

Material Didáctico



Óptica para maestros.

Una aproximación del
modelo de rayos para el aula de
educación infantil y primaria

Óptica para maestros



Comunidad de Madrid

CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN
Dirección General de Mejora
de la Calidad de la Enseñanza



Comunidad de Madrid

CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN
Dirección General de Mejora
de la Calidad de la Enseñanza



Óptica para maestros.
Una aproximación del
modelo de rayos para el aula de
educación infantil y primaria



Comunidad de Madrid

CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN

Dirección General de Mejora
de la Calidad de la Enseñanza

Autores:**Programa Nacional El CSIC en la Escuela:**

María del Carmen Refolio Refolio.
 María José Gómez Díaz.
 Esteban Moreno Gómez.
 Salomé Cejudo Rodríguez.
 José Manuel López Álvarez.
 José María López Sancho.

Dirección:

José María López Sancho.

Coordinación:

María José Gómez Díaz.

Ilustraciones:

Alejandro Martínez de Andrés.

Imprime:

BOCM

Los autores agradecen la colaboración de Alfredo Martínez Sanz en la elaboración del manuscrito.

Colección:

Material Didáctico.

Esta versión digital de la obra impresa forma parte de la Biblioteca Virtual de la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid y las condiciones de su distribución y difusión de encuentran amparadas por el marco legal de la misma.

www.madrid.org/edupubli

edupubli@madrid.org



Biblioteca Virtual

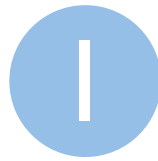
CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN
Comunidad de Madrid

© Comunidad de Madrid. Consejería de Educación. Dirección General de Mejora de la Calidad de la Enseñanza.

Depósito Legal: M-50300-2009

I.S.B.N.: 84 - 451 - 3251 - 2

Tirada: 2.000 ejemplares



ÍNDICE

Presentación	007
Introducción	011
CAPÍTULO 1. LUCES Y SOMBRAS EN LA VIDA COTIDIANA	017
1.1. Consideraciones generales sobre la visión.	019
1.2. Los tres actores del proceso de la visión.	019
1.3. La maravilla de las sombras y la destrucción del preconcepto de Platón.	020
1.4. El modelo de rayos.	021
1.5. Una cuestión sobre la que meditar: ¿qué es una línea recta?	024
1.6. La propagación rectilínea de la luz.	026
1.7. El efecto de una fuente extensa a una distancia finita.	026
CAPÍTULO 2. LUCES Y SOMBRAS EN LA ASTRONOMÍA COTIDIANA	029
2.1. Experimento sobre el sistema Tierra-Sol.	031
2.2. El sistema Tierra-Sol.	033
2.3. Otro efecto de luces y sombras: las fases de la Luna.	039
2.4. El sistema Tierra-Luna-Sol: los eclipses de la Luna y del Sol.	042
CAPÍTULO 3. FORMACIÓN DE IMÁGENES CON EL MODELO DE RAYOS	047
3.1. La cámara oscura.	049
3.2. Un experimento interesante: la medida del diámetro del Sol.	052
3.3. ¿Qué ocurre cuando un rayo encuentra un espejo?	053
Las leyes de la reflexión.	



3.4. ¿Qué ocurre cuando la luz cambia de medio?	056
Las leyes de la refracción.	
3.5. Ángulo crítico.	060
3.6. Imágenes en las lentes convergentes.	061
3.7. Imágenes en las lentes divergentes.	068
3.8. La cámara oscura mejorada: la cámara fotográfica.	071
3.9. Modelo de ojo humano.	072
3.10. Defectos ópticos del ojo.	073
3.11. La retina.	075
CAPÍTULO 4. EL ENIGMA DE LOS COLORES	077
4.1. La óptica en la época de Isaac Newton, Thomas Young y James Clerk Maxwell.	079
4.2. El <i>experimentum crucis</i> de Newton.	079
4.3. El experimento del prisma.	081
4.4. La composición aditiva de los colores.	084
4.5. El modelo de Young.	086
4.6. El experimento de Maxwell.	087
4.7. Fisiología de la visión.	088

CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN DE LA PROFUNDIDAD: LA PERSPECTIVA LINEAL	091
5.1. Codificación de la distancia.	093
5.2. Un ejercicio de competencias pedagógicas: cómo engañar al ojo.	094
5.3. La perspectiva en la pintura.	097
5.4. Antecedentes históricos.	098
5.5. La pintura renacentista.	099
5.6. El ocaso de la física y de la perspectiva clásica.	102
CAPÍTULO 6. ILUSIONES ÓPTICAS: LA SENSACIÓN DE MOVIMIENTO Y EL CINE	103
6.1. La sensación de movimiento.	105
6.2. Los juguetes ópticos.	105
6.3. Historia del cine.	108
EPÍLOGO. LA ÓPTICA EN EL SIGLO VEINTE Y LA NATURALEZA DE LA LUZ	111
7.1. Antecedentes históricos.	113
7.2. La dualidad partícula-onda y el fotón de Feynman.	113





PRESENTACIÓN



La Consejería de Educación y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas firmaron, durante el curso 2004-2005, un acuerdo de colaboración para favorecer la enseñanza de la Ciencia en las edades tempranas de Educación Infantil y Primaria.

