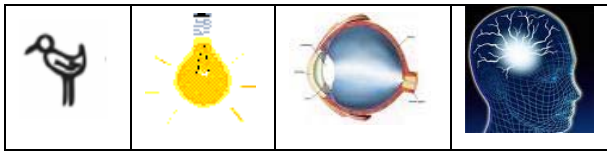


LUZ Y VISIÓN

INTRODUCCIÓN

A través de la visión obtenemos la mayor parte de la información con la que conocemos e interpretamos nuestro entorno. Identificamos objetos (apreciando propiedades como su tamaño, forma, color, brillo, textura), los localizamos en el espacio (estimando su posición, su proximidad o lejanía,..) y seguimos aspectos de su evolución (observamos su movimiento, cambios en algunas sus propiedades,..). Por todo ello, la comprensión de cómo vemos las cosas que nos rodean ha sido uno de los temas que más ha interesado a los científicos de todas las épocas.



Puesto que para que tenga lugar la visión han de intervenir el **objeto** visto, la **luz**, el **ojo** y el **cerebro**, la comprensión de los procesos involucrados ella requiere de aportaciones procedentes de varias disciplinas: física, fisiología, neurología.

Las ideas sobre cómo se produce la visión humana evolucionaron y siguen evolucionando a lo largo de la historia al ritmo que lo hacen estas disciplinas.

En el campo de la física podemos considerar tres etapas principales de esta evolución: 1) Las propuestas que hicieron en la antigüedad los filósofos griegos. 2) El modelo de Alhazen en el siglo XI. 3) El modelo de Kepler a principios del siglo XVII. Este último, el modelo de luz y visión de Kepler, introdujo un concepto de imagen óptica y un proceso para su formación que superó incoherencias de las ideas anteriores y tiene suficiente poder explicativo como para continuar vigente en la enseñanza de la física. Sin embargo, resulta limitado porque deja de lado la percepción del color, aspectos importantes de la fisiología del ojo y la función esencial que ejerce el cerebro en la construcción de imágenes y en su interpretación.

MODELOS DE VISIÓN EN LA ANTIGUA GRECIA

Encontramos las primeras propuestas elaboradas sobre el tema de la visión en la antigua Grecia. En el siglo VI a. de C. Pitágoras (582 a. de C. - 507 a de C.) planteó que la luz emanaba del ojo en forma de rayos luminosos que se propagan en línea recta formando conos con el vértice de éste. Supuso que esta emanación chocaba con los cuerpos y la visión era el resultado de este choque. Medio siglo después, Empédocles (495 a. de C - 435 a. de C) consideró a la luz constituida por efluvios que eran proyectados por las fuentes incandescentes, los ojos y los cuerpos visibles. Y, medio siglo más tarde Platón (427 a. de C - 347 a. de C.) planteó que mientras nuestros ojos emitían pequeñas partículas de luz, del objeto también emanaba una sutil capa o un efluvio (la "eidola") y que era el contacto entre el fuego visual emitido por el ojo y este efluvio lo que producía la sensación de la visión.

Existe una analogía entre estas primeras propuestas sobre la visión y el sentido del tacto.

Del mismo modo que cuando tocamos un objeto tenemos sensaciones que nos permiten interpretar propiedades como su rugosidad o su temperatura, estos modelos de la visión



consideraron que cuando la luz enviada por nuestros ojos interaccionaba con el objeto, percibíamos su imagen.

Con los atomistas (Demócrito, Leucipo, Epicuro..) se planteó una teoría de la visión algo más elaborada, que debía encajar en un marco de pensamiento para el que la percepción sensorial requería contacto físico. Demócrito (460 a. de C. - 360 a. de C.) planteó que de los objetos emanaba una sutil capa de átomos que forman un simulacro del objeto (equivalente a la eidola o imagen del mismo) y consideró que esos átomos "vuelan" hasta los órganos de la vista para provocar la visión.

La analogía en este caso se puede establecer con el sentido del olfato, puesto que, según esta propuesta los átomos de la visión fijaban la imagen en los ojos del mismo modo que otros átomos impresionan el olfato. Demócrito supuso además que los cuerpos emitían átomos de distintas formas y tamaños que portaban diferentes aspectos de su imagen.

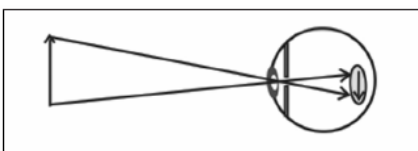


Algunas de las incongruencias de estas primeras concepciones de la imagen óptica fueron expresadas un siglo después por Aristóteles (384 a. de C. - 322 a. de C.) y por otros filósofos griegos. Así, por ejemplo, se plantearon cuestiones del tipo: Si los objetos emiten imágenes, ¿qué ocurre cuando éstas se cruzan en el aire?, ¿cómo puede caber la imagen de un gran objeto en la pupila del ojo? Si la imagen desprendida es la causa de la visión, ¿por qué sólo ve el ojo y no las otras partes del cuerpo a donde llega? Para Aristóteles la luz era una cualidad que hace posible la visión y no una emanación de ningún cuerpo, pero sus explicaciones imprecisas y oscuras no permitieron superar las carencias de las ideas precedentes.

