

6

El fenómeno de la Visión: funcionamiento del Ojo Humano y Animal

El sentido de la visión es absolutamente fascinante, permitiéndonos a nosotros y a muchas especies del reino animal interaccionar con nuestro entorno de maneras muy diversas. En este capítulo se realizará una breve revisión del funcionamiento del ojo humano, presentando también el funcionamiento de la visión en otras especies, analizando así las significativas diferencias existentes en muchos casos.

6.1. Estructura del ojo humano

El **ojo humano** no es sino un sistema sensor que nos permite interaccionar con nuestro entorno. Conviene quizás, en este punto, revisar el concepto de “**sensor**”:

Un sensor es un dispositivo que convierte una magnitud física o química en otra magnitud, normalmente eléctrica, que trata de hacer una medida cuantitativa del fenómeno.

¿Es adecuada la definición del ojo como un sensor? Claramente sí: el ojo convierte los fotones (o rayos de luz), con información sobre nuestro entorno, en señales eléctricas que, posteriormente, son interpretadas por nuestro cerebro. Pero, ¿cómo se produce este proceso? Desde un punto de vista simplificado, la ?? muestra un esquema de cómo se lleva a cabo este proceso: los rayos de luz que salen del objeto (reflejados) llegan al ojo, donde algunos elementos como el cristalino actúan como lente, permitiendo un “enfoque” correcto de estos

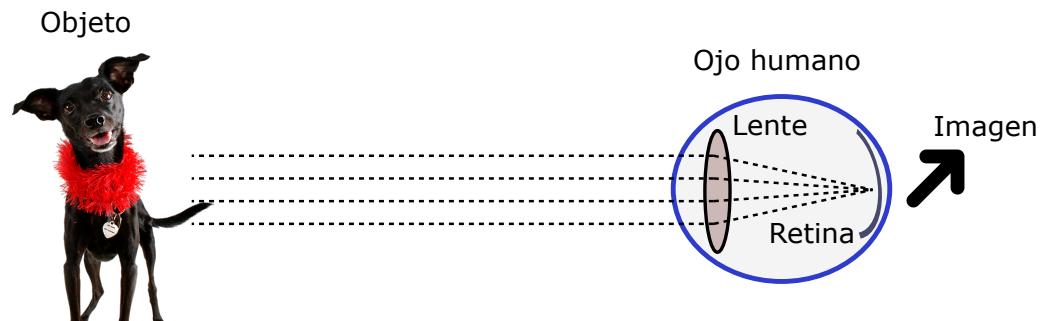


Figura 6.1. Esquema simplificado del fenómeno de la visión y el ojo humano. Fuente: Elaboración propia.

rayos o haces de luz sobre la retina. La retina es el elemento sensor o transductor donde se forma la imagen y se convierte la señal óptica (fotones) en eléctrica (electrones).

Una imagen detallada de la estructura del ojo humano se presenta en la ??.

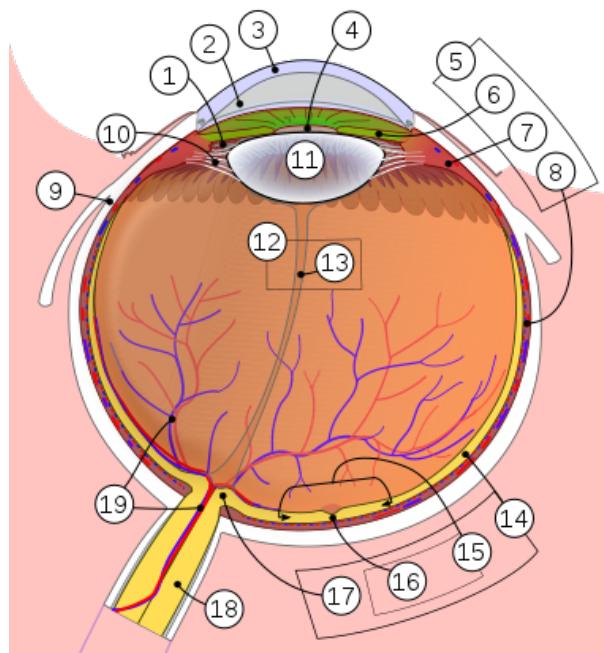


Figura 6.2. Representación esquemática de la estructura de un ojo humano. Elementos: 1. Cámara posterior 2. Cámara anterior 3. Córnea 4. Pupila 5. Úvea 6. Iris 7. Cuerpo ciliar 8. Coroides 9. Esclerótica 10. Ligamento suspensorio del cristalino 11. Cristalino 12. Humor vítreo 13. Conducto hialoideo 14. Retina 16. Fóvea 17. Disco óptico 18. Nervio óptico 19. Vasos sanguíneos de la retina. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio público. <http://bit.ly/2j9TBSH>

Repasemos los principales elementos que componen el ojo humano y su funcionalidad:

La córnea es una estructura en forma de hemisferio y transparente que se sitúa en la parte externa del ojo y cuya misión es permitir el paso de la luz y proteger al iris. En la córnea se produce una primera refracción de los rayos de luz que llegan al ojo. Como curiosidad cabe mencionar que el índice de refracción de la córnea es de 1,377¹.

¹Si no recuerdas bien qué es el índice de refracción, revisa por favor los capítulos anteriores del curso

Pupila e iris: el iris es una estructura que controla la cantidad de luz que recibe el ojo. Este proceso se lleva a cabo mediante unos músculos que regulan la abertura de la pupila (ver [Figura 6.3](#)), el orificio central del iris de unos 3 milímetros de diámetro.

Humor acuoso se trata de un líquido que circula entre el cristalino, el iris y la córnea y que tiene diferentes funciones, como dotar a la estructura del ojo de una presión adecuada¹, nutre y limpia a la córnea y el cristalino y también contribuye a la refracción de la luz (con un índice de refracción de 1,337) aunque en menor medida que el cristalino.

El cristalino es la estructura del ojo que funciona como una lente, en particular como una lente bi-convexa, con el objetivo de permitir enfocar objetos que se sitúan a diferentes distancias. A ese proceso de enfoque, que se lleva a cabo mediante un aumento o disminución de la curvatura y espesor de esta estructura, se denomina **acomodación** (ver [Figura 6.4](#)). El cristalino tiene un índice de refracción de 1,413.

Humor vítreo es, al igual que el humor acuoso, un líquido que se sitúa en este caso entre el cristalino y la retina. Sus dos funciones principales son mantener la forma del ojo y conseguir una superficie uniforme en la retina para que la recepción de imágenes sea lo mejor posible. El índice de refracción del humor vítreo es de 1,336.

La retina es el auténtico sensor o transductor del ojo humano, permitiendo la conversión de luz en impulsos eléctricos que son posteriormente interpretados por el cerebro.

La fóvea es el área de la retina donde se enfocan los rayos de luz, estando especialmente dedicada este área a la visión en color.



Figura 6.3. Detalle de una iris humano, de color azul. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2zkziNa>

para asimilar correctamente este importante concepto.

¹Un exceso de presión intraocular por falta de drenaje del humor acuoso es precisamente la causa del glaucoma.

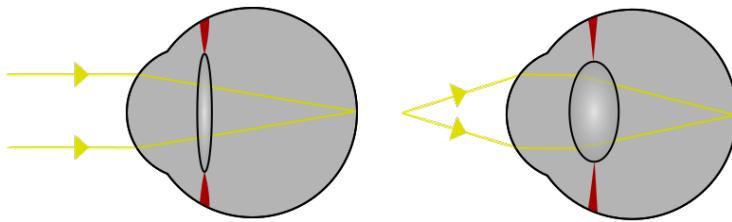


Figura 6.4. Esquema del funcionamiento del cristalino y del proceso de *acomodación*. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.5. <http://bit.ly/2AeboTq>

6.2. Conos y bastones: los auténticos sensores del ojo

Como ya se ha comentado, la retina es el elemento del ojo que permite realmente la visión, convirtiendo la luz en señales eléctricas que son posteriormente transmitidas al cerebro. Pero ¿cómo se produce realmente esa conversión? La retina está formada por una serie de células que permiten la transmisión de las señales generadas, pero la clave del proceso de visión está en las células especializadas (de la retina denominadas) **foto-receptores** (o lo que es lo mismo, receptores de luz). Hay dos tipos de foto-receptores, los conos y los bastones:

Los bastones constituyen el grupo de fotorreceptores más numeroso (unos 120 millones) y son los que mayor sensibilidad a la luz presentan, esto es, los que permiten ver con una menor cantidad de luz. Son por tanto los responsables de que podamos percibir detalles y formas en la oscuridad pero, sin embargo, no nos permiten apreciar colores. Están también asociados a la detección de movimiento y a la visión periférica, al encontrarse mayoritariamente en las regiones que rodean la fóvea, zona de la retina donde incide la luz cuando miramos una escena directamente y en la que predominan los conos.