Como resultado de esta colaboración, se ha trabajado en la formación de maestros y en la elaboración de proyectos de fácil aplicación en el aula, con lo que se ha ido asentando una base metodológica científica que permite elaboraciones más complejas en los siguientes niveles educativos.

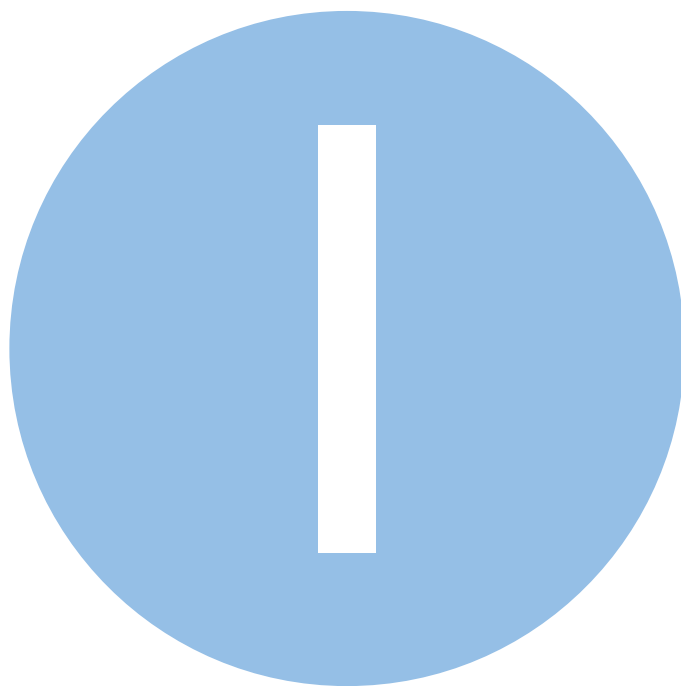
Con este propósito de acercar la ciencia a los alumnos más pequeños se han publicado ya dos libros, ***Descubriendo las moléculas: un proyecto para el aula*** y ***Magnetismo en el aula*** con el propósito de que sirvieran de complemento a la formación teórica y la aplicación práctica, dentro de un espacio común entre investigadores y docentes. El trabajo que ahora se edita, ***Óptica para maestros: una aproximación del modelo de rayos para el aula de Educación Infantil y Primaria***, bajo la dirección de científicos del CSIC, es el tercer libro de esta serie que ha tenido una gran acogida en los centros educativos madrileños.

En este libro se proporcionan bases teóricas y recursos didácticos para facilitar la enseñanza de la Óptica en las aulas. El punto de partida es empírico: cualquier proceso de enseñanza de la Ciencia debe basarse en la curiosidad de los alumnos, en las preguntas que se hace cualquier niño. En el caso particular de la Óptica, por ejemplo, los autores aprovechan el interés que despierta en los alumnos fenómenos tan cotidianos como la proyección de una sombra, la luz que aparece en el ámbito doméstico o la luz de los cuerpos celestes. Para responder a esa curiosidad, se realiza un recorrido histórico por los distintos modelos explicativos. Se parte del modelo de rayos, se analizan las leyes de la Óptica y se recogen, por último, los debates que ha suscitado la naturaleza de la luz, para concluir con una reflexión sobre la misma.

La Consejería de Educación confía en que ***Óptica para maestros*** tenga la misma utilidad didáctica que han tenido las anteriores publicaciones de este ciclo, encaminado a acercar los fundamentos y la metodología científicos al aula.

Xavier Gisbert da Cruz
Director General de Mejora de la Calidad de la Enseñanza





INTRODUCCIÓN



El libro que tienes en las manos es el tercero que se publica como resultado de la colaboración entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid, acuerdo que comenzó en el año 2004. Como en las anteriores obras, el objetivo común es el de proporcionar al profesor de Educación Infantil y Primaria los elementos indispensables de conocimientos y procedimientos para introducir el estudio de la luz en sus aulas. Como es evidente, el conocimiento de los maestros no debe limitarse estrictamente a lo que deben enseñar a sus alumnos, sino que deben comprender los fenómenos con más profundidad que ellos y tienen que estar preparados para las posibles preguntas, en general muy inteligentes, de los niños. Hemos introducido, además, algunas anécdotas históricas que fijan los momentos en los que tuvieron lugar algunos descubrimientos importantes, y que sirven tanto para precisar la época en la que ocurrieron como para hacer más amena la obra.