MODELO DE VISIÓN DE ALHACEN

En el siglo XI Ibn al-Haytam, conocido en occidente como Alhazen (965-1039) propuso un modelo de luz y de visión que superó bastantes de las dificultades que habían planteado los modelos de la antigüedad. Basándose en el hecho de que el color con que se ven los objetos está en consonancia con la luz que los ilumina, pensó que la luz debía intervenir en la visión, más precisamente que debía ser considerada como una entidad independiente del objeto y del ojo que hace de intermediario en la visión.

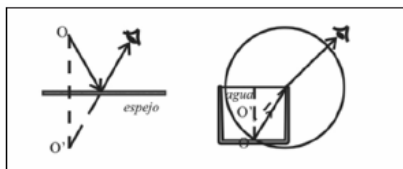
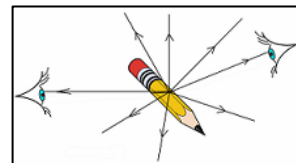
Alhazen realizó numerosas e importantes contribuciones en matemáticas, anatomía, medicina, astronomía y física. Escribió un "Libro de óptica" (1021) considerado uno de los libros más influyentes en la historia de la física. Por primera vez utilizó procedimientos del método científico para demostrar la propagación rectilínea de la luz. Estudió la reflexión, la refracción y la dispersión en colores, y realizó varios experimentos con dioptrios y espejos.



Fue el primero en dar una interpretación clara del funcionamiento de la cámara oscura y planteó un modelo de visión según el cual ésta consistía en la formación de una imagen óptica en el interior del ojo que funcionaba de forma semejante a su modelo de cámara oscura. Supuso que uno de los rayos de luz emitidos por cada punto del objeto iluminado atravesaba el pequeño agujero de la pupila y formaba el punto correspondiente de la imagen en una pantalla interior de esa "cámara".

Con esta propuesta Alhazen había modelizado al ojo humano como un instrumento óptico, ayudando a que la ciencia de la visión empezara a ser una ciencia de la luz. La luz pasó a ser considerada como una entidad física en el espacio independiente del ojo del observador y de la fuente luminosa y que, por tanto, podía ser objeto de estudio en sí misma independientemente de la visión.

Esta concepción de la visión y de la imagen óptica de Alhazen se sustentó en varios conceptos novedosos. Uno de los más importantes fue considerar expresamente a los objetos que vemos como **fuentes secundarias de luz** e idealizar **las fuentes luminosas extensas** como **conjuntos de fuentes puntuales** que emiten rayos en todas las direcciones. Las fuentes de luz propia, como una estrella o una bombilla, emiten luz en todas las direcciones y son vistas cuando algunos de los rayos emitidos llegan al ojo. Puesto que podemos ver objetos (como, por ejemplo, una mesa o un lápiz) que no emiten luz propia, se han de considerar estos objetos como fuentes secundarias de luz.



En sus estudios, Alhazen consideró los rayos de luz como trazos rectos de cuyo comportamiento geométrico se pueden derivar consecuencias ópticas. Al estudiar la reflexión y la refracción fue el primero en descomponer los rayos en componentes horizontal y vertical e incluso encontró un resultado similar a

la ley de Snell de la refracción, aunque no lo expresó matemáticamente. Estos avances le permitieron explicar varios fenómenos de visión indirecta como cuando vemos un objeto al mirar a un espejo plano o cuando se encuentra sumergido en el agua.

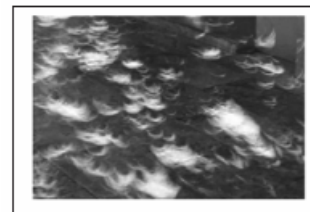
El modelo de visión de Alhazen superó muchas carencias anteriores, pero erró al considerar que la formación de cada punto de la imagen óptica se realizaba con un único rayo procedente de cada punto del objeto. En realidad, esta suposición es incompatible con las observaciones de la cámara oscura (resulta curioso que, pese a su éxito inicial, la teoría de Alhazen no pudiera explicar precisamente algunas observaciones con la cámara oscura, cada vez más utilizada en la Edad Media) y con el comportamiento de las lentes (desconocidas en su época).



MODELO DE VISIÓN DE KEPLER

En 1604 Kepler (1571-1630) publicó el libro *Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur* que estaba dividido en once capítulos, los cinco primeros dedicados a cuestiones de óptica y los restantes a temas de astronomía. Aunque Kepler es mucho más reconocido por sus aportaciones en astronomía, también hizo contribuciones muy importantes en óptica: Enunció una primera aproximación satisfactoria de la ley de la refracción, distinguió claramente entre los problemas físicos de la visión y sus aspectos fisiológicos, y analizó cuidadosamente el aspecto geométrico de diversos sistemas ópticos.