Los conos son los fotorreceptores encargados de la percepción de los colores, situándose éstos en la zona de la retina donde se proyecta la imagen cuando miramos un objeto directamente, concretamente en la fóvea y en la mácula, la zona que la rodea. El número de conos en esta zona es de unos 6 a 7 millones.

Con respecto a los conos, es interesante destacar que existen **3 tipos de conos** asociados a los colores **rojo, verde y azul**. La formación de otros colores se realiza en base a la mezcla de esos tres colores “primarios”, tal y como ocurre en las pantallas o televisores convencionales (que usan un sistema RGB: Red (Rojo), Green (Verde) and Blue (Azul)). Diferentes estudios han concluido que la respuesta espectral de estos conos es la que se muestra en la [Figura 6.5](#), donde se aprecian las 3 curvas asociadas a los conos rojo, verde y azul y la curva correspondiente a los bastones (en trazo discontinuo). En el eje horizontal se ha indicado la longitud de onda asociada a cada color¹. Además, también se muestra la nomenclatura alternativa que denomina S (*Short*), M (*Medium*) y L (*Large*) a los conos azules, verdes y rojos, respectivamente. Estos nombres se derivan de sus longitudes de onda (cortas, medias y largas).

¹ *Violet* (violeta); *blue* (azul); *cyan* (cián); *green* (verde); *yellow* (amarillo) y *red* (rojo).

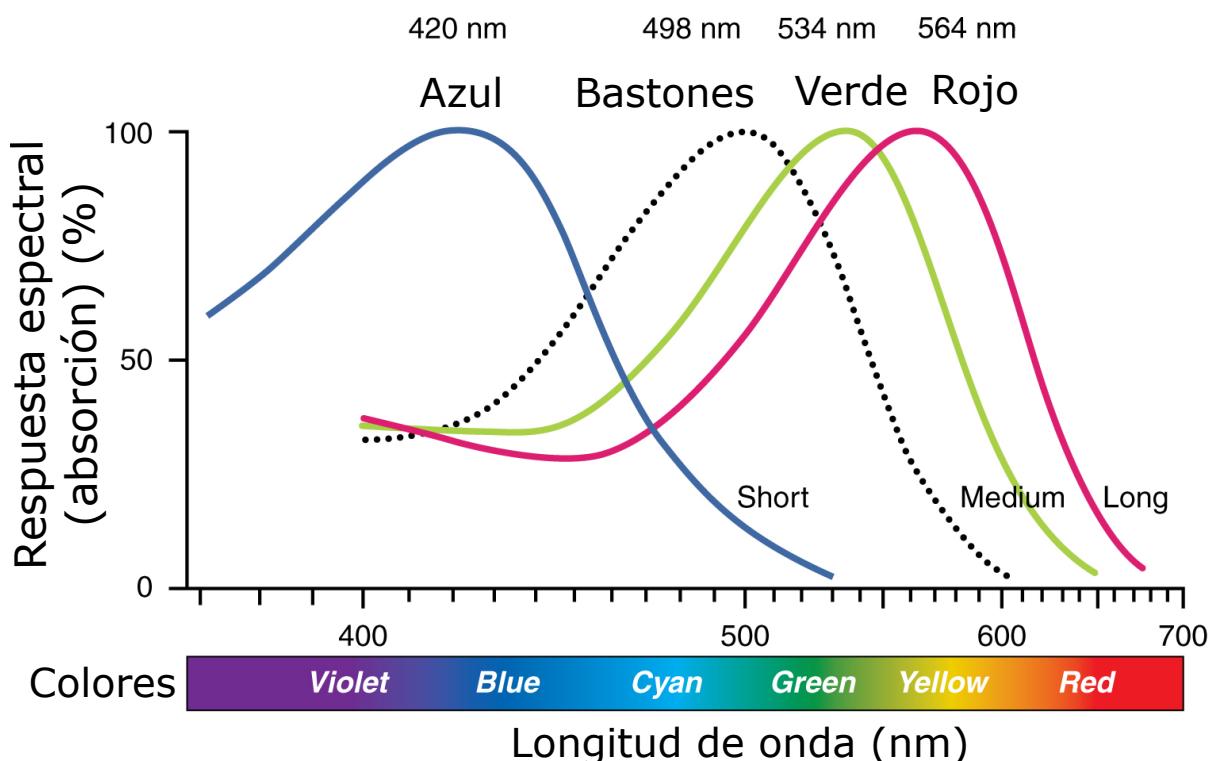


Figura 6.5. Representación de la respuesta asociada a los conos (fotorreceptores) azul, verde y rojo. Fuente: Wikimedia (imagen original modificada). Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2hNbvu8>

Cuestión 6.1: Pantallas RGB

Investiga sobre cómo se forman los colores que se muestran en las pantallas de televisión (por ejemplo de tipo LED) o en los monitores de ordenador. Explícalo brevemente **con tus propias palabras**.

Cuestión 6.2: Color en las impresoras

Investiga sobre cómo se forman los colores en las impresoras convencionales: ¿se utiliza también el sistema RGB? Explícalo brevemente **con tus propias palabras**.

Como curiosidad con respecto a los conos, cabe destacar que los conos "azules" son especiales, ya que constituyen sólo el 2% de todos los conos y se sitúan fuera de la zona central de la fóvea donde se encuentran los conos rojos y verdes. Aunque estos conos son más sensibles, este hecho no explica por sí sólo cómo podemos apreciar los diferentes colores con una sensibilidad similar. Se cree que existe en el cerebro un sistema que "amplifica" las señales procedentes de los conos azules con el objeto obtener un resultado final compensado.

Importante 6.1: Azul intenso

La percepción visual de objetos que muestran un color azul intenso es menos clara que la percepción de objetos de color rojo y verde. Este hecho, que puede apreciarse en las imágenes mostradas en el siguiente enlace^a, se debe a que los conos azules se sitúan fuera de la fóvea, región donde enfocamos nuestra visión “directa”.

^a<http://bit.ly/2zdtjpn>

6.3. Defectos de la visión

Una vez ya explicado el funcionamiento de un ojo humano, llega el momento de profundizar en cómo se produce una **observación normal** por parte del ojo y cuando, por diferentes circunstancias, el proceso se puede ver alterado.

Un ojo normal proporciona de un objeto alejado una imagen perfecta en la retina. Cuando el objeto se acerca, el cristalino se deforma con la finalidad de que la imagen del objeto, que no está en el foco, se siga formando en la retina (es lo que se conoce como **proceso de acomodación**, ya mencionado y representado en la [Figura 6.4](#)). Esta deformación del cristalino es máxima cuando el objeto está situado en una distancia d_m (denominada **distancia de visión mínima**), que varía de acuerdo a la edad. Para personas adultas se considera que una distancia d_m normal se sitúa alrededor de los 25 cm, siendo de 15 cm a los 30 años y de 7-8 cm en niños.

6.3.1. Defectos de la visión: miopía, presbicia, hipermetropía y astigmatismo

La **miopía** se produce por un exceso de convergencia en el sistema óptico del ojo, situándose el foco de la imagen delante de la retina, tal y como se ha representado en la [Figura 6.6](#). Es precisamente esta “falta de enfoque” la que provoca que se vean borrosos los objetos lejanos.