Todo el mundo sabe que la óptica es la ciencia que trata de dar respuesta a preguntas que se hicieron los seres humanos sobre el fenómeno de la visión, desde el origen de la humanidad. La periodicidad de los días y las noches, definidas por la sucesión de luz y oscuridad, y la presencia del Sol o la Luna en el firmamento para que fuera posible percibir el mundo, debió de sembrar de preguntas y respuestas la mente de nuestros antecesores.

La luz era algo que procedía de fuera de la Tierra, hasta que se desarrolló la técnica de producir y mantener el fuego. Sin duda dio mucho que pensar el hecho de que cuando, en la oscuridad de una cueva, se encendía una hoguera, como por arte de magia se podían percibir las imágenes de los objetos y de las personas. Esto provocó un sinnúmero de interrogantes, los mismos sin duda que aparecen en la mente de los niños cuando se enciende una luz porque, como dijo

Aristóteles en su *Metafísica*, el conocimiento es un deseo natural en todos los hombres.

¿Qué es la luz? ¿Qué relación existe entre el calor de la vela y la luz que produce? ¿Cuál es la naturaleza de las imágenes que se forman en nuestro cerebro y qué es lo que ocurre en el interior del ojo para que podamos percibir formas y colores? ¿Existe solamente una clase de luz o son diferentes fenómenos los que provienen del Sol, de la bombilla, de las luciérnagas o de la llama de una vela?

Entre las infinitas preguntas que la humanidad se ha hecho, debemos señalar una como la más importante ¿Qué tipo de respuesta podemos dar a estas cuestiones? Leucipo fue el primero, que nosotros sepamos, en referirse a ello en una de las pocas frases que de él nos ha llegado: nada ocurre al azar, sino que se debe a una causa a la que necesariamente obedece. En esta cita Leucipo establece su creencia en que existen unas leyes de la naturaleza fijas que necesariamente se cumplen. Como el lector sabe, esto es un postulado, una hipótesis de trabajo que estamos dispuestos a admitir si sus consecuencias se cumplen. Con ello se hace posible la existencia de la ciencia, cuyo objetivo es conocer estas leyes.

Podemos así establecer el objeto de este libro. A partir de la hipótesis de Leucipo, trataremos de descubrir las leyes que rigen el comportamiento de la luz al interactuar con los demás objetos. Pero aquí surge una cuestión fundamental: la luz, la sombra y los colores, ¿son cosas o son propiedades de los objetos? ¿Es materia o es forma, en el lenguaje de Aristóteles? Ésta es una cuestión filosófica fundamental que podemos exponer siguiendo a Lewis Carroll, seudónimo del profesor de lógica matemática Charles Lutwidge Dodgson. En su obra *Alicia en el país de las maravillas*, publicada en 1865, analiza la naturaleza de la sonrisa del gato de Cheshire, una propiedad del gato a la que concede



existencia propia cuando hace que desaparezca el resto del gato y que permanezca la sonrisa. Es una disquisición sutil pero muy sugerente: ¿puede existir la sonrisa del gato por sí sola o necesita necesariamente al gato?



Parece que fue Galileo el primero que planteó esta cuestión. León Lederman, en su libro *The God Particle*, refiere la forma en que Galileo demostró a los aristotélicos la existencia de la luz como materia mediante la famosa piedra de Bolonia.



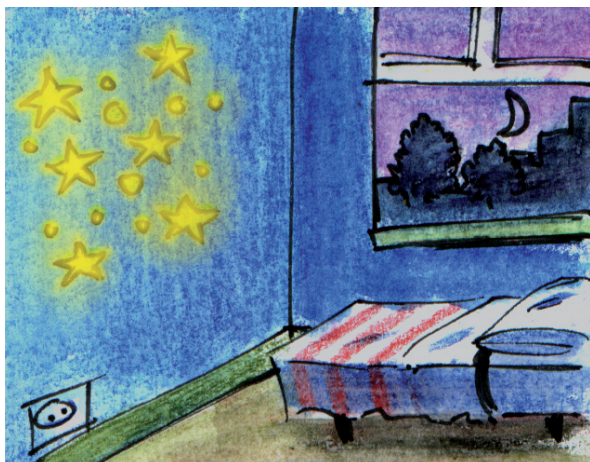
Según cuentan, esta piedra había sido descubierta hacia 1603 por Vincenzo Casciarolo y tenía la propiedad de guardar en su interior la luz que recibía del Sol, que fluía en la oscuridad hasta que se agotaba su reserva, lo que era una demostración concluyente de que la luz tenía una existencia propia e independiente, como la del agua, que podía pasar de un recipiente a otro sin perder su identidad.