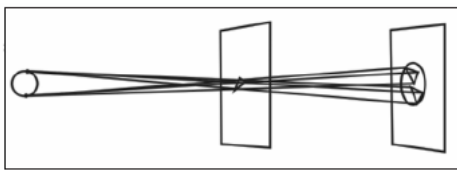
Kepler conocía un antiguo problema, que ya había planteado Aristóteles y al que no se había dado solución: *¿por qué los rayos de Sol percibidos durante un eclipse a través de los dedos entrecruzados o entre las hojas de los árboles dibujan lúnulas sobre el suelo?* Las lúnulas son imágenes de la Luna que se producen cuando la luz solar atraviesa pequeñas rendija que dejan las hojas o nuestros dedos. El proceso de formación de estas imágenes es similar al que forma imágenes en una cámara oscura. Trasladado a ella el problema, nos deberíamos preguntar por qué la forma del agujero por donde entra la luz no influye en la forma de la imagen del objeto que se ve en la pantalla. La teoría de Alhazen no resolvía esta cuestión.



Fotografía tomada en Valencia de lúnulas observadas en la sombra de un árbol durante el eclipse de Sol del 3-10-2005

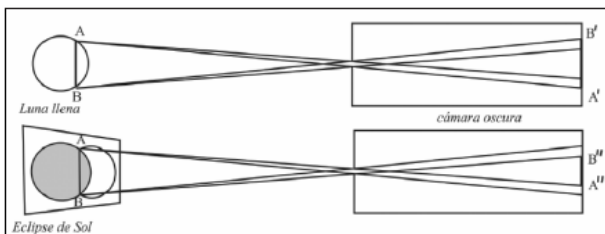
El problema fue muy evidente durante un eclipse de Sol que tuvo lugar en el año 1600. Kepler observó que el diámetro del disco lunar medido en una cámara oscura durante el eclipse era ¡menor que cuando se medía el mismo diámetro en fase de Luna llena! El astrónomo Tycho Brahe (1546-1601), también se había apercibido del hecho y ante las dificultades de encontrar una explicación óptica, llegó a formular una hipótesis de dilatación periódica de la Luna. Porque, si tal como planteaba el modelo de Alhazen, en la cámara oscura entrara para formar la imagen un único rayo procedente desde cada punto del disco solar, no se podría justificar la variación del diámetro lunar que se observa en la pantalla de este dispositivo.

Para afrontar estas dificultades Kepler planteó un nuevo modelo de formación de imágenes. El primer aspecto novedoso de su propuesta fue considerar a la luz emitida por cada punto del objeto como una **esfera en expansión** y a los **rayos** solamente como **elementos direccionales ideales**, sin entidad real. Escribió: *El rayo de luz no es nada de la misma luz que marcha.*



De acuerdo con la propuesta de Kepler, cuando una parte del haz esférico emitido por la fuente puntual entra en el orificio de la cámara oscura, se selecciona un haz divergente de luz y se obtiene en la pantalla una mancha luminosa con la misma forma de la hendidura, por ejemplo triangular. Como, para una fuente luminosa extensa y lejana, se trazan multitud de haces divergentes desde cada uno de sus puntos, la superposición de las pequeñas manchas triangulares compone en la pantalla una **réplica de la fuente** luminosa, es decir, una figura que tiene la misma forma que ella.

Además de explicar la obtención de réplicas de las fuentes luminosas que se observan en la cámara oscura, la hipótesis geométrica que planteó Kepler sobre la propagación de la luz también resuelve el problema de la dilatación del disco lunar que se observa en dicha cámara durante el eclipse solar.



En la figura adjunta se señala una cuerda, AB, sobre el disco lunar en fase de Luna llena. Trazando haces de luz desde sus extremos, se obtiene en la pantalla de la cámara oscura una cuerda de tamaño A'B' en el círculo luminoso (figura superior). Ahora bien, durante un eclipse de Sol, la cuerda lunar AB no es una fuente luminosa y los puntos A y B son fuentes puntuales del Sol que limitan con esa cuerda.

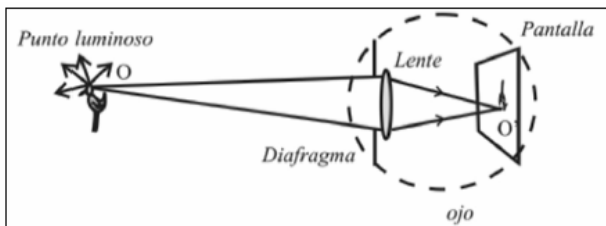
Las manchas luminosas obtenidas sobre la pantalla de la cámara oscura tienen cierto tamaño y, por eso, la medida de la cuerda del círculo negro, A''B'' (figura inferior), es más pequeña que en el caso de Luna llena.

Un segundo aspecto esencial de la teoría de Kepler sobre la luz y la visión se refiere al proceso de formación de imágenes, que sustentó en conocimientos acumulados en su época sobre de la fisiología del ojo y sobre el funcionamiento de las lentes.

Respecto a la fisiología ocular, Leonardo Da Vinci (1452-1519) había supuesto un siglo antes que la formación de la imagen visual debía de formarse en la retina, aunque el hecho de que la imagen sobre ésta es invertida le debió de parecer inaceptable y dibujaba los ojos de forma que los rayos luminosos se cortaban en su interior dos veces. Casi un siglo después, en 1583 un anatomista suizo llamado Platter (1536-1614) realizó un experimento que probó que la retina era exactamente la sede de la foto-recepción. Hasta entonces, a pesar de la propuesta de Leonardo Da

Vinci, muchos pensaban que esta función la realizaba el cristalino. Platter cortó los ligamentos del cristalino y comprobó que la visión no desaparecía.