Figura 6.6. Representación esquemática de la miopía. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el paso de los años hace que se reduzca la capacidad de adaptación del cristalino, perdiendo así parte de su flexibilidad original (lo que se conoce como **presbicia**). De

esta manera aumenta la distancia de visión mínima d_m , lo que se conoce como vista cansada (ver [Figura 6.7](#)) y que resulta en una dificultad para ver nítidamente objetos cercanos. Afecta fundamentalmente a personas adultas, en concreto a más de un 80 % de los mayores de 45 años y casi a un 100 % en los mayores de 65 años.

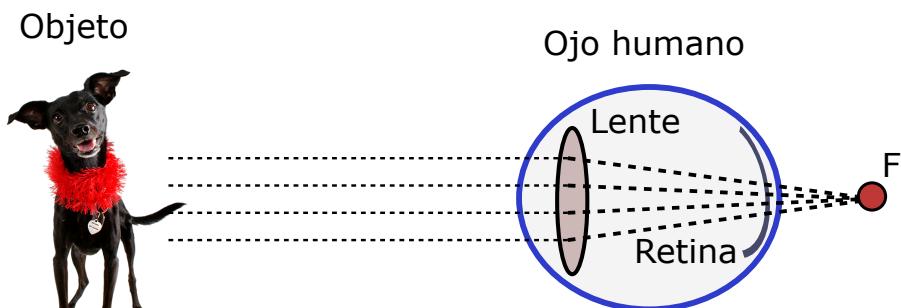


Figura 6.7. Representación esquemática de la presbicia. Fuente: Elaboración propia.

La **hipermetropía** es muy similar en sus síntomas a la presbicia, pero afecta a personas jóvenes, ya que no se genera por un deterioro en la flexibilidad del cristalino, sino en una incorrecta refracción de la luz en el ojo, resultando nuevamente en un punto focal más allá de la retina, al igual que se mostró en la [Figura 6.7](#). Al contrario que lo que ocurre con la presbicia, en la hipermetropía puede existir un importante factor hereditario.

Por último, el **astigmatismo** es un defecto de la visión en el que no existe una refracción uniforme en el ojo, lo que hace que se generen dos puntos focales dentro del ojo, delante y detrás de la retina, en vez de uno sobre la retina como ocurre en un ojo “sano”. El principal síntoma del astigmatismo es la visión borrosa tanto de objetos cercanos como lejanos, así como la dificultad para percibir pequeños detalles en las imágenes. En la [Figura 6.8](#) se presenta un ejemplo de cómo afectan los diferentes defectos de la visión a la imagen final que somos capaces de percibir.

6.4. Soluciones a algunos defectos de la visión

Diversos avances en los campos de la medicina y la óptica han ido ofreciendo soluciones a diversos defectos de la visión. Todos conocemos el uso de lentes (ya sea en formato de gafas o lentes de contacto) que permiten corregir algunos de esos defectos como la miopía o la presbicia. Las **lentes intraoculares** suponen un paso más allá, siendo en este caso implantadas dentro del ojo para añadirse al sistema óptico del paciente, en vez de adaptarse a la superficie del ojo como ocurre con las convencionales lentes de contacto. Las lentes intraoculares pueden sustituir o no al cristalino, implantándose delante o detrás del iris. En la [Figura 6.9](#) se muestra un ejemplo de lente intraocular implantada en la cara anterior del iris y sustituyendo al cristalino.

Existe también otro tipo de soluciones quirúrgicas mediante el empleo de láseres que son muy comunes a día de hoy, por ejemplo mediante la técnica conocida como **lásik**. En este tipo de intervenciones el procedimiento consiste típicamente en cortar parte de la superficie de la córnea (esto puede realizarse mediante láser o con un instrumento cortante) para apartarla y permitir que un láser elimine parte del tejido de la córnea restante con objeto de darle una



Figura 6.8. Ejemplo del efecto de diferentes defectos de la visión. Fuente: ((C) Dr. Carlos Navas.)

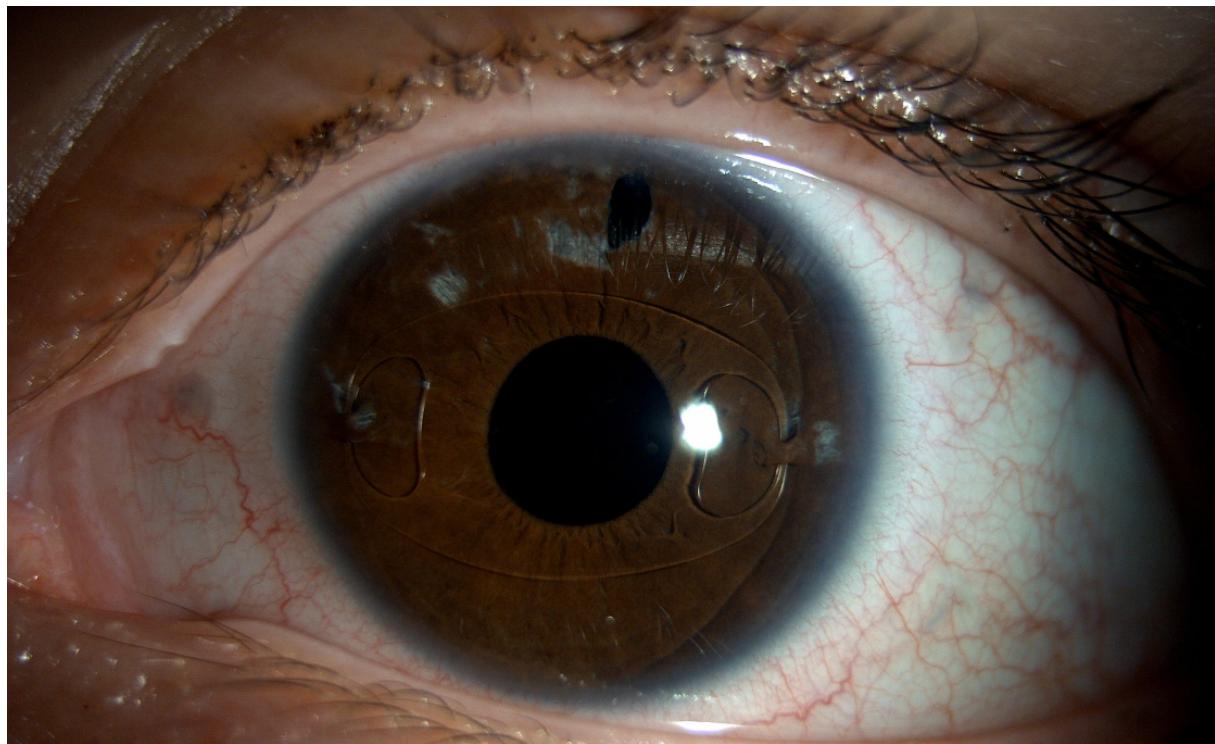


Figura 6.9. Imagen de lente intraocular de tipo Worst implantada delante del iris. Fuente:DINO (@cristiicab).

forma determinada que permita que la luz incidente en el ojo se enfoque perfectamente en la retina. Este proceso se ha ilustrado en la Figura 6.10.

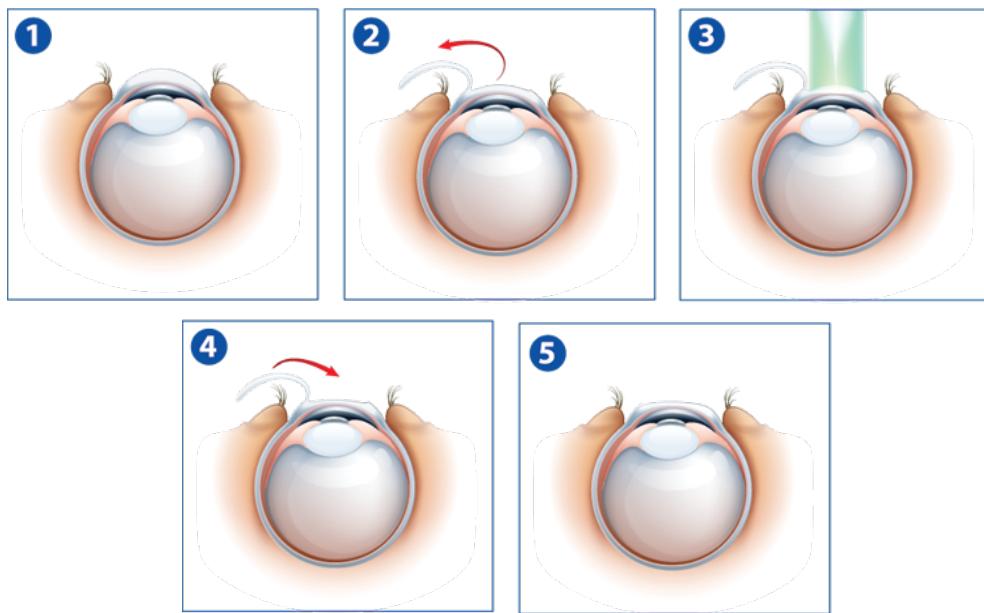


Figura 6.10. Resumen del procedimiento típico de las intervenciones mediante láser para corregir defectos de la visión.