APLICACIÓN EN EL AULA



Nosotros podemos repetir en el aula este histórico experimento con pintura fosforescente u otros objetos que tengan esta característica.

Todos ellos tienen la misma propiedad de la piedra de Bolonia: capturan la luz del Sol (o de cualquier otra fuente) y la mantienen en su interior hasta que se agota. Además, se pueden recargar tantas veces como deseemos.



Así, aceptada la existencia de leyes de la naturaleza y demostrada la realidad de la luz como sustancia, podemos comenzar nuestra labor de descubrir estas leyes por medio de experimentos y razonamientos.



Capítulo

1

LUCES Y SOMBRAS EN
LA VIDA COTIDIANA



1.1. Consideraciones generales sobre la visión

Vemos el mundo a través de nuestros ojos de la misma manera que percibimos el sonido con ayuda de nuestros oídos. Y estos dos sentidos siempre han jugado un papel importantísimo en nuestra relación con los demás y con el medio en el que vivimos, por lo que es interesante compararlos.

Podemos observar que dejamos de ver cuando cerramos los ojos (aunque los párpados no son completamente opacos), de la misma manera que dejamos de oír cuando nos tapamos los oídos. Es curioso que el oído no disponga de un sistema semejante al de los párpados que nos permita cerrar las orejas, lo que facilitaría enormemente la concentración. Puede que se deba a que tanto el cerrar los ojos como los oídos en un medio hostil nos deja en situación de indefensión, lo que hubiera puesto en peligro la supervivencia de la especie humana probabilidades de sobrevivir. Además, como veremos más adelante, el sentido de la vista requiere más actividad cerebral que el del oído, por lo cual se debe suspender durante el sueño.

1.2. Los tres actores del proceso de la visión

Los seres humanos pronto descubrieron que la visión era un proceso en el que intervenía el ojo. Obviamente también intervenía la escena que se veía, pero hacía falta un tercer actor, sin el cual el ojo no percibía la escena. A ese tercer actor le llamaremos fuente de luz o fuente luminosa. Podía ser el Sol, la Luna, una llama o incluso una luciérnaga, pero era imprescindible su presencia para que el ojo pudiese recibir información del mundo exterior y transmitir al cerebro la escena observada.

La siguiente cuestión se refiere a las formas de producción de luz. El proceso por el que un cuerpo, caliente o frío, emite luz ha sido objeto de difíciles investigaciones; en principio podemos distinguir dos fenómenos distintos. La emisión de luz por cuerpos muy calientes se llama *incandescencia* y tiene lugar en las velas, en las llamas, en general los cuerpos muy calientes (hierro al rojo) o en las bombillas que tienen un filamento. Pero también pueden emitir luz los cuerpos fríos, mediante un proceso llamado *luminiscencia*. Los tubos fluorescentes, las pantallas de los monitores de ordenador o de las televisiones, los números fosforescentes de algunos relojes, las luciérnagas y un largo etcétera son ejemplos de luminiscencia.

Pero por obvia que parezca la necesidad de los tres actores (ojo, escena e iluminación) para el proceso de visión, casi el cincuenta por ciento de los alumnos llegan a Secundaria con la creencia de lo que podríamos llamar el modelo de emisión ocular. Consiste en suponer que el ojo emite unos rayos que al reflejarse en los objetos y volver al ojo son los responsables de la visión. Este preconceito, admitido incluso por Platón, se basa en el hecho de que los ojos de algunos animales se ven en la oscuridad, en la fuerza que algunas personas parecen tener en la mirada y en la idea igualmente falsa que tienen muchos niños que piensan que si miramos fijamente a una persona, ésta lo nota aunque no nos vea. Este preconceito platónico es igualmente admitido por muchos autores de comics de superhéroes, cuyos personajes emiten rayos X con los ojos que les permiten ver a través de objetos opacos. Más adelante nos ocuparemos de desmontar este concepto.

Nuestra tarea, a lo largo de esta obra, será la de investigar los tres elementos que intervienen en el proceso de la visión, de manera que construyamos un modelo coherente del proceso.



1.3. La maravilla de las sombras y la destrucción del preconcepto de Platón

Uno de los efectos más interesantes que se producen cuando se ilumina un objeto es la aparición de una sombra. Si miras la ilustración adjunta, te darás cuenta de lo acostumbrados que estamos a que los objetos iluminados por fuentes puntuales produzcan sombras.



En este apartado, vamos a estudiar las características de la aparición de sombras y las muchas posibilidades de sus aplicaciones, una vez entendida la forma en que se producen.

