Three. Colorimetry". Marcel Dekker Inc., New York. ISBN 0-8247-1871-2 Matta, E. (2010) "Conceptos Básicos sobre Anatomía, Fisiología y Física del Color. Primera Parte", Ecociencia y Naturaleza, N° 20, p. 46-48, ISSN 1851-0620. McCourt, M. (2003) "Anatomy and Physiology of the Retina", North Dakota State University Fargo, N.D. http://www.psych.ndsu.nodak.edu/mccourt/ Psy460/Anatomy%20and%20physiology%20 of%20the%20retina/Anatomy%20and%20 physiology%20of%20the%20retina.html Mollon, J., Bowmaker, J. (1992) "The spatial arrangement of cones in the primate fovea" Nature 360, pp. 677 - 679. ISSN: 0028-0836 Sharpe, L., Stockman, A. (2008) "Luminous Efficiency Functions". From "VISUAL TRANSDUCTION AND NON-VISUAL LIGHT PERCEPTION, CHAPTER 15" Ophthalmology Research, VI, pp 329-351. DOI: 10.1007/978-1-59745-374-5 15. Edited by: J. Tombran-Tink and C. J. Barnstable © Humana Press, Totowa, NJ, ISBN 978-1-58829-957-4; e-ISBN: 978-1-59745-374-5. Solomon, S., Lennie, P. (2007) "The machinery of colour vision", Nature Reviews Nuroscience, Vol. 8, pp. 276-286. ISSN: 1471-003X. http://www.nature.com/reviews/neuro Tham, C. (2007) "Stochastic Resonancs in Vision: Models and Data", Manchester Institute for Mathematical Sciences, School of Mathematics, The University of Manchester. MIMS EPrint: 2007.7 ISSN 1749-9097 http://eprints.ma.man.ac.uk/691/01/ covered/MIMS_ep2007_7.pdf UCL (2010) "Prereceptoral filters", University College London. Colour & Vision Research laboratory and database. http://cvision.ucsd. edu/database/text/intros/intromaclens.htm Willoughby, C., Ponzin, D., Ferrari, S., Landau, K., Omidi, Y. (2010) "Anatomy and physiology of the human eye: effects of mucopolysaccharidoses disease on structure and function - a review". Clinical and Experimental Ophthalmology, Vol 38, pp 2-11.