Importante 6.2: Defectos de la visión y refracción

A lo largo de esta asignatura hemos hablado extensamente sobre la refracción de la luz. Es interesante destacar que tanto las soluciones basadas en lentes como mediante la cirugía láser lo que hacen es corregir lo que se denomina un **error refractivo**; esto es, utilizar materiales (lentes) con un determinado índice de refracción o corregir la forma de la córnea para permitir que la refracción que sufre la luz en los diferentes elementos del ojo permita que ésta se focalice perfectamente en la retina.

6.5. Devolviendo la visión a los ciegos: el ojo biónico

El desarrollo científico de los últimos años han hecho posible que se pueda devolver la visión a personas que, debido a enfermedades como la retinosis pigmentaria, se habían quedado ciegas. Este gran avance, en el que España es un país puntero gracias al **Centro de Oftalmología Barraquer**, se basa en el uso de un dispositivo denominado *Argus II Retinal Prothesis System*, cuyo funcionamiento es como sigue:

Una pequeña cámara implementada en unas gafas que recoge las imágenes del entorno del paciente.

Un sistema de transmisión que envía dichas imágenes a un dispositivo implantado en la retina del paciente.

Un chip con electrodos que suplen la función de los conos y bastones, permitiendo así la transmisión de los impulsos eléctricos al cerebro del paciente, donde se interpretarán.

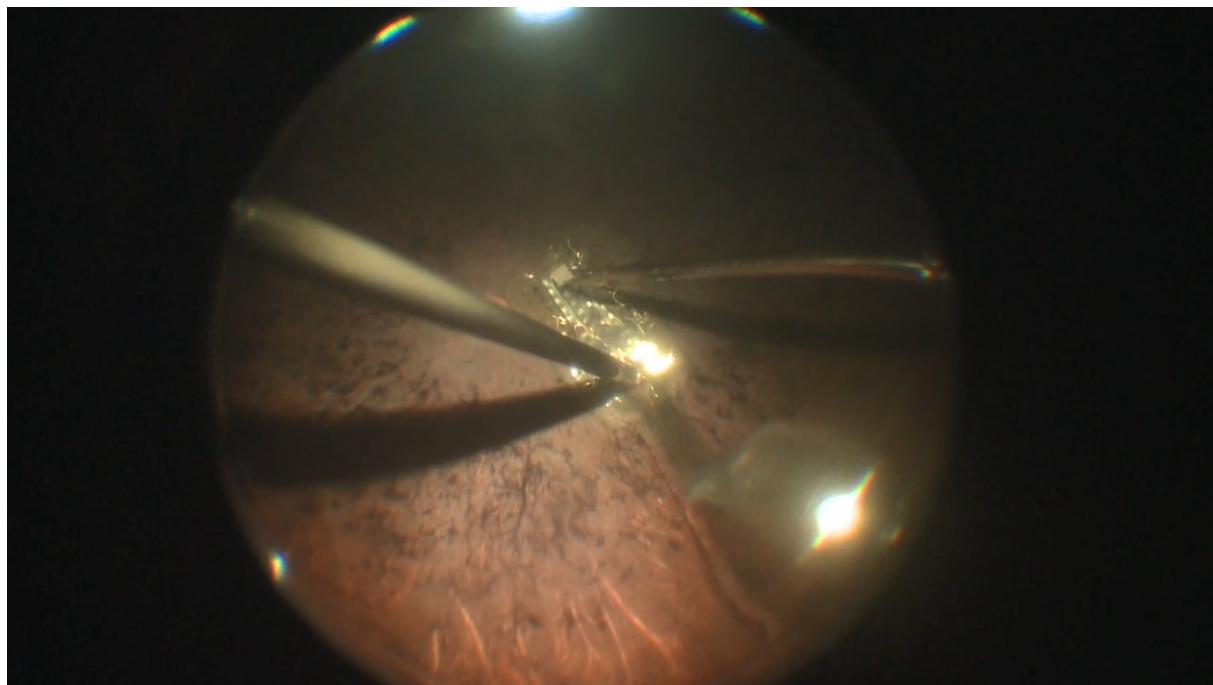


Figura 6.11. Imagen del procedimiento quirúrgico en el que se realiza el implante del chip en la retina del paciente. Fuente: Clínica Barraquer (Dr. Jeroni Nadal).

Tras la compleja operación requerida, el paciente debe involucrarse en un largo periodo de rehabilitación (ver [Figura 6.13](#)) para volver a entrenar a su sistema de visión. De hecho, es necesario que el paciente haya sido capaz de ver en algún momento de su vida para que puedan mantener una memoria visual en el cerebro. Si bien la recuperación de la visión no es completa, sí es posible llegar a reconocer luces, formas y personas, lo que supone un enorme avance para una persona ciega.

6.6. Daltonismo

Dentro de los defectos de la visión podemos mencionar también el conocido como **daltonismo** o **ceguera al color**. El primer término tiene su origen en el físico (también fue matemático, químico y meteorólogo) británico **John Dalton**, considerado como el padre de la teoría atómica, esto es, que la materia está formada por unas pequeñas partículas elementales denominadas átomos. Dentro de su amplio interés por la ciencia, Dalton se sintió atraido por la óptica y estudió la teoría de la luz y el color¹. Fue al realizar diferentes observaciones sobre plantas cuando se percató de que su visión era distinta a la del resto de sus colegas contemporáneos, dado que las descripciones sobre su color no coincidían con su percepción. Dalton explicó este fenómeno a través de cómo percibía él el arco iris en comparación con el resto de personas:

¹Fuente: “El ojo desnudo” de Antonio Martínez Ron (Editorial Drakontos).



Figura 6.12. Imagen de un paciente durante el proceso de rehabilitación tras la intervención en la Clínica Barraquer. Fuente: Clínica Barraquer (Dr. Jeroni Nadal).

“Descubrí que las personas en general distinguen seis tipos de colores en el espectro solar, conocidos como rojo, naranja, amarillo, verde, azul y púrpura [...] Para mí es todo de una forma bastante distinta: veo solo dos o como mucho tres de esas distinciones. A estas las llamo amarillo y azul; o amarillo, azul y púrpura. Mi amarillo comprende el rojo, naranja, amarillo y verde de los demás; y mi azul y púrpura coinciden con los de ellos. Esa parte de la imagen que otros llaman rojo parece para mí poco más que una sombra, o falta de luz; después de eso, el naranja, amarillo y verde parecen un solo color.”

Dalton formuló la hipótesis de que este defecto en su visión se debía a una coloración del humor vítreo de sus ojos (que en un ojo “normal” es transparente), pensando que en su caso este líquido gelatinoso tendría un color azulado y absorbería los colores de longitudes de onda superiores, como el rojo. Esta teoría se demostraría a la larga incorrecta, ya que **esta alteración del funcionamiento de la visión tiene un origen genético y se origina por anomalías en los conos**, que como sabemos son las células encargadas de detectar los colores en nuestros ojos. Existen, de hecho, diferentes tipos o grados de daltonismo, desde una ausencia total de detección de colores (visión exclusivamente en blanco y negro), hasta un daltonismo dicromático, en el que sólo se detectan dos colores, pasando por el monocromático, en el que la persona afectada sólo detecta uno de los tres colores básicos.

Una buena muestra del carácter curioso y del ansia de conocimiento de este importante científico reside en el hecho de que Dalton dejó instrucciones precisas a su médico para que, tras su muerte, analizase detenidamente sus ojos para ver si su teoría sobre el origen de su daltonismo era correcta. Las retinas de John Dalton aún se conservan en el Museo de Ciencia e Industria de Manchester.



Figura 6.13. Representación de John Dalton (derecha) e imagen de uno de sus libros con estudios sobre los colores y el daltonismo. Fuentes: cienciamx.com y lavanguardia.com. Licencias: CC-by 4.0/SSPL-Getty Images.

6.7. Gafas de visión 3D: ¿cómo funcionan?

A día de hoy es común el uso de las denominadas **gafas 3D** en los cines, lo que nos percibir las películas de una manera diferente, percibiendo como ciertos objetos parecen salir de la pantalla y acercarse hacia nosotros, los espectadores. Sin embargo, poca gente sabe en qué se basa el funcionamiento de este sencillo dispositivo.

Para explicarlo es necesario recurrir en primer lugar a la polarización de la luz. La luz, como ya sabemos a estas alturas del curso, puede entenderse como una onda (en concreto como un campo electromagnético que se propaga como una onda). La polarización de la luz no es sino la dirección de vibración de ese campo electromagnético. Por ejemplo, la luz “normal”, la solar o la que sale de una bombilla convencional, no está polarizada, esto es, vibra en todas direcciones. Sin embargo, si se usa un “filtro polarizador”, la luz queda polarizada: en el ejemplo de la [Figura 6.14](#) la luz quedaría polarizada verticalmente.

Precisamente este es el sistema que emplean las gafas 3D. Cada lente (izquierda y derecha) lleva incorporado un filtro horizontal y vertical, respectivamente. De esta manera, cada ojo recibe una información distinta, correspondiente a *frames*¹ intercalados. Este funcionamiento se basa en la **visión estereoscópica**, que básicamente implica que, al estar nuestros ojos separados, cada uno genera una imagen ligeramente distinta. Así, nuestro cerebro las procesa posteriormente, siendo capaz de diferenciar las distancias entre los diferentes objetos que aparezcan en la escena, creando así la sensación de profundidad.

De hecho, el antecesor de estas gafas 3D es el **estereoscopio**, inventado por Sir Charles Wheatstone en 1840 (ver [Figura 6.15](#)), y aún empleado a día de hoy en algunas publicaciones.

Cuestión 6.3: Gafas de Sol polarizadas

Al margen de las gafas 3D de uso en cines, hay varios modelos de gafas de sol que pueden comprarse “polarizadas”. Investiga y explica **con tus propias palabras** cuál es la ventaja que añade a unas gafas de sol el incluir un filtro de polarización.

¹Se denomina *frame* a cada una de las imágenes estáticas que componen un vídeo o secuencia.

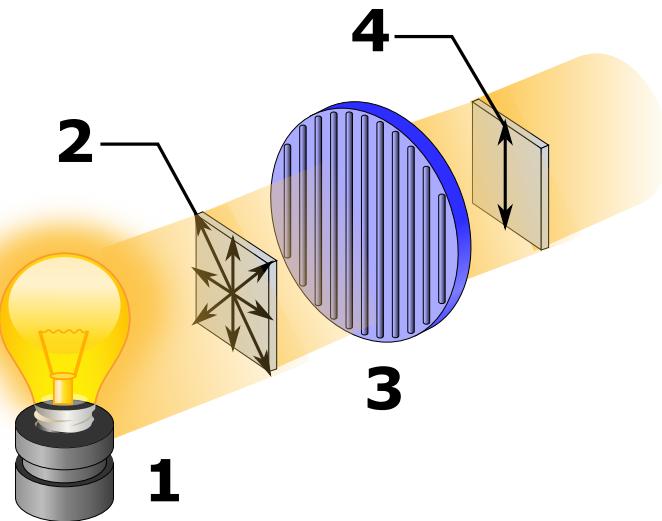


Figura 6.14. Polarización de la luz: uso de un filtro polarizador vertical. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0. <http://bit.ly/2AeYuDN>

Importante 6.3: Polarización: móvil y gafas de sol

Si dispones de teléfono móvil y gafas de sol (polarizadas) y has usado ambos simultáneamente, quizás hayas experimentado el curioso efecto que se da al rotar el teléfono móvil. Busca información y trata de explicar este fenómeno con tus propias palabras^a.

^aPista: fíjate en la ??.

Importante 6.4: Polarización de la luz y gafas

Este breve vídeo de Joe Cossette puede ser un buen complemento para comprender la polarización de la luz y sus efectos, en este caso con unas gafas y unos filtros/láminas de polarización: Enlace: <https://bit.ly/3sC00H5>

6.8. El ojo animal

Una vez analizado en detalle la estructura y funcionamiento del ojo humano, puede ser interesante dedicar un apartado a las particularidades de la visión en algunas especies del reino animal. El objetivo de este apartado no es el de analizar en profundidad cada caso, sino exponer las curiosidades y diferencias más significativas.

6.8.1. El ojo del caballo

Una de las principales particularidades de la visión equina es que abarca casi 360°, en concreto unos 350°, al estar sus ojos situados en los laterales de la cabeza. Esta disposición



Figura 6.15. Estereoscopio (parte superior) y tarjeta estereoscópica de 1899 (inferior). Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.5 (superior) <http://bit.ly/2AFqFwL>; Dominio público (inferior) <http://bit.ly/2zNTOWQ>.

permite a los caballos detectar con facilidad a posibles depredadores. Un detalle en este sentido es que la visión de los caballos tiene dos zonas “ciegas” justo enfrente de él (el caballo es capaz de ver a 2 metros de distancia en línea recta, pero no antes) y detrás. Esto hace que sea recomendable acercarse a un caballo lateralmente, para facilitar su visión, ya que si se asusta puede reaccionar violentamente.

Los caballos tienen una visión dicromática (frente a la tricomática RGB de los humanos); esto es, son capaces de distinguir dos colores al tener dos tipos de conos, verdes y azules. Por otro lado, la proporción bastones/conos es muy superior a la nuestra (20:1), lo que hace que tengan una gran sensibilidad en condiciones de muy poca iluminación, teniendo una gran visión nocturna. Los caballos tienen una gran sensibilidad al movimiento, ya que éste puede implicar un ataque de un depredador. El movimiento suele ser detectado por la visión periférica que, al ser menos nítida, hace que un caballo pueda salir corriendo ante cualquier movimiento detectado en dicho campo de visión.

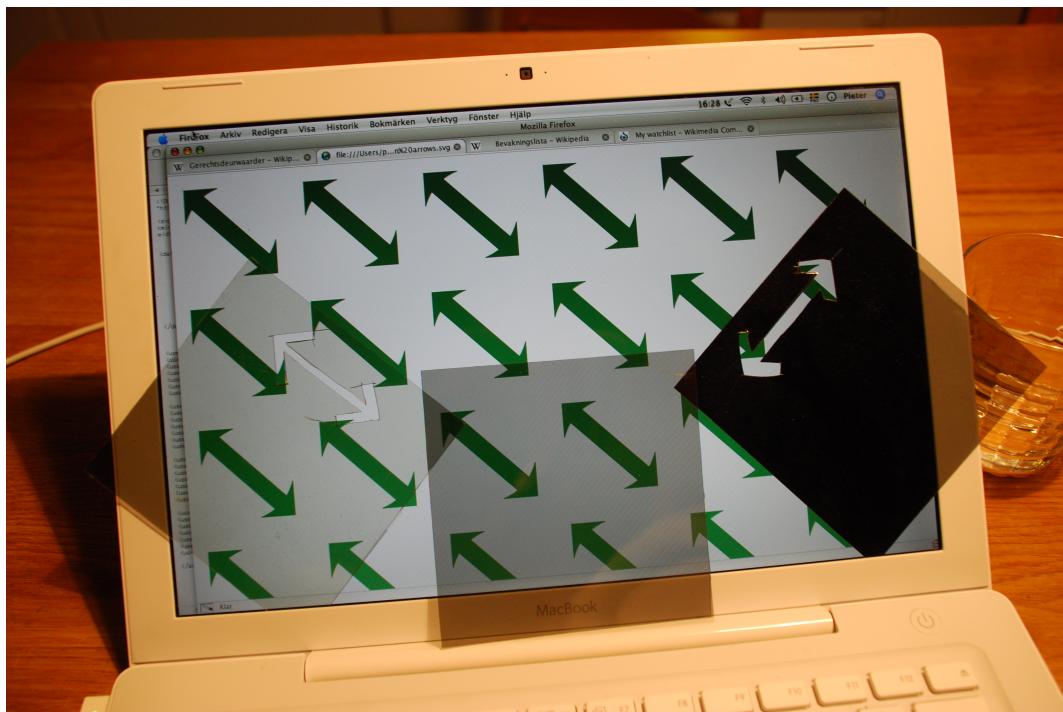


Figura 6.16. Pantalla de ordenador con dos filtros de polarización. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio público <http://bit.ly/2BuIgoi>



Figura 6.17. Detalle del ojo de un caballo. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0 <http://bit.ly/2B1NjXi>

Importante 6.5: Caballos, obstáculos y colores

La visión de los caballos se tiene en cuenta a la hora de diseñar los obstáculos en ciertas pruebas, favoreciendo el uso de colores que pueden ser fácilmente identificados por estos animales.

6.8.2. La visión del gato

Una característica destacada del ojo de los gatos es que **su pupila tiene una geometría variable**, con el objetivo de poder ajustar automáticamente la cantidad de luz disponible. Es por ello que en ocasiones la pupila aparece redondeada y, en otros casos, alargada en sentido vertical (ver [Figura 6.18](#)).



Figura 6.18. Diferentes imágenes con ojos de gato. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0

Al igual que ocurre con el caballo, el gato tiene muchos más fotorreceptores de tipo bastón que cono, lo que hace que pueda tener una buena visión en condiciones de muy poca iluminación. Además, los gatos tienen una **membrana reflectante** detrás de la retina, denominada **tapetum lucidum**, que refleja la luz y permite aumentar aproximadamente un 44 % su sensibilidad. Es precisamente esta membrana la responsable de que los ojos de los gatos brillen en la oscuridad o cuando se les saca una foto (ver [Figura 6.19](#)).



Figura 6.19. *Tapetum lucidum* en un gato . Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 3.0 <http://bit.ly/2AHf0xt>

Es falso además que los gatos no perciban los colores, sino que se piensa que poseen una visión dicromática (al igual que los caballos) que les permite distinguir el azul-violeta y el

verde-amarillo. En la [Figura 6.20](#) se muestran dos composiciones del artista gráfico Nikolay Lamm¹ que, con la ayuda de diversos profesionales, ha recreado como podría ser la visión de los gatos comparada con la de los humanos. En la imagen superior se aprecia como durante el día, los gatos perciben imágenes con menos detalles de colores y más “saturadas”, debido al gran número de bastones (frente a conos) que poseen. Por otro lado, en condiciones de visión nocturna los gatos son capaces de percibir mucho mejor los detalles de las escenas, gracias precisamente a ese gran número de bastones.



Figura 6.20. Recreación de una comparativa entre la visión humana y de los gatos. Fuente: Nickolay Lamm. Licencia: Permiso concedido explícitamente por el autor <http://bit.ly/1blQ9tz>

La visión de los perros es muy similar a la de los gatos en el sentido de la proporción de bastones y conos, visión dicromática y uso del *tapetum lucidum*.

¹Puedes consultar su trabajo en: <http://nickolaylamm.com/>

6.8.3. Visión de las aves

Así como en otros animales, como en los perros, defectos en la visión se pueden ver compensados por el gran desarrollo de otros sentidos, como el olfato, en las aves la visión es su sentido más importante. Lógicamente, dentro de las diferentes especies de aves existen diferencias en este sentido, así por ejemplo las rapaces son las que mejor visión poseen.

Las aves, así como otros vertebrados al margen de los mamíferos, poseen 4 tipos de fotorreceptores de tipo cono, centrados en los colores rojo, verde azul y también en el ultravioleta (UV). Efectivamente, las aves son capaces de ver la radiación UV, lo que se cree que tiene un sentido evolutivo desde el punto de vista de localizar mejor a sus presas, ya que la orina de algunas de ellas refleja bien dicha radiación. Alrededor de un 50 % de las aves posee una segunda fóvea, lo que les facilita un mejor enfoque de las imágenes laterales.

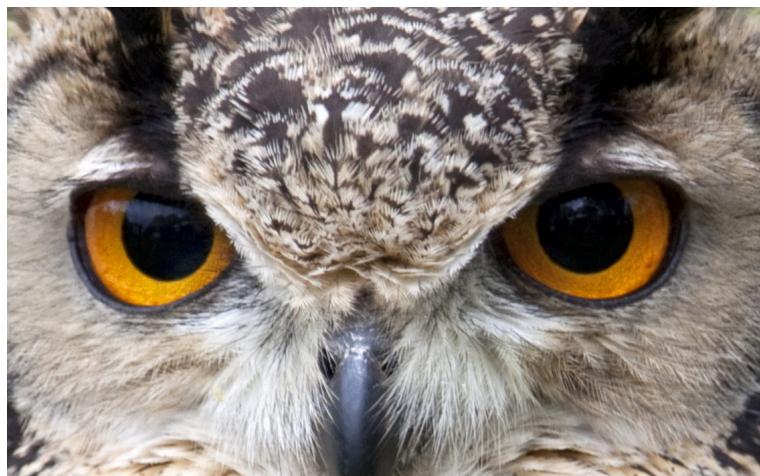


Figura 6.21. Ojos de una lechuza. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC-BY-SA 2.0 <http://bit.ly/2jwHWxt>

Además de disponer de un mayor número de fotorreceptores, de manera análoga poseen un nervio óptico mayor y una mayor proporción del cerebro dedicada al procesamiento de imágenes (al igual que ocurre en los perros con el área dedicada al procesamiento de olores, en comparación con los humanos). El mayor número de fotorreceptores, en concreto de conos, permite a las aves distinguir muy bien los colores, pudiendo detectar así un insecto verde posado sobre una hoja. Por último, cabe mencionar que la detección de movimiento en la visión de las aves es muy superior a la humana ya que, entre otros factores, su sistema de visión es capaz de captar 100 imágenes por segundo, frente a las 25 del ojo humano.

6.8.4. Serpientes: visión termográfica

Las serpientes presentan muchas similitudes en su visión con las de otros vertebrados, aunque una diferencia fundamental se presenta en su manera de enfocar. Si en el apartado dedicado a la visión humana se mencionaba el **proceso de acomodación**, las serpientes no modifican la curvatura del cristalino, sino que lo desplazan adelante y atrás. La mayor parte de las serpientes presentan conos y bastones. Además, algunas especies como los crótalos son capaces de detectar la radiación infrarroja. Tal y como ya se ha comentado en el curso, la



Figura 6.22. Detalle del ojo de una serpiente. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-ND 2.0 <http://bit.ly/2zA0in0>

radiación infrarroja está asociada al calor de los objetos, por lo que esta característica resulta tremadamente útil para detectar a posibles presas. Esta visión infrarroja es posible gracias a unas cavidades termorreceptoras extremadamente sensibles, capaces de detectar variaciones de temperatura de hasta $0,001^{\circ}\text{C}$.

6.8.5. La visión de los insectos

La mayor parte de los insectos adultos posee un par de ojos compuestos y 3 ojos simples denominados *ocelos*. Estos ojos simples, que suelen situarse en la parte superior de la cabeza entre los ojos compuestos, son realmente simples en su funcionamiento y tan solo permiten distinguir diferencias de intensidad en la luz recibida.

Los ojos compuestos están formados por unidades denominadas omatidios que actúan como un ojo independiente, siendo la imagen final la suma de las contribuciones de cada unidad. El número de omatidios o unidades en un ojo compuesto varía según las especies, así por ejemplo en los distintos géneros de hormigas varía entre 6 y 1000; la mosca doméstica posee unos 4000; la abeja, unos 6000; las mariposas, entre 10.000 y 30.000, según la especie; y las libélulas, más de 40.000¹. Se cree del proceso de visión en los insectos surgen imágenes con más “grano” y menos nitidez que en los humanos.