La primera parte de nuestra investigación se basa en la pura observación de lo que ocurre cuando el Sol ilumina los objetos. Personas, árboles, casas, etc., todo produce sombras de formas y tamaños determinados, que cambian con la hora en la que realicemos la observación. Alargadas por la mañana y al atardecer y muy cortas al mediodía.

Para estudiar el fenómeno de la aparición de sombras seguiremos el procedimiento general de la ciencia: la simulación en nuestro laboratorio o en nuestra aula, con objetos y fuentes luminosas cuya forma y posición podamos variar a voluntad, es decir, a través de experimentos.

APLICACIÓN EN EL AULA



En primer lugar, podemos utilizar un objeto cualquiera, un monigote de cartón, por ejemplo, para estudiar lo que ocurre cuando lo situamos frente a una pared iluminada por el Sol.

Inicialmente, antes de colocar nuestro monigote, la luz emitida por el Sol, tras viajar por el espacio, llega a la pared del colegio y la ilumina, se refleja en ella y una parte entra en nuestros ojos; se produce así en nuestro cerebro la imagen de la pared iluminada.

Cuando situamos nuestro monigote entre el Sol y la pared, parte de la luz del Sol incide sobre el monigote y lo ilumina; la luz que incide en él se refleja y es captada en parte por nuestros ojos; se forma así la imagen del muñeco en nuestro cerebro.

Si estudiamos la situación atentamente, veremos que la parte de luz solar interceptada por el monigote no ha podido llegar a la pared y provoca en ella una parte oscura, una sombra, igual a la forma del muñeco.

Además, la forma de la sombra es independiente de la situación del observador, es decir, de nuestros ojos, y depende solamente de la posición del muñeco de cartulina respecto al Sol. Es fácil comprobar que la forma de la sombra depende exclusivamente de la manera en la que el monigote interfiere la luz solar. Dicha forma varía desde una copia exacta del monigote hasta con-

vertirse en una línea del grosor del cartón, cuando está de perfil. Este hecho, convenientemente estudiado y comprobado por los alumnos bajo la dirección del profesor, debe servir para destruir el preconceito de Platón al que hemos aludido.

Podemos humanizar más el muñeco si hacemos dos perforaciones en el lugar de los ojos, en este caso observamos que la luz pasa por las dos perforaciones y rompe la sombra con dos zonas iluminadas en la pared.



Es conveniente repetir este experimento con diferentes objetos. El más inmediato de todos es emplear las manos, con las que se pueden proyectar figuras chinescas muy divertidas. Éste es un buen momento para introducir el concepto de *perfil*, del modo que el profesor considere más oportuno. Se explica que las figuras de las sombras son siempre perfiles de los objetos iluminados de determinada forma, es decir, la proyección de un objeto de tres dimensiones sobre las dos dimensiones de un plano.

Se pueden estudiar los perfiles de distintos objetos y ver la relación entre la forma original y la de las sombras o proyecciones sobre la pared, producidas por el Sol. Así, podemos ver que la sombra de un círculo recortado en

cartulina fina (que podemos considerar como de dos dimensiones) puede producir sombras que van desde un círculo igual al original hasta una línea recta (independientemente del grosor de la cartulina), pasando por diferentes elipses. No ocurre así en el caso de la sombra de una esfera (o de cualquier pelota esférica), cuyo estudio es de gran importancia por sus aplicaciones a la astronomía; la sombra de una esfera es siempre un círculo. Este hecho les sirvió a los astrónomos griegos, como veremos más adelante, para medir las dimensiones más relevantes del sistema solar.

Es interesante dedicar algún tiempo a tratar de entender el hecho de que objetos diferentes de tres dimensiones presenten, en determinadas posiciones, perfiles idénticos. Es muy fácil construir en cartulina perfiles de diversos objetos (una botella, un embudo, una taza con asa, etc.), de tal manera que, si está bien realizado, sea imposible distinguir entre la sombra del objeto real o de la proyectada por la cartulina, con la forma de su perfil. Ésta es la base del juego de las figuras chinescas, en las que se ponen las manos de manera que su sombra sea semejante a los perfiles de animales o personas.

1. 4. El modelo de rayos

Ante estos resultados, los alumnos deben plantearse las razones por las que las proyecciones producidas por la luz del Sol conservan las formas del monigote, de las manos o de los diferentes objetos que se iluminan. Tras un poco de meditación se llega a la conclusión de que sólo puede deberse a que la luz está formada por *rayos* que son emitidos por la fuente luminosa y se propagan por el espacio a través de líneas rectas. Para comprobarlo podemos fotografiar una escena apropiada o construir una especie de diorama con figuras de plástico e iluminarlo con la luz solar.