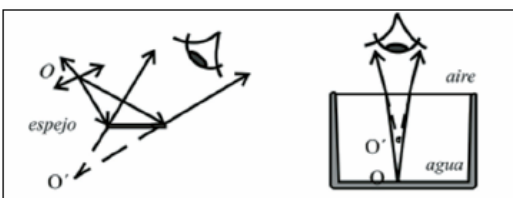
En cuanto a los estudios sobre el funcionamiento de las lentes y su relación con la visión humana, se atribuye también a Leonardo da Vinci la primera descripción de un dispositivo que podría asimilarse a una lente de contacto y el mérito de haber sido el primero que planteó la posibilidad de usarla para corregir problemas visuales. Posteriormente, durante los siglos XVI y XVII se inventaron varios instrumentos que usaban lentes para propiciar o mejorar la visión de objetos muy pequeños o muy alejados (entre ellos el telescopio y el microscopio). Por su parte, Galileo, contemporáneo de Kepler, hizo en 1609 importantes aportes teóricos y prácticos sobre el funcionamiento de las lentes, que el mismo aplicó a la construcción de gemelos y el perfeccionamiento del anteojo astronómico.



En este contexto, Kepler consideró al ojo humano como una cavidad oscura esférica y acuosa con una lente de convergencia variable (el cristalino) en su interior. Lo modelizó como un **sistema óptico formado por una lente convergente** (el cristalino) **y una pantalla** (la

retina). Según su propuesta, la visión se produce con la **formación de una imagen del objeto en la retina**. Para formar dicha imagen, cada haz de luz esférico y divergente que entra en la pupila converge en un punto de la misma, siendo la imagen extensa de un objeto la colección de todos los puntos imagen.

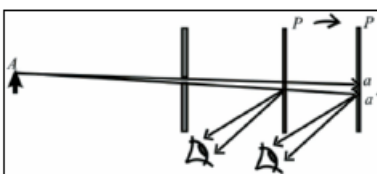
El **objeto**, por tanto, es considerado como un **conjunto de fuentes puntuales** de diferentes tipos de luz y la **imagen** como la **colección de esas mismas fuentes de luz**, sólo que con menores intensidades. Según Kepler, *las características de esta imagen* (color, posición, distancia, tamaño) *no se pueden explicar más que por referencia al ojo*, y por eso reconocemos el objeto al mirar su imagen en una pantalla.



Este concepto de imagen óptica también explica los fenómenos de visión indirecta cuando se mira a un espejo o a un objeto sumergido en el agua. Igual que en la visión directa, en la visión indirecta un haz de luz divergente emitido por cada punto del objeto entra en el ojo para converger en la imagen de la retina. El ojo localiza la

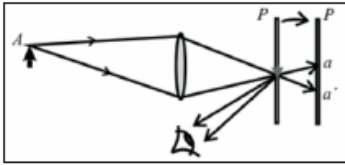
posición de lo que ve en el vértice del cono divergente u origen geométrico del haz de luz que llega al ojo (lo que llamamos la **imagen virtual** de O, O'). Para encontrar el punto observado O' no es necesario trazar una "línea de imagen" de O a O' (como se necesitaba hacer usando el modelo de Alhacen). Solo hay que prolongar hacia atrás el cono de luz divergente que llega al ojo.

Otra contribución del modelo de visión de Kepler fue aclarar la diferencia entre lo que es una imagen óptica, como la formada usando una lente convergente o nuestros ojos, y lo que hemos llamado una réplica, como la que se obtiene usando una cámara oscura.



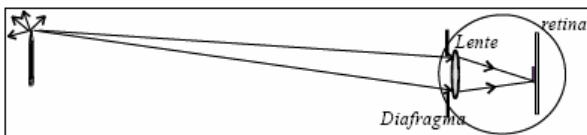
Tal como se explica en la página anterior, en la pantalla de una cámara oscura se obtiene una réplica del objeto que se conforma sumando múltiples imágenes del orificio. Por eso, si dicho orificio es suficientemente pequeño, al alejar o

acercar la pantalla se sigue viendo, prácticamente sin alteraciones, la misma réplica.

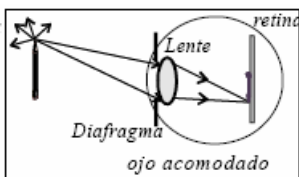


En cambio, cuando se usa una lente convergente, ésta desvía la luz procedente del objeto, haciendo converger el haz esférico procedente de cada punto del mismo a una determinada distancia. Para ver la imagen nítida, la pantalla se ha de situar exactamente a esa distancia. Si se aleja o se acerca la imagen se deja de ver.

El hecho de que no podamos distinguir si la figura que vemos en una pantalla es una imagen óptica formada con una lente convergente o es una réplica formada con una cámara oscura de agujero pequeño, se debe a las limitaciones del poder de resolución del ojo humano. En las mejores condiciones de contraste luminoso no se pueden distinguir separados dos puntos cuya distancia subtendida con el ojo un ángulo menor de 1' de arco. Si la mancha luminosa producida en la pantalla de la cámara oscura por el haz divergente que deja pasar el agujero es suficientemente pequeña, la luz difundida desde cualquier punto de dicha mancha llega a nuestro ojo y converge en la retina en un área menor que esta superficie, por lo que es interpretada como si proviniera de un solo punto.