Dentro de la visión de los insectos, las **libélulas** merecen una mención aparte. Ya hemos comentado que los seres humanos tenemos 3 receptores de tipo cono que nos permiten detectar tres colores “básicos”: rojo, verde y azul². Pues bien, las libélulas poseen entre 11 y 30 receptores de color, por lo que su visión les permite apreciar el mundo de manera realmente muy colorida. Su rango de visión va desde el ultravioleta hasta el rojo y, además, son capaces

¹Fuente: www.investigacionyciencia.es <http://bit.ly/2jwnfkW>

²Algunas personas, fundamentalmente mujeres, son capaces de percibir 4 colores debido a una alteración genética.

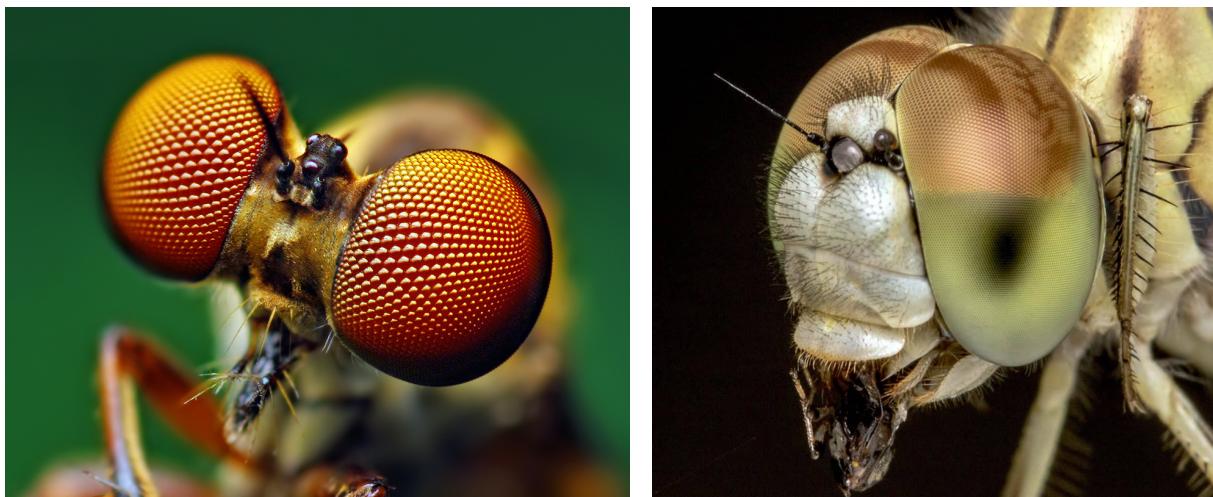


Figura 6.23. Ojos de una mosca *Holcocephala fusca Robber* (imagen izquierda) y de una libélula (imagen derecha). Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 2.0 <http://bit.ly/2j2FsqV>

de percibir la polarización de la luz.

6.8.6. Los “casi” 4 ojos del pez *Anableps anableps*

El reino animal nunca deja de sorprendernos y, en lo referente a la visión, uno de los especímenes más curiosos que a día de hoy sigue fascinando e intrigando a los biólogos es el pez *Anableps anableps*. Los peces de esta especie sufren un curioso desarrollo de sus ojos desde una primera fase larvaria hasta la edad adulta. En la [Figura 6.24](#) puede apreciarse esta evolución, teniendo a la izquierda una imagen el pez en cada fase de crecimiento y a la derecha su desarrollo ocular en cada momento. Como puede apreciarse, el ojo del *Anableps* parece irse dividiendo en 2 lóbulos, que parece que son usados para tener una visión simultánea acuática y aérea, ya que cuando este pez nada justo sobre el agua, un lóbulo permanece sumergido y el otro sobre el nivel del agua, tal y como se muestra en la [Figura 6.25](#). De hecho, el ojo del *Anableps* posee dos pupilas y dos córneas, y se sabe que la retina de cada ojo tiene regiones diferentes que parecen asociadas a las ya mencionadas visiones acuática y aérea.

6.8.7. Pulpos y sepías: percibiendo los colores con un único fotorreceptor

A estas alturas ya tenemos claro cómo funciona el sentido de la visión en los seres humanos y cómo somos capaces de percibir los diferentes colores gracias a los **3 tipos de fotorreceptores de tipo “cono”** que tenemos en nuestras retinas. Sin embargo, hay animales como el **pulpo** o la **sepia** que son capaces de percibir colores aunque sólo poseen un único fotorreceptor. La clave reside en el fenómeno conocido como **aberración cromática**: vamos a ver cómo funciona¹.

La **aberración cromática** es generalmente un fenómeno molesto y por lo tanto a evitar

¹Fuente: Conchi Lillo <https://bit.ly/3nXxspM>.

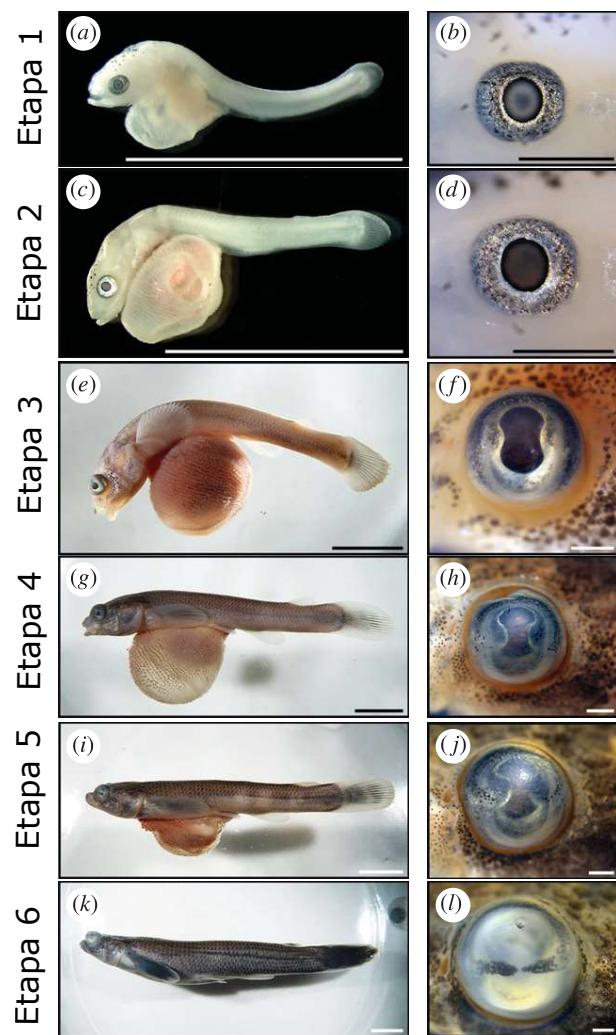


Figura 6.24. Evolución del pez Anableps anableps (izquierda) y de sus ojos (derecha) a través de sus diferentes etapas de crecimiento. Fuente: Perez et al. “Eye development in the four-eyed fish *Anableps anableps*: cranial and retinal adaptations to simultaneous aerial and aquatic vision”. Enlace: <https://bit.ly/3p0zATL>.

en los laboratorios de óptica/fotónica donde se trabaja con lentes. Como sabemos, las lentes nos permiten, por ejemplo, concentrar la luz en un determinado punto, denominado punto focal. Pues bien, en función de las características de la lente es posible que no se puedan “enfocar” los diferentes colores o longitudes de onda en un mismo punto o, lo que es lo mismo, que existen diferentes puntos focales para cada color¹. Esta situación se ha representado en la Figura 6.26, donde en la parte inferior izquierda vemos cómo la luz que llega a lente es concentrada o colimada, pero cada color se proyecta sobre un punto distinto. El efecto puede corregirse mediante el diseño de las lentes o el uso de varias lentes combinadas, como se muestra en la parte superior izquierda de la figura. Además, en la parte derecha de la figura se muestran fotografías que ilustran el efecto de la aberración cromática. Puede apreciarse como mientras la imagen superior, libre de aberración, aparece perfectamente nítida, la imagen

¹Esto no debería sorprendernos a estas alturas, ya que conocemos el efecto de dispersión y sabemos que el índice de refracción de un material depende de la longitud de onda, por lo que la refracción afectará de manera distinta a los diferentes colores, al igual que ocurre con el arco iris.



Figura 6.25. Imagen del pez Anableps anableps donde se puede observar la disposición de sus ojos en relación a la superficie del agua.

inferior se aprecia más borrosa, incluso pudiendo apreciar la separación de colores en ciertos puntos.

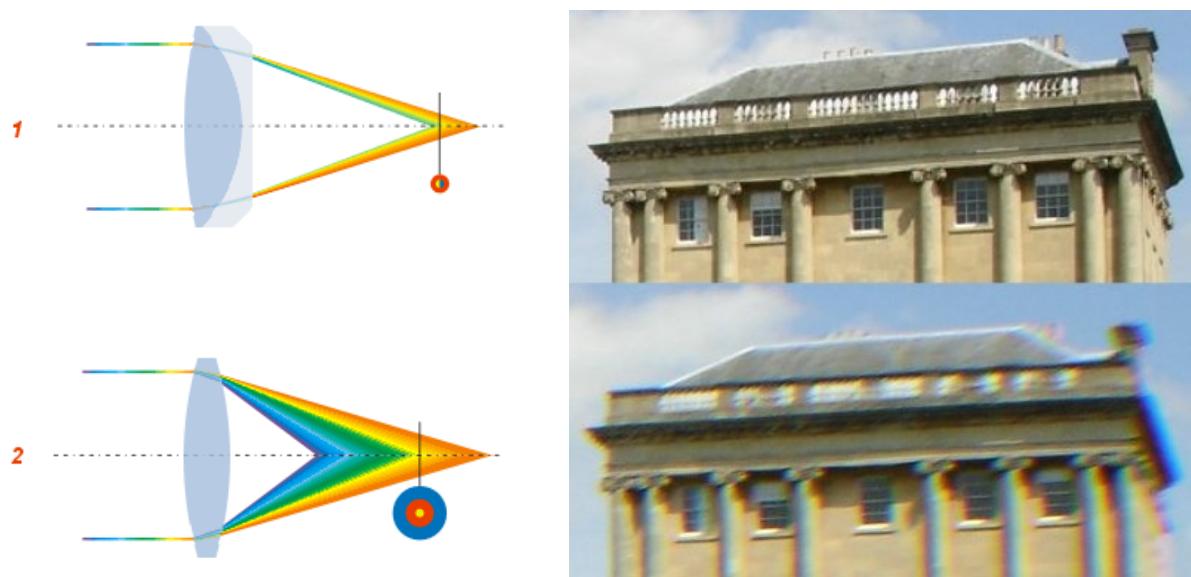


Figura 6.26. Representación esquemática de la aberración cromática (parte izquierda) y ejemplo del efecto en fotografía (parte derecha). Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0 <http://bit.ly/3qA20jj>

Ahora bien, ¿cómo pueden aprovecharse de este fenómeno algunos animales para poder percibir los colores? Como hemos comentado, los pulpos y las sepias sólo tienen un fotorreceptor para percibir el color, por lo que no pueden usar diferentes tipos de conos para generar la percepción de estar viendo diferentes colores. Sin embargo, si el ojo, en concreto la pupila, está diseñada de tal manera que se genere la ya comentada aberración cromática, cada color puede proyectarse en una zona distinta de la retina, estando cada zona dedicada a “procesar”

dicho color. Esto es lo que ocurre con las pupilas de las sepías y pulpos que, como vemos en la Figura 6.27 tienen unos “extraños” diseños en forma de W (sepia) y alargada (pulpo).



Figura 6.27. Ejemplos de ojos de sepia (izquierda) y pulpo (derecha). Fuente: Framepool y Octolab.tv. Enlaces: <https://bit.ly/35PMwzs> y <http://bit.ly/3nU0ox2>

Aunque pueda parecer raro viendo las imágenes de la Figura 6.27, en realidad los ojos de los pulpos y de los seres humanos son muy similares en cuanto a su estructura y funcionamiento. Una diferencia principal se encuentra en como enfocamos objetos a diferentes distancias. Mientras que nosotros lo hacemos mediante la córnea y modificando la forma de nuestra “lente”, el cristalino; **los pulpos son capaces de mover esa lente**, al estilo de lo que hacemos con una cámara de fotos: de hecho esto hace que **los pulpos no tengan cornea**.

Existe también la teoría de que los pulpos tienen dos “modos de visión” que son capaces de alternar: uno en el que son capaces de percibir los colores pero donde las imágenes procesadas serían borrosas debido al efecto de la aberración cromática, tal y como se aprecia en la Figura 6.26, y otro ausente de color en el que serían capaces de ver imágenes perfectamente nítidas.

Y para completar la información sobre estas fascinantes y complejas criaturas, otra teoría fascinante: algunos expertos sostienen que, además de con sus ojos, **los pulpos también son capaces de ver ¡con sus tentáculos!**. Esto no debiera resultar tan sorprendente sabiendo que más de dos tercios de las neuronas de estos animales se encuentran en sus tentáculos, entre otras cosas para poder **saborear** a través de ellos. Además, se sabe que los tentáculos poseen células especializadas denominadas **cromatóforos** que son las que les permiten cambiar su color para adaptarse a su entorno. Podemos entenderlas como bolsas que pueden llenarse de pigmentos de color amarillo, marrón o negro y que los pulpos pueden controlar para modificar su color. De hecho, las increíbles habilidades de camuflaje de los pulpos no se deben sólo a los cromatóforos, sino también a las **células reflectantes** que se sitúan debajo de éstos y que actúan a modo de espejos, reflejando la luz cercana.

Se cree además que las neuronas de los tentáculos también son capaces de procesar la luz recibida a través de esos cromatóforos de los tentáculos, ya que poseen moléculas foto-sensibles, dando lugar así a un **sistema combinado de visión ojos-tentáculos**.

Importante 6.6: La visión de los pulpos

Si te has quedado con ganas de saber más sobre estas increíbles criaturas puedes consultar los siguientes recursos:

Breve vídeo (20 segundos) donde puedes ver los cromatóforos en acción (acuérdate de activar el sonido pulsando sobre el altavoz que sale en la parte inferior derecha del vídeo):

<https://bit.ly/3qHZ3xh>

Vídeo de 11 minutos donde se habla sobre los cromatóforos en más detalle: <http://bit.ly/38T0ktt>

6.8.8. El pez “cabeza transparente”

Para finalizar esta sección presentamos el caso del pez *Macropinna microstoma*, también conocido como “pez duende” o **pez cabeza transparente**, por razones que quedan claras al observar la imagen de la [Figura 6.29](#). Este pez vive a profundidades de entre 600 y 800 metros, donde lógicamente la luz escasea y se cree que su cabeza es transparente precisamente para optimizar la captura de luz. Hay que destacar que lo que en la imagen pueden parecer los ojos del pez (en la parte frontal de su cabeza), son en realidad sus órganos olfativos. Los ojos, de una gran sensibilidad, son las dos esferas verdes que se sitúan dentro del cráneo, disponiendo de una visión periférica que les permite disponer de una gran visión periférica. Este pez mide aproximadamente entre 4 y 5 cm de longitud.



Figura 6.28. Imagen del pez *Macropinna microstoma* o pez cabeza transparente. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: CC BY-SA 4.0. Enlace: <https://bit.ly/3xb0CcJ>.

6.9. Conclusiones

En este apasionante capítulo se ha realizado una revisión por el proceso de visión. Comenzando por la visión humana, se ha analizado la estructura del ojo y descrito el proceso de visión, señalando también algunos defectos típicos de la visión e, igualmente, algunos detalles sobre la visión con gafas 3D o la posibilidad de recuperar la vista mediante el uso de cámaras e implantes en la retina.

Además, se ha presentado una breve revisión de las particularidades de la visión en otros animales, como los caballos, perros y gatos, aves, serpientes e insectos.

Con este capítulo se completa el recorrido que este curso propone alrededor de la óptica y la fotónica, sirviendo de introducción a la comprensión de los fenómenos que tienen que ver con la luz y, por extensión, a las ciencias y tecnologías que la emplean para el desarrollo de infinidad de tareas.



Figura 6.29. Imagen de los ojos de una araña saltarina. Fuente: Javier Rupérez.