Tanto en la fotografía como en el diorama se puede comprobar, con ayuda de una regla, que el primer rayo de luz que limita la zona de sombra de la zona iluminada sigue una línea recta. Este ejercicio se debe realizar tantas veces como sea necesario, hasta que los alumnos se convenzan de que el camino de los rayos de luz sigue el perfil de las reglas, es decir, líneas rectas. Es fundamental dibujar, en todos los casos, un diagrama de rayos que explique lo que vemos.

APLICACIÓN EN EL AULA



Experimento para hacer visibles los rayos luminosos

En primer lugar veremos el comportamiento de la luz al atravesar un vaso con agua pura, un vaso con agua salada (*disolución*) y un vaso de agua con una gota de leche (*coloide*).

- Experimento nº 1º:
Un vaso con una gota de leche (coloide), y otro de agua pura.



- Experimento nº 2:
El vaso de la izquierda tiene una disolución de sal en agua, mientras que el de la derecha contiene, un coloide (leche en agua) y, entre los dos vasos, se están arrojando polvos de talco desde arriba. Al iluminar con un haz de rayos láser, se aprecia el rayo de luz en el coloide y en los polvos de talco pero no en la disolución de sal en agua.



En ambas figuras puede verse claramente el efecto Tyndall, que describimos a continuación para información del profesor, ya que podemos utilizar este efecto para materializar rayos de luz.

Coloides y disoluciones

El fenómeno por el que se hacen visibles los rayos de luz en los coloides, como hemos visto en el ejercicio anterior, se llama *efecto Tyndall* en honor al físico irlandés John Tyndall (1820-1893), conocido por su estudio sobre los coloides.

Pero, ¿qué es un coloide? Un *coloide* o *dispersión coloidal* es un sistema físico que está compuesto por dos componentes (fases): un medio continuo, normalmente fluido, y otro disperso en forma de partículas, por lo general sólidas (que reciben el nombre de *micelas*). Estas partículas, no apreciables a simple vista, son, sin embargo, mucho más grandes que cualquier molécula.

¿Qué diferencia hay entre un coloide y una disolución? Una disolución es una suspensión de moléculas en un medio continuo. Parece la misma definición que la de un coloide, pero en realidad se trata de cosas muy distintas: la diferencia estriba en el tamaño de las partículas suspendidas. Las disoluciones están formadas por moléculas, cuyo tamaño es de diezmillonésimas de milímetro, mientras que en los coloides las partículas son cientos o miles de veces mayores.

Esta diferencia de tamaño explica por qué vemos los rayos en los coloides, pero no en las disoluciones o en el agua pura. Los rayos de luz se reflejan en las micelas del coloide, pero no en las moléculas de la disolución, demasiado pequeñas para que la luz visible reaccione ante su presencia. Aunque este diferente comportamiento se utiliza para distinguir los coloides de las disoluciones, no tiene una explicación clara dentro del modelo de rayos. Esta explicación requiere un conocimiento más profundo de la naturaleza de la luz, por lo que trataremos este tema en el último capítulo.

Las partículas de los coloides pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas y el medio donde están suspendidas también puede estar en cualquiera de las tres fases.

Todos estamos rodeados de coloides en diferentes estados, en nuestra vida cotidiana. Veamos algunos ejemplos. El efecto Tyndall puede apreciarse en los sistemas en que el medio continuo está en fase líquida o gaseosa. Pasamos a describir los diferentes tipos:

- Líquido en gas: *aerosol* (gotitas de agua en el aire forman la niebla o la bruma).
- Sólido en gas: *aerosol sólido* (humo o polvo en suspensión).
- Gas en líquido (espuma).
- Líquido en líquido: *emulsión* (leche, salsa mayonesa, sangre).
- Gas en sólido: *espuma sólida* (piedra pómez, aerogeles).
- Líquido en sólido: *gel* (gelatina, queso).
- Sólido en sólido: *emulsión sólida* (el oro coloidal en vidrio también conocido como cristal de rubí).



- ¿Por qué vemos algunas veces los rayos del Sol en el cielo, como puede apreciarse en la fotografía?

Es fácil explicar este fenómeno. El Sol ilumina las partículas de niebla (*aerosol*) y se hacen visibles sus rayos. De la misma manera, cuando la luz del Sol pasa por las rendijas de una persiana, ilumina el polvo o el humo suspendido en la habitación (*aerosol sólido*), se refleja en las partículas y se hacen también visibles sus rayos.



1.5. Una cuestión sobre la que meditar: ¿qué es una línea recta?

Estos experimentos nos conducen a una cuestión mucho más profunda: ¿cómo se define una línea recta? Es una pregunta digna de plantearse a nuestros alumnos para conocer sus respuestas.

Uno de los sabios que se ocupó de este problema y cuyos escritos han llegado a nosotros, es Euclides del que, dicho sea de paso, sabemos muy poco. Vivió en Alejandría, entre el 325 y el 275 a. C., y resumió los conocimientos de geometría de su época en un libro que tituló *Los Elementos*, cuyos teoremas se estudian todavía en todas las escuelas.

Antes de seguir con nuestro razonamiento, podemos repasar algunas definiciones que se encuentran en la geometría de Euclides; a la vez podemos sustituir los enunciados de Euclides por los nuestros, lo que nos servirá para darnos cuenta de lo difícil que es elaborar una definición.

En *Los Elementos*, Euclides nos presenta las siguientes definiciones:

Definición 1. Un *punto* es lo que no tiene partes.

Definición 2. Una *línea* es una longitud sin anchura.

Definición 3. Los extremos de una línea son *puntos*.

Definición 4. Una *línea recta* es aquella que yace por igual respecto de los puntos que están en ella.

Como vemos, la definición cuarta no es un ejemplo de claridad, por lo que siempre se intentó sustituirla por otra más precisa. Merece la pena que nos detengamos en este punto y meditemos un poco, con nuestros alumnos, sobre la naturaleza de la línea recta.

APLICACIÓN EN EL AULA



Todos estamos acostumbrados a trazar las líneas rectas con ayuda de una regla. Pero, ¿cómo se construyen las reglas? Para contestar a esta pregunta podemos imaginarnos la forma en la que un carpintero del tiempo de Euclides (o de la actualidad) comprobaría que una regla es efectivamente recta. La tomaría en su mano y la dirigiría hacia cualquier punto iluminado, mirando desde uno a otro de sus extremos para ver si el camino de la luz sigue exactamente el perfil de su regla. Es decir, comprobaría que sigue el camino de la luz. Nosotros podemos hacer lo mismo con reglas, mesas, cuadernos o libros que estén a nuestro alcance, y comprobar si sus aristas forman una línea recta.



Un experimento igualmente significativo para nuestro propósito consiste en utilizar una pajita de refresco y por su interior mirar cualquier superficie iluminada.

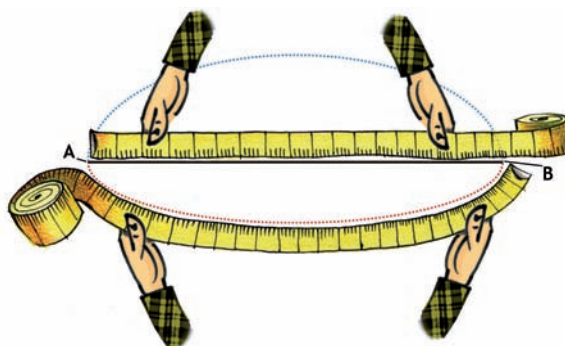
Podemos comprobar fácilmente que, cuando se curva la pajita, la luz que viaja por su interior no alcanza nuestro ojo, llegándose a la misma conclusión que en el caso del carpintero y la regla.



Así pues podemos definir la línea recta como *el camino que sigue la luz cuando va de un punto a otro*, lo cual nos deja un poco en la situación del perro que se muerde la cola. La luz se propaga en línea recta porque una línea es recta cuando sigue el camino de los rayos de luz.

Afortunadamente, algunos años después Arquímedes viene en nuestra ayuda. Arquímedes fue un sabio griego que vivió en Siracusa, una ciudad de Sicilia, entre los años 285 y 212 a.C., conocido por sus estudios sobre la flotación. Aquejado por las mismas dudas que nosotros decidió sustituir la definición cuarta de Euclides por otra de índole operacional, diciendo que *la línea recta es la más corta de todas las líneas que tienen los mismos extremos*. Decimos que es operacional porque requiere realizar algunas manipulaciones con los elementos que intervienen, como medir longitudes.

La definición de Arquímedes tiene el inconveniente de introducir dos conceptos nuevos, el de *longitud* y el de *medida*, por fortuna fácilmente asimilables por nuestros alumnos; pero tiene a su favor el ser más clara que la de Euclides y poder ser comprobada fácilmente empleando una cinta métrica de sastre y unas cuantas líneas dibujadas en un papel grande.



Así quedaron las cosas hasta el siglo XVII, en el que Fermat, un matemático francés que vivió de 1601 a 1665, enunció el principio que lleva su nombre. Este principio, aplicado al caso que nos ocupa, dice: *un rayo de luz, cuando se propaga entre dos puntos dados, sigue un camino tal que el tiempo que tarda en recorrerlo es mínimo*. Se trata de un principio, ya que no lo demuestra ni lo basa en ningún resultado experimental.

Los *principios* o *postulados* son afirmaciones que se hacen, cuya única justificación se encuentra en la validez de las deducciones a las que se llega aplicando la lógica, a partir de ese postulado. En el caso de la propagación en un único medio, el principio de Fermat es equivalente al de Arquímedes, pero introduce la idea de que la luz se propaga con una cierta velocidad, muy grande pero finita; esta idea es muy importante para que los alumnos refinen su modelo de rayos.

De estas consideraciones debe quedar claro que *la recta es el camino de la luz y que la luz sigue en su recorrido entre dos puntos el camino más corto* (cuando no cambia de medio de propagación). Esto es suficiente para los niveles educativos a los que está destinado el libro.



1.6. La propagación rectilínea de la luz

En la serie de experimentos que hemos realizado empleando la luz del Sol, hemos observado que las sombras son proyecciones de un determinado perfil de los objetos iluminados que, en algunos casos, conservan el tamaño.

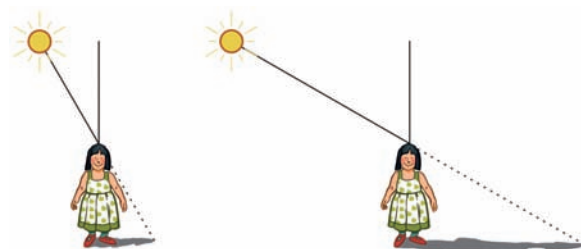
APLICACIÓN EN EL AULA



Es muy fácil comprobar este hecho; para ello basta con fabricar dos monigotes iguales empleando dos cartulinas superpuestas, cortándolas a la vez e iluminándolas con la luz del Sol. Cuando proyectamos la sombra de una cartulina sobre la pared, podemos utilizar la otra cartulina para comprobar que la sombra es exactamente igual. Esto se debe a que la fuente de luz se encuentra muy lejos del objeto que proyecta la sombra y de la pantalla sobre la que se observa, por lo cual los rayos de luz se pueden considerar *paralelos*.



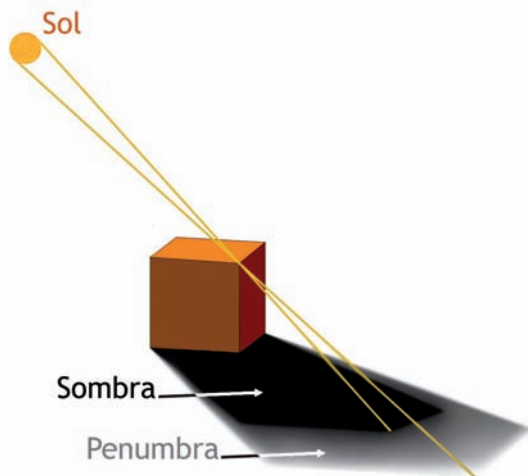
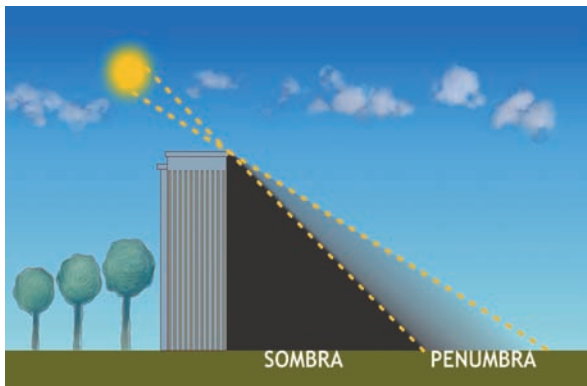
Con este modelo se puede explicar a los alumnos la razón por la que cambian los tamaños de las sombras de acuerdo con la inclinación de la luz que ilumina al objeto, como se observa en la figura.



1.7. El efecto de una fuente extensa a una distancia finita

Como el lector sabe, la distancia de la Tierra al Sol es del orden de los 150.000.000 kilómetros y su diámetro de unos 1.490.000 kilómetros, aproximadamente un uno por ciento de la distancia. Esta relación es suficiente para que el Sol no pueda considerarse estrictamente una fuente luminosa puntual. Si se considera apropiado, se puede explicar a los alumnos el efecto del tamaño del Sol en la aparición de una zona de penumbra entre las zonas de luz y sombra. Esta zona es debida a que, al no ser el Sol un foco puntual, los rayos pro-

venientes de diferentes partes del mismo actúan independientemente y producen el efecto que se ve en las figuras. Evidentemente, si el Sol fuese mucho más pequeño o se encontrase mucho más alejado, los efectos de penumbra serían menores, ya que se aproximaría más al modelo de fuente puntual.