Por otra parte, puesto que la imagen que forma una lente convergente se produce a una determinada distancia de ella y esta distancia de enfoque depende a su vez de la distancia a la que se encuentre el objeto visto, la lente del ojo (el cristalino) es flexible en el modelo de Kepler. Cuando el objeto visto se encuentra a mucha distancia el ojo está relajado, el cristalino tiene poca convexidad y la imagen se forma en la retina.

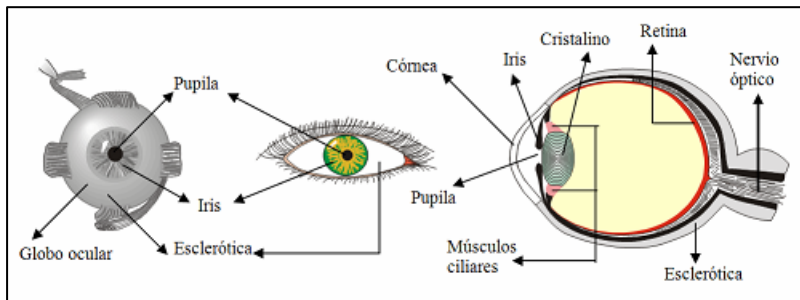


Si al acercar el objeto el ojo no cambiase en nada, la imagen se formaría detrás de la retina, y no se produciría la visión o (si el desplazamiento de la imagen no es excesivo) la visión sería borrosa. Según Kepler, al mirar un objeto próximo el cristalino se abomba (aumenta su convexidad) y así se consigue que la imagen se sitúe de nuevo en la retina y sea la visión nítida. Este procedimiento que sigue el ojo para enfocar los objetos se llama **acomodación**.

Para terminar esta descripción del modelo de Kepler es importante saber que él asignó el término **imagen** a la que supuestamente se obtiene en la retina del ojo y **pintura** a la figura que se puede ver en una pantalla gracias a un sistema convergente. Históricamente esta distinción se ha perdido. Descartes (1596- 1650), en 1637, y Newton (1643-1727), en 1704, plantearon que, dado que el modelo de ojo es similar a un sistema óptico convergente formado por una lente delgada y una pantalla, a la representación que vemos en ella también se la debe denominar imagen, por imitación a la que se forma (supuestamente) en la retina del ojo. Ahora bien, la imagen que vemos en la pantalla de un sistema convergente sólo existe cuando es interpretada por el cerebro del observador. En ausencia de un observador, sólo podemos decir que en esa pantalla existe una distribución de tipos de luz con diferentes intensidades, similar a la emitida por la fuente luminosa. Esa reproducción del patrón de luz emitido por el objeto que vemos en la pantalla no es una especie de objeto plano pegado en ella, como una fotografía, que existiría allí aunque no la miráramos. Como veremos, tampoco en la retina se forma una imagen acabada, como la que se obtiene con una cámara fotográfica.

FISIOLOGÍA DEL OJO

El modelo de visión de Kepler interpretó de forma satisfactoria muchos aspectos del proceso físico de la visión. Sin embargo, también adolece de limitaciones y errores propiciados por el desconocimiento en su época de aspectos sobre la fisiología del ojo y del papel que juega el cerebro en la construcción de las imágenes.



El diagrama muestra un esquema del ojo humano que viene a ser un cuerpo esférico de unos $2,5\text{cm}$ de diámetro. El orificio por donde entra la luz se llama pupila y tiene un diámetro entre 2mm y 8mm que se regula según la intensidad de luz. La capa más externa del ojo se llama esclerótica y consta

de una membrana blanca, llamada córnea, que en su zona anterior es abombada y transparente. La primera matización que hemos de hacer al modelo de visión de Kepler es que es la córnea y no el cristalino quien produce casi toda la convergencia de los haces de luz incidentes. La luz penetra en el ojo a través de la córnea, atraviesa la pupila y después el cristalino. Éste está constituido por una materia gelatinosa (de índice de refracción $1,4$) y se puede considerar una lente biconvexa, que provoca una segunda convergencia. Esta segunda convergencia realiza una especie de "ajuste fino" del haz, de tal forma que, mediante un proceso instintivo, se modifica la curvatura del cristalino propiciando que la imagen se produzca en la retina (acomodación).

En la acomodación se contrae un músculo, llamado ciliar, haciendo que disminuya la tensión sobre los unos ligamentos suspensores que sostienen el cristalino. A medida que disminuye esta tensión, el cristalino se hace más esférico y así aumenta su poder de refracción. La capacidad de acomodación del ojo humano está limitada por las características físicas del cristalino y la capacidad de contracción del músculo ciliar. Un ojo medio (también llamado ojo emétrope) puede acomodar objetos situados entre "el infinito" (el músculo ciliar está relajado y el ojo presenta la mínima convergencia) y a 25cm del ojo (el músculo ciliar produce la máxima convergencia). Dichos puntos reciben el nombre de **punto remoto** y **punto próximo** respectivamente.

Para la recepción de la imagen hay en la retina unas células especializadas, llamadas conos y bastones, que son sensibles a los rayos luminosos. Los conos, en un número del orden de siete millones, son sensibles a detalles finos de contraste, color y forma. Se activan en buenas condiciones de iluminación o luz "diurna". La mayor parte de los conos se encuentran en una depresión cerca del polo posterior del globo ocular, conocida como fovea. Por su parte, los bastones, en número del orden de 100 millones, se localizan en las partes más periféricas de la retina y se activan cuando reciben luz tenue o "nocturna". Los bastones no son capaces de distinguir el detalle fino o el color. Por eso, con baja iluminación es difícil distinguir los colores o ver límites precisos.

Los conos y los bastones generan impulsos eléctricos al recibir la luz, existiendo en la retina otros dos grupos de células que se encargan de transmitir esos impulsos nerviosos originados por los conos y bastones al cerebro. Los axones de uno de estos grupos forman las fibras del nervio óptico, que abandona la región posterior del globo ocular un poco hacia el lado nasal del centro del mismo. Así pues, los impulsos se propagan al cerebro a través del nervio óptico y es ahí, en el cerebro, donde se realiza la construcción de la imagen y se interpreta lo que vemos

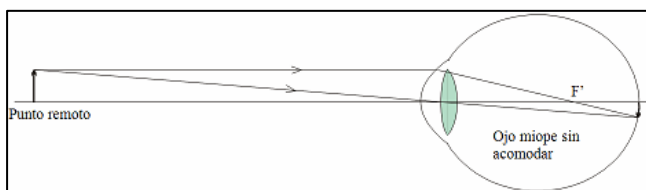
mediante un proceso bastante complejo. Como veremos más adelante, nada tiene que ver este proceso con la simple recepción de una supuesta imagen acabada.

ANOMALÍAS VISUALES

Una de las aplicaciones del modelo de visión de Kepler que más ha influido en mejorar la calidad de vida de las personas ha sido la comprensión y la corrección de "anomalías" visuales. En el apartado precedente hemos descrito un ojo medio o emétrope, que viene a ser una especie de valor promedio para toda la población mundial. Evidentemente, cada ojo particular tiene propiedades más o menos alejadas del *ojo medio* y, en ocasiones, puede tener algunas dificultades para facilitar una visión nítida (dificultad para la acomodación, para percibir los colores, para delimitar mejor los contornos, etc.) Veamos algunas de las "anomalías" visuales más comunes.

Miopía

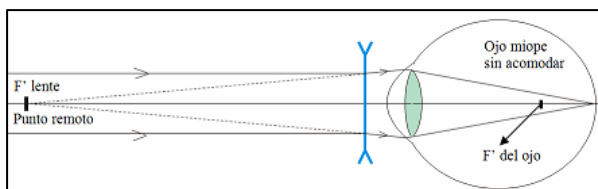
La miopía es una anomalía de la visión consistente en que el ojo relajado enfoca la imagen de los objetos muy alejados delante de la retina en lugar hacerlo en la retina. La causa puede ser una curvatura de la córnea demasiado pronunciada o, lo que es más habitual, que el globo ocular sea demasiado largo. Durante el periodo de crecimiento, el globo ocular también crece, lo que explica que el grado de miopía aumente con la edad y, normalmente, deje de aumentar en la edad adulta. Una persona miope no puede ver con nitidez los objetos lejanos porque su punto remoto está demasiado próximo al ojo. La imagen de esos objetos se forma detrás de la retina y, por tanto, se ve borrosa.



Al ir acercando un objeto lejano, su imagen también se va aproximando a la retina hasta que, tal como indica el diagrama adjunto, un ojo miope relajado (sin acomodar) puede formar esa imagen justo en la retina. Esa posición corresponde al punto remoto de ese ojo miope

(lógicamente varía según el grado de miopía). Obsérvese que el foco del ojo miope, F' (punto donde convergen los rayos paralelos), está situado antes de la retina, en lugar de en ésta como correspondería al ojo emétrope.

Si seguimos acercando el objeto desde el punto remoto hacia el ojo, se puede seguir viendo con nitidez acomodando el ojo para que la imagen se siga formando en la retina. Como el ojo miope empieza a acomodar estando el objeto a menor distancia que el ojo normal, su punto próximo también se sitúa a una distancia menor que los 25cm del ojo. Por eso, por lo general, las personas miopes ven bien los objetos muy próximos.

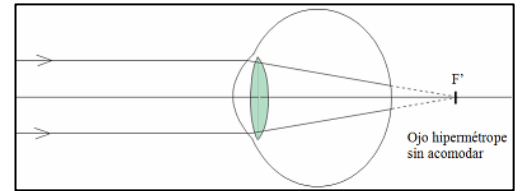


Para corregir la miopía se utiliza una lente divergente adaptada para que el foco imagen de la misma coincida con el punto remoto. De esta forma un objeto muy alejado (situado en el

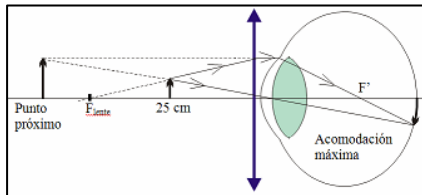
"infinito") equivale a un objeto situado en el punto remoto del miope. La lente divergente separa los rayos paralelos para que después de atravesar el ojo converjan en la retina. Tal como indica el diagrama adjunto, esto equivale a desplazar el foco del ojo, F' , a la retina.

Hipermetropía

Es una anomalía opuesta a la miopía, siendo, en general, la causa también la contraria. El ojo hipermetrope relajado tiene el foco imagen detrás de la retina en lugar de en ella. Por ello, no ve con nitidez los objetos situados más cerca que su punto próximo que está más alejado que el de un ojo normal. Es decir, hay una zona que va desde los 25cm (punto próximo para un ojo normal) hasta la distancia a la que tenga el punto próximo el hipermetrope, en la que éste no ve con claridad.



Para corregir la hipermetropía se utiliza una lente convergente con una distancia focal mayor que 25cm . La lente aproxima los rayos procedentes de un objeto situado exactamente a 25cm antes de que lleguen al ojo. De los



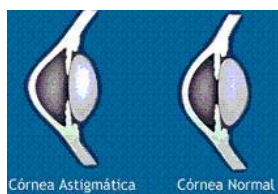
objetos situados entre el punto próximo del ojo hipermetrope y 25cm , la lente forma una imagen virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto. Acomodando el ojo, un hipermetrope consigue que la imagen de estos objetos se forme en la retina y se vea nítidamente. Tal como indica el diagrama adjunto, la acomodación máxima se produce a 25cm del ojo.

Vista cansada o presbicia

La presbicia es una anomalía que todas las personas adquieren con la edad (se denomina también vista cansada). Se produce porque el cristalino va perdiendo gradualmente elasticidad y el músculo ciliar se debilita, por lo que el poder de acomodación disminuye y el punto próximo se aleja. Para corregir la presbicia hace falta una lente convergente igual que ocurre con la hipermetropía. La diferencia con ésta es que una persona con la vista cansada para ver bien de lejos ha de quitarse la lente. Por ello es frecuente ver a muchas personas de mediana edad que se ponen las gafas sólo cuando tienen que leer o ver bien algo muy de cerca. Naturalmente una persona miope o hipermetrope también tiene, con la edad, vista cansada. Un miope con vista cansada no ve bien los objetos lejanos por ser miope y no ve bien los cercanos por tener la vista cansada. Como para corregir ambos defectos se utilizan lentes diferentes (divergentes y convergentes respectivamente) debería usar dos modelos de gafas o unas gafas con lentes bifocales.

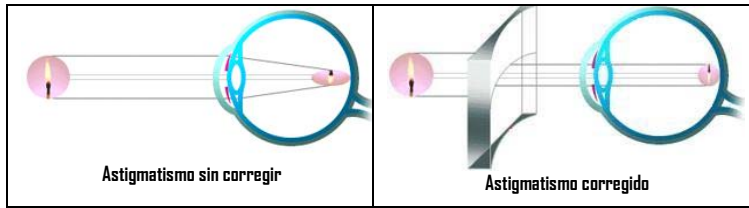
Astigmatismo

El astigmatismo es un problema en la curvatura de la córnea que impide un enfoque preciso de los objetos tanto cercanos como alejados. Se debe a que la córnea en vez de ser perfectamente esférica es tórica, lo que significa que se achata por los polos. A consecuencia de ello pueden llegar a aparecer distintos radios de curvatura en cada uno de los ejes principales y esto repercute en que se obtengan imágenes poco nítidas y distorsionadas. Obviamente ningún ojo es perfectamente esférico y, en este sentido, se puede decir que la mayoría de los ojos tienen un ligero componente astigmático, si bien en la mayoría de las ocasiones no precisa corrección.



Dependiendo de la distorsión en la curvatura y su posible combinación con otras anomalías visuales, se consideran tres tipos de astigmatismo. El astigmatismo se llama simple cuando se produce en un sólo eje, compuesto cuando (produciéndose en un sólo eje) se asocia con miopía o con hipermetropía, y mixto cuando un eje enfoca delante de la retina y otro detrás. En general el astigmatismo es de origen hereditario, pero también se

puede producir por culpa de complicaciones en intervenciones quirúrgicas, traumatismos o enfermedades.

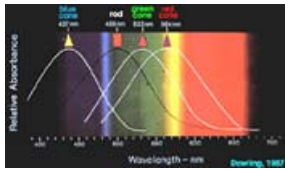


Para corregirlo se utilizan lentes tóricas, de toricidad opuesta a la de la cornea astigmática, con objeto de que sus curvas compensen las de la córnea. Esto se logra planteando espesores diferentes a lo largo de la lente. La diferencia de

espesor es mayor cuanto más fuerte es el astigmatismo.

Daltonismo

Se llama así porque Dalton (1766-1844) lo tenía y lo describió por primera vez en 1808. Es una anomalía de la visión que consiste en la imposibilidad de distinguir los colores. Es un problema genético hereditario y está ligado al sexo, debido a que se transmite por un alelo recesivo ligado al cromosoma X, lo que produce un notable predominio en varones entre la población afectada. La mujer puede portar la enfermedad en casos no tan comunes como en los varones, y la transmite a sus hijos varones.



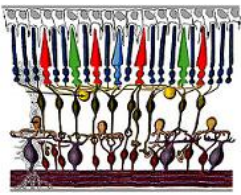
Ya hemos comentado que, de las células de la retina sensibles a la luz, los conos funcionan en ambientes iluminados y hacen posible la visión de los colores. A diferencia de los bastones, que forman un sólo tipo morfológico y funcional de foto-receptor, hay tres tipos de conos: unos que presentan una sensibilidad máxima para las longitudes de onda más largas ("**conos rojos**"), otros con mayor sensibilidad a las longitudes de onda medias ("**conos verdes**") y otros con mayor sensibilidad a las longitudes de onda más cortas ("**conos azules**"). Tal como se explica en la página que dedicamos al estudio del color, la combinación de estas tres luces básicas da lugar a la visión tricromática que poseen la mayoría de los humanos mediante la cual se abarcan todas las tonalidades del arco iris y el ojo puede distinguir hasta 20 millones de colores distintos.

Los daltónicos no distinguen bien los colores por fallo de los genes encargados de producir los pigmentos de los conos. Dependiendo del pigmento defectuoso, la persona confunde unos colores u otros. Se llama daltonismo tricromático al que padecen personas con defectos funcionales en los tres tipos de conos (el grupo más abundante y común de los daltónicos), dicromático al que padecen quienes tienen dos tipos de conos afectados y acromático al que padece un número muy reducido de personas a las que no les funciona ningún tipo de cono solo tienen visión en blanco y negro.

LA FUNCIÓN DEL CEREBRO. DE-CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE VISIÓN DE KEPLER

El modelo de Kepler es puramente físico y plantea un concepto del proceso de la visión según el cual en la retina se formaría una imagen ya acabada (como la de una fotografía impresa). Posteriormente, el cerebro se ocuparía de registrarla e interpretarla. El siguiente cálculo justifica que este concepto del proceso de la visión es erróneo y debe ser de-construido: Un potencial de acción (*PA*) representa la diferencia de potencial que se ha de superar para transmitir una señal llevando información entre unos tejidos y otros. Ahora bien, un *PA* de información visual requiere un gasto aproximado de $2.4 \cdot 10^9$ moléculas de *ATP* y este gasto equivale a $0,024g$ de glucosa. El sistema visual funciona con extraordinaria precisión, pero es muy lento y costoso energéticamente, de tal forma que, para

ver algo en 1s se necesitan del orden de 100PA. Por tanto, si la retina tuviera que enviar imágenes acabadas (para luego ser interpretadas por el cerebro) necesitaríamos un aporte energético mínimo equivalente 2.5g/s de azúcar o, lo que es igual, de 130Kg de azúcar al día! El sistema visual consume la mayor parte de la energía que requiere el cerebro (aproximadamente un 20%), pero no hasta este punto.



Así pues, la retina no es un órgano receptor de imágenes acabadas, ni tampoco éstas se transportan al cerebro. Es más correcto considerar a la retina como una porción del cerebro mismo, entendiendo que el cerebro se proyecta hacia las estructuras superficiales del organismo. Una de estas estructuras es la retina que recibe concentraciones de luz procedentes del mundo exterior y transmite a los llamados "bancos de memoria" patrones de forma, de color, de movimiento y de luminancia (densidad superficial de intensidad luminosa). Por otra parte, el cerebro, y dentro de él, la retina, no está formado cuando nace la persona, sino que evoluciona y se desarrolla principalmente durante los primeros años de vida postnatal. Por ejemplo, las uniones célula-célula y los conos van adaptando su morfología para permitir el movimiento de las células ganglionares (células de la retina especializadas en la detección de contrastes y cambios rápidos de la imagen visual) en un proceso que continúa hasta aproximadamente los 4 años. Esto implica que los seres humanos aprendemos poco a poco a ver, a medida que el cerebro se va conformando. Como se sabe, los bebés apenas distinguen sombras y aprenden poco a poco a ver, como aprenden a escuchar, a hablar,...

Cuando el cerebro puede establecer suficientes asociaciones entre los estímulos que recibe y los patrones (de forma, de color, de movimiento y de luminancia) que se han ido almacenando en los bancos de memoria, tenemos la sensación de ver. En ese estadio adulto del cerebro, la maquinaria visual es extremadamente precisa, pero sigue siendo muy lenta, dado que necesita del orden de 200-800ms para procesar la visión. Esto significa que en la visión realizada por una persona adulta, el estímulo recibido hace que el cerebro emita una hipótesis sobre lo que se está viendo.



Si las expectativas acerca de lo que se está viendo no coinciden con los estímulos recibidos se generan situaciones de dificultad visual, como, por ejemplo, sucede cuando una persona se acuesta a dormir en un determinado lugar y es transportada sin su conocimiento a otro diferente. Al despertar no puede ver nada durante un tiempo (no reconoce lo que ve) y se genera una situación de gran desconcierto, hasta que un poco después consigue ver lo que le rodea.

Para terminar diremos que los estímulos visuales que aportan al cerebro la mayor parte de la información exterior que percibimos. El 38% de todas las fibras que conducen los impulsos que informan de las distintas sensaciones (se llaman fibras aferentes) pertenecen al sistema visual.

A los experimentos, materiales y referencias citadas en este documento se accede desde la página dedicada al estudio de la Luz y la visión (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Visión/luz-vision.htm>) dentro de la web del Departamento de Física y Química del IES "Leonardo Da Vinci" de Alicante (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/fisica.htm>)