

El poder del ojo adaptado a la oscuridad

Raúl Martínez López , OC nº 13.406

Las habilidades de percepción del órgano visual para discriminar objetos en ambientes con intensidades de luz dispares se deben a que nuestra retina es mixta, y contiene tanto conos como bastones. Estos últimos, son las células responsables de nuestra visión nocturna y sólo transmiten información con intensidades lumínicas bajas. A medida que permanecemos en un entorno escotópico, la sensibilidad aumenta de forma espectacular debido a dos razones: El enorme incremento de concentración del fotorpigmento de los bastones, que dispara su producción, y a cambios en la red neuronal que se ajusta a estímulos más débiles y promueve la sumación de señales de varios fotorreceptores para aumentar la respuesta final. El límite de máxima sensibilidad en la obscuridad representa una energía tan minúscula que está íntimamente relacionada con la naturaleza corpuscular de la luz y su propio límite físico.

Palabras clave

Transducción, rodopsina, visión escotópica, umbral absoluto, curva de adaptación a la oscuridad, suma- ción espacial, fotón.

Introducción

De todos es conocida la capacidad de nuestro sistema visual de habituarse a distintas condiciones ambientales, entre ellas una de las más mutables es la variación de la iluminación. Si entramos en una estancia oscura de repente, como habitualmente hacemos en el caso de un cine, observaremos que tenemos dificultades para localizar nuestros asientos y distinguir al resto de los asistentes. Sin embargo, pasados unos minutos descubrimos que somos capaces de ver, con completo lujo de detalles, todo el entorno que nos rodea y que antes nos parecía excesivamente oscuro.

Todo esto es debido a la adaptación que experimenta el conjunto del aparato visual como respuesta a los distintos cambios de iluminación a los que se ve sometido. Las variaciones que permiten la adaptación a la cantidad de luz se producen en ciertas estructuras del órgano visual, pero sobre todo ocurren cambios fundamentales a nivel de retina y en células neuronales superiores ligadas íntimamente con ella.

Desarrollo

La retina

La retina es un tejido extremadamente complejo, formado por neuronas modificadas sensibles a la luz. Se halla situado en la parte más interna del polo posterior del ojo y es el lugar donde se proyecta la imagen del resto de las superficies refractivas oculares.^{1 pag 220} La función esencial de la retina es la de absorber luz, y transformar esta energía lumínica en eléctrica, única energía procesable por el cerebro. Esta transformación

recibe el nombre de transducción y solo pueden llevarla a cabo neuronas especializadas de la retina llamadas fotorreceptores,^{2 pag 29} a los que dividimos en dos tipos: Conos y bastones, cuyos nombres se deben a las distintas formas de sus segmentos externos.

Esta diferencia en la estructura, sirvió de base para que el científico Von Kris formulara en 1896 la teoría de la duplicidad de la visión,^{2 pag 73} según la cual los dos tipos de fotorreceptores poseen propiedades distintas y operan bajo diferentes condiciones: Los conos trabajan con intensidades de luz altas y moderadas, es decir, en condiciones diurnas. En cambio, los bastones operan en condiciones de baja iluminación, es decir, condiciones escotópicas o nocturnas. Los conos se encargan de la visión fotópica y en color, mientras que los bastones permiten la visión nocturna, sin detalles ni color.^{3 pag 13} La investigación posterior confirmó que la teoría de la duplicidad era correcta.^{4 pag 61} Otra diferencia entre conos y bastones es su distribución y número a lo largo de la retina: Existen aproximadamente 120 millones de bastones y 6 millones de conos.^{2 pag 73}

La máxima concentración de conos se halla en la zona central de retina, denominada fóvea, y la mayor densidad de bastones se encuentra a 20° de la fóvea.^{3 pag 17-19} Esta localización máxima de bastones no centrada explica la visión desviada que los astrónomos aplicaban para ver estrellas débiles. En la noche no vemos objetos débilmente iluminados que caen sobre fóvea porque en ella solo existen conos.^{4 pag 67}

El fenómeno de la visión se produce por la interacción de la luz con los fotorreceptores. Esta interacción se lleva a cabo en los discos del segmento externo de los receptores, al contener unas sustancias químicas específicas llamadas fotorpigmentos que son las encargadas de absorber la luz. Se han descubierto cuatro tipos de fotorpigmentos distintos en la retina del ser humano, existiendo un único fotorpigmento para bastones y



tres diferentes para los conos, responsables de la base de nuestra visión del color.^{4 pag 59-61}

La rodopsina

El fotopigmento más estudiado es el de los bastones, llamado rodopsina, debido a que el número de bastones es muy superior al de conos, del orden de 20 a 1, y a que poseen mucho más pigmento.^{1 pag 224-225} Un solo bastón puede contener hasta 70 millones de moléculas de fotopigmento.^{5 pag 97}

El descubrimiento de la rodopsina se produjo a finales del siglo XIX. El profesor Franz Boll, en 1876, observó como el color rosado de la retina de la rana amarilleaba con la luz, deduciendo que aquella retina poseía una sustancia fotosensible a la que llamó púrpura retiniana. Un año más tarde, se comprobó la existencia de

rodopsina en el ser humano estudiando el ojo de un criminal guillotinado en la oscuridad.^{6 pag 266}

Pero fue George Wald quien ganó el Premio Nobel en 1967 gracias a sus trabajos sobre los fotopigmentos. Descubrió que en la retina humana la rodopsina corresponde al 99% del total de los pigmentos visuales y pudo establecer su espectro de absorción despreciando el 1% de los pigmentos asociados a los conos.^{1 pag 224-225}

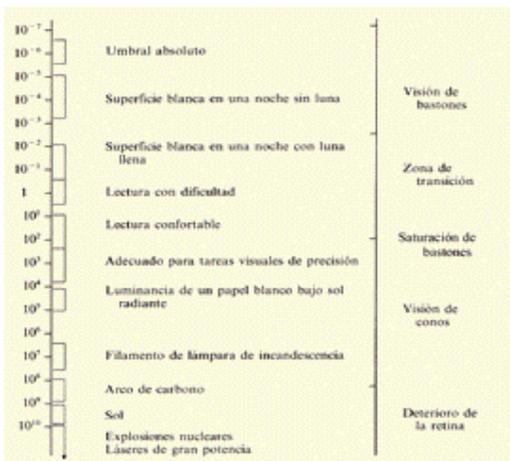


Figura 1. Niveles de luminancia en cd/m^2 a los que puede estar sometido el ojo humano, en unidades logarítmicas

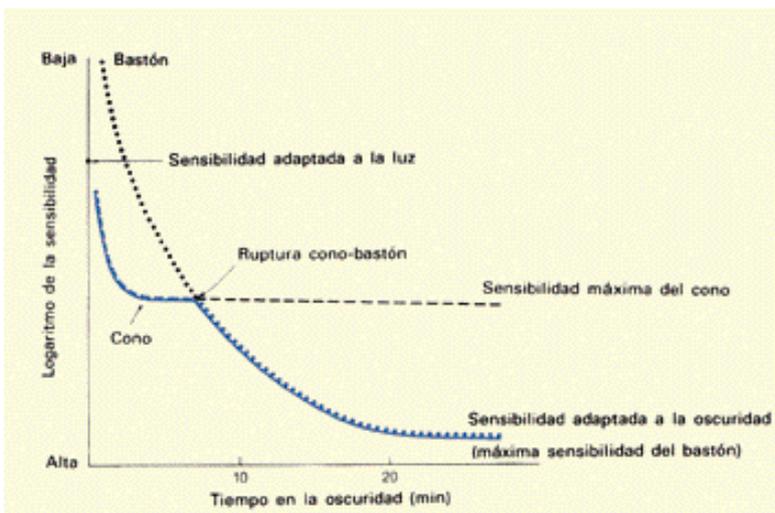


Figura 2. Curva de adaptación a la oscuridad. La línea de puntos corresponde a la adaptación de bastones y la línea de trazos a la adaptación de conos. La resultante de ambas funciones es la curva de adaptación a la oscuridad final marcada en color azul

Cuando un fotón es absorbido por la rodopsina, se produce un cambio en la configuración de la molécula, que a su vez provoca una respuesta eléctrica en la membrana de los bastones y este impulso se transmite a las células bipolares y a las sucesivas neuronas hasta llegar al cerebro.^{3 pag 22}

No obstante, la rodopsina consumida o blanqueada debe regenerarse para que el proceso de la visión continúe, pues si agotásemos todo el pigmento dejaríamos de ver después de un periodo de exposición a la luz. La rodopsina se regenera gracias a la enzima retinalisomerasa y a la Vitamina A, ambas presentes en la estructura celular del bastón. Si el ojo está sometido cierto tiempo a una intensidad de luz constante, se obtiene un equilibrio cinético entre la velocidad de blanqueo de la rodopsina y su regeneración, manteniéndose invariable la misma cantidad de pigmento.^{5 pag 265-275}

Adaptación a la oscuridad

Según la teoría de la duplicidad, nuestros fotorreceptores, conos y bastones, tienen funciones diferentes y trabajan con intensidades de luz distintas. Esto es fácilmente demostrable mediante estudios de adaptación a la oscuridad. El procedimiento más usual de estos estudios consiste en adaptar al observador a una luz muy intensa durante varios minutos para llevarlo seguidamente a una oscuridad total, donde se le presentan estímulos de pequeñas manchas de luz de intensidad ascendente hasta que el sujeto es capaz de percibirlos. De esta manera conocemos la intensidad mínima de luz que el observador puede discriminar a medida que transcurre el tiempo. Esta intensidad mínima recibe el nombre de umbral.^{4 pag 63}

Los pequeños puntos de luz se presentan sobre la retina periférica, de tal forma que estimulan a conos y a bastones. A medida que avanza la prueba el umbral disminuye, lo que significa que nuestra sensibilidad en la oscuridad aumenta,^{2 pag 74} hasta que pasados aproximadamente 30 minutos la sensibilidad es máxima y alcanzamos el umbral absoluto, o la menor cantidad de luz necesaria para que un estímulo sea detectado.^{3 pag 111} (véase figura 1)^{3 pag 55}

Gracias a este experimento obtenemos la gráfica de la adaptación del sistema visual humano a la oscuridad, que representa una doble curvatura característica, debido a que en ella están involucrados los dos tipos de fotorreceptores. Mediante pruebas realizadas con estímulos visuales proyectadas sobre la zona central de la fovea, único lugar de retina donde solo existen conos, se ha comprobado que la primera parte de la curva corresponde a la adaptación de los conos; si el experimento se efectúa en personas que por un defecto genético carecen de conos en la retina, descubriremos la segunda parte de la curva, perteneciente a la adaptación de los bastones.^{4 pag 64-65} (véase figura 2)^{2 pag 75}

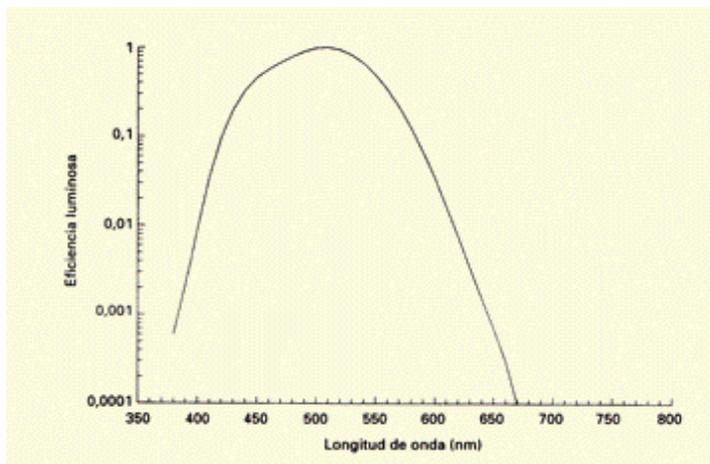


Figura 3. Curva de sensibilidad espectral en visión escotópica

En la etapa temprana, los conos se adaptan rápidamente al cambio de condiciones en la luminosidad, pero no son tan sensibles como los bastones y su umbral es alto. Los bastones se adaptan más lentamente, pero a medida que pasa el tiempo son mucho más sensibles y capaces de trabajar en condiciones escotópicas; a partir de los 8 minutos de adaptación los bastones se convierten en las células útiles de la visión nocturna.

El ojo adaptado a la oscuridad es, por tanto, mucho más sensible que el ojo adaptado a la luz. Las razones de este espectacular aumento de la sensibilidad son tres: ^{4 pag 65}

1. Al pasar de un lugar iluminado a otro mucho más oscuro, la pupila se dilata, permitiendo la entrada de 16 veces más de luz que cuando se encuentra en miosis.
2. Los ojos adaptados a la oscuridad tienen una elevadísima concentración de rodopsina.
3. Ciertos procesos neuronales a nivel superior que el de los fotorreceptores, en el camino hacia la corteza cerebral magnifican la información recibida. Las células bipolares, conectadas con los bastones, responden a una menor estimulación en la oscuridad y así la retina puede presentar distintos niveles de adaptación con independencia de la concentración de fopigmento. ^{5 pag 122} Además, la sensibilidad de los bastones, se multiplica por su coordinación a través de la red neuronal, formando campos receptores de mayor o menor área que potencian la sensibilidad de la retina periférica. La sensibilidad nocturna frente a la diurna es 107 veces mayor. ^{7 pag 201}

Cada vez hay más evidencias de que los aspectos fundamentales de la visión pueden explicarse por las propiedades físico-químicas de los fopigmentos. Una de las más extraordinarias pruebas de estas evidencias son las medidas de blanqueo y síntesis de los pigmentos visuales en el ojo humano vivo. ^{6 pag 278-279} Gracias a la técnica de la densitometría retiniana, se comprobó la

lenta regeneración del pigmento de los bastones y la veloz reconstrucción del pigmento de los conos. ^{2 pag 76-77} La rodopsina necesita un tiempo aproximado de 35 minutos para regenerarse totalmente, tiempo que coincide con el que necesitan los bastones para adaptarse a la oscuridad. Sin embargo, los pigmentos de los conos se regeneran en 8 minutos, tiempo idéntico en el que los conos tienen la máxima sensibilidad en la oscuridad. ^{6 pag 279} Se demuestra así que las curvas psicofísicas de adaptación a la oscuridad se deben a las características de los pigmentos visuales. ^{2 pag 77}

Otro experimento esencial consistió en conocer como se comportaba el sistema visual en condiciones escotópicas respecto a cada longitud de onda (λ). Mediante métodos psicofísicos se determinan los umbrales de luminancia en que se percibe luz para las diferentes λ , obteniendo la curva de sensibilidad espectral del medio escotópico. ^{1 pag 225} (véase figura 3) ^{3 pag 84}

Aunque en situaciones de oscuridad total, donde solo funcionan bastones, no percibimos ningún color, curiosamente no somos igual de sensibles a todas las λ , presentando un máximo de sensibilidad para $\lambda=507$ nm. ^{3 pag 86} La radiación de λ igual a 507 nm necesita la menor energía para ser vista y nuestra sensibilidad a ella en condiciones nocturnas es máxima.

El espectro de absorción de un fopigmento, representa la cantidad de luz absorbida por el pigmento en función de su λ . El espectro de absorción de la rodopsina, es extremadamente coincidente con la curva de sensibilidad escotópica, demostrando de nuevo que las propiedades de esta se deben a cómo absorbe la luz el pigmento visual de los bastones. ^{2 pag 81-82} La rodopsina presenta un máximo de absorción para radiaciones de λ igual a 505 nm. ^{8 pag 60} (véase figura 4) ^{8 pag 60}

Las diferencias de sensibilidad entre conos y bastones, también pueden explicarse desde el punto de vista fisiológico. Si existen 126 millones de conos y bastones y solo 1 millón de células ganglionares que

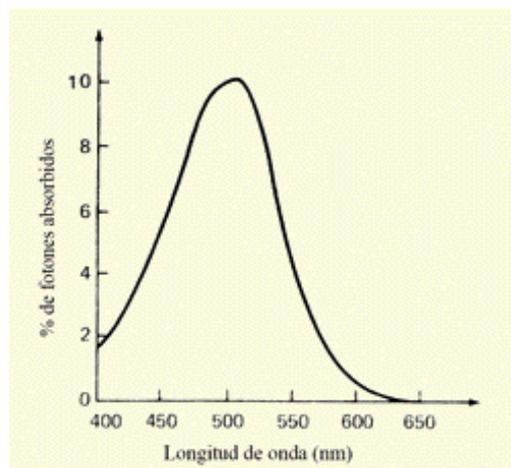


Figura 4. Espectro de absorción de la rodopsina



envían la información al cerebro, cada ganglionar recibe señales de múltiples fotorreceptores. Debido a su mayor número, muchos más bastones mandan información a una misma célula ganglionar. Si presentamos 5 fotones de luz a un área de 5 bastones y 5 conos por separado, las señales individuales de los bastones se suman y el efecto acumulativo puede ser lo suficientemente fuerte para estimular a la célula ganglionar. (véase figura 5)^{2 pag 84} El ejemplo ilustra el concepto de sumación espacial.^{2 pag 83-84} Esto es muy apropiado para la visión nocturna, ya que un solo fotón encuentra un amplio abanico de bastones para captarlo y enviar una señal por un mismo canal. Los conos apenas convergen y conectan independientemente con las células ganglionares.^{1 pag 229} Hacia el borde de la retina, rico en bastones, una sola ganglionar puede recibir señales de casi 100 bastones.^{4 pag 67}

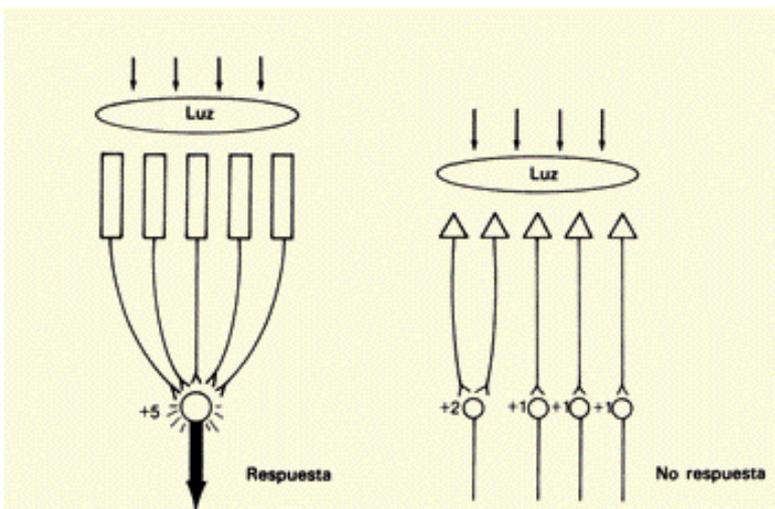


Figura 5. La mayor convergencia de los bastones produce una gran sumación espacial, lo que provoca una sensibilidad muy superior a la de los conos

Límite visual humano y físico de la luz: fotones

La luz es una onda electromagnética, pero según la teoría cuántica podemos dividirla en pequeñas unidades de energía denominadas cuantos. Estos cuantos de luz o fotones, atraviesan el globo ocular, llegan a retina y en el interior del receptor

Medidas de Pirenne, Hecht y Schaler en las mejores condiciones posibles:

45 minutos de adaptación a la obscuridad.

Fuente objeto de 10' de tamaño.

Vista a 20° de la fóvea, zona de máxima densidad de bastones en la retina.

Destellos monocromáticos de 510 nm, de duración de 0.001 s.

Umbral definido para el 60% de aciertos.

Figura 6.

alcanzan una molécula de pigmento visual lo que provoca que cambie de forma y se activen una serie de procesos cuyo resultado final es la generación de una descarga eléctrica que viaja hacia el cerebro.^{2 pag 30}

La pregunta que la ciencia se hizo a continuación fue: ¿Qué cantidad mínima de fotones necesitamos para activar el pigmento visual de los receptores y producir el proceso de la visión? Selig Hecht, Simon Shlaer y Maurice Pirenne descubrieron que en las mejores condiciones posibles, después de la total adaptación a la oscuridad, los valores se escalonan entre 54 y 146 fotones.^{9 pag 63-64} (véase Figura 6)^{9 pag 63-64} Estos datos se refieren a fotones que alcanzan la córnea del observador pero no todos llegan a retina:

{ 5% son reflejados por la córnea

De cada 100 fotones { 50% son absorbidos por varias estructuras del ojo

{ 45% llegan a retina

Del 45% que llega a retina, solo el 20% aproximadamente es absorbido por las moléculas del fotorreceptor.^{5 pag 96}

Así se halló el umbral absoluto de detección de luz, estableciendo que un sujeto podía detectar un destello de luz de solo cien fotones, de los cuales simplemente siete debían ser absorbidos por los pigmentos visuales de los bastones para producir sensación visual. Se demuestra también de esta forma que un único fotón es capaz de activar al fotorreceptor que lo capta, aunque la señal eléctrica producida es demasiado débil para provocar el estímulo visual.^{2 pag 30-31}

(Figura 6)

Los fotones tienen asociados una energía que depende de su λ .^{10 pag 6-9}

$$E = h \cdot c / \lambda$$

Donde:

E es la energía del fotón;

c es la velocidad de la luz;

$c = 2,99792458 \lambda 10^8$ m/s

λ es su longitud de onda;

h es la constante de Plank; $h = 6.626176 \cdot 10^{-34}$ J • s

La energía que corresponde a 100 fotones de luz con λ igual a 507 nm es de aproximadamente $4 \cdot 10^{-17}$ Julios, una cantidad minúscula si la comparamos con cualquier energía con las que trabajamos diariamente: El elevar un cuerpo de masa de 1 Kg. a 1 metro de altura requiere una energía de 9.8 Julios.

Para un destello puntual breve, el umbral corresponde en las mejores condiciones a la entrada en el ojo de unas cuantas decenas de fotones, de lo millones de años, en elevar un grado centígrado la

DENSIDAD MEDIA DEL FLUJO DE FOTONES DE FUENTES COMUNES

FUENTE	FLUJO / UNIDAD DE AREA
Luz solar brillante	10^{18} fotones · s / m ²
Nivel luminoso en interiores	10^{16} fotones · s / m ²
Crepúsculo	10^{14} fotones · s / m ²
Luz de la luna	10^{12} fotones · s / m ²

Figura 7.

temperatura de 1 gramo de agua. Nuestro ojo, sin embargo, es capaz de detectar esa cantidad ínfima de energía. En este sentido la teoría corpuscular de la luz, constituye el límite de la sensibilidad de la retina, límite que prácticamente se alcanza.¹⁰

pag 171-172

(Figura 7)¹¹ pag 52

Si después de conocer el límite de detección de luz en las mejores condiciones posibles, lo comparamos con los niveles de iluminación con los que trabajamos normalmente, (Figuras 1 y 7) comprobaremos la increíble sensibilidad de nuestro sistema visual en condiciones nocturnas. De hecho, pueden llegar a existir diferencias de hasta 10 unidades logarítmicas entre ambos escenarios.⁵ pag 119 No existe instrumento óptico capaz de discriminar y medir tanta diferencia de luminancias como el ojo humano. Como ejemplo, cabe citar que la intensidad de la luz solar es 10000 millones de veces mayor que la luz de las estrellas y, aun así, el ojo puede trabajar adaptándose a los dos ambientes.¹² pag 706

Aunque hay desacuerdos entre los investigadores sobre el número exacto de fotones necesarios para alcanzar el umbral absoluto, todos confirman que el valor calculado para el umbral es extremadamente bajo. El aparato visual parece ser sensible al grado más elevado posible, de acuerdo con la naturaleza de la energía luminosa. Si nuestros ojos en la oscuridad fueran más sensibles de lo que son, percibirían el efecto de disparo de la emi-

sión de fotones y la luz “continua” ya no lo parecería.¹³ pag 61

Conclusión

El ojo adaptado a la oscuridad posee una sensibilidad espectacularmente superior con respecto a su estado de adaptación a la luz, con el que frecuentemente trabajamos. Para llegar a su máxima sensibilidad debemos permanecer en una oscuridad total durante al menos 35 minutos. El uso de la luz eléctrica y el alumbrado nocturno nos han hecho olvidar la gran capacidad de nuestra visión nocturna, que por otro lado utilizamos durante millones de años para sobrevivir. Este olvido, no hizo sino más que agrandar el asombro que se produjo en la ciencia del siglo XX, al comprobar la increíble facultad de percepción de luz en condiciones escotópicas, llegando al límite visual, próximo a 100 fotones. De ellos, solo aproximadamente siete interactuarán con una molécula de fotorreceptor en siete bastones diferentes, dando como resultado una respuesta eléctrica procesable por el cerebro. Un solo fotón es capaz de estimular a un bastón. Además, las características de la visión en la oscuridad están íntimamente relacionadas con las propiedades físico-químicas de la rodopsina y la capacidad de sumación espacial de la red de bastones. También resulta sorprendente la versatilidad de nuestro sistema visual en cuanto a sus límites máximo y mínimo de adaptación a la luz y la gran diferencia de luminancias que existe entre ellos. En definitiva, el ojo adaptado a la visión nocturna posee un poder visual que desconocemos generalmente, debido a que nuestros escenarios visuales de luz artificial no nos permiten trabajar con los fotorreceptores más sensibles, los bastones, y olvidamos la tremenda eficacia de éstas, nuestras células de la percepción de lo invisible, de la percepción de la oscuridad.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Javier Monserrat.** *La percepción visual.* Editorial Biblioteca Nueva S.L. Madrid. 1ª Ed. 1998; 220-229.
2. **E. Bruce Goldstein.** *Sensación y Percepción.* Editorial Debate 1ª Ed. 1988; 29-84.
3. **J.M. Artigas, P.Capillas, A. Felipe, J. Pujol.** *Óptica Fisiológica. Psicofísica de la visión.* Edit. Mc Graw Hill Interamericana de España 1ª Ed. 1995; 13-111.
4. **Margaret W. Matlin, Hugh J. Foley.** *Sensación y Percepción.* Edit. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 3ª Ed. 1996; 59-67.
5. **César Urtubia Vicario.** *Neurobiología de la visión.* Ediciones U.P.C. Universidad Politécnica de Cataluña. 2ª Ed 1999; 97-122.
6. **Mariano Aguilar, Felipe Mateos.** *Óptica Fisiológica; Tomo I.* Universidad Politécnica de Valencia. 1ª Ed. 1993; 266-279.
7. **Mariano Aguilar, Felipe Mateos.** *Óptica Fisiológica; Tomo II.* Universidad Politécnica de Valencia. 1ª Ed. 1994; 201.
8. **Michael W. Levine, Levine and Shefner's.** *Fundamentals of sensation and perception.* Oxford University Press 3ª Ed. 2000; 59-60.
9. **Yves Le Grand.** *Óptica Fisiológica. Tomo III. El espacio visual.* Edita Sociedad Española de Optometría. 1995; 63-64.
10. **Yves Le Grand.** *Óptica Fisiológica. Tomo II. Luz y Color.* Edita Sociedad Española de Optometría. 1999; 6-9,171-172.
11. **Hecht E.** *Óptica.* Edit. Addison Wesley Iberoamericana, Madrid. 3ª Ed. 2000; 52
12. **Guyton-Hall.** *Tratado de Fisiología Médica.* Edit. Mc Graw-Hill Interamericana. 10ª Ed. 2001; 706.
13. **William N. Dember, Joel S. Warm.** *Psicología de la percepción.* Alianza Editorial. 2ª Ed. 1990; 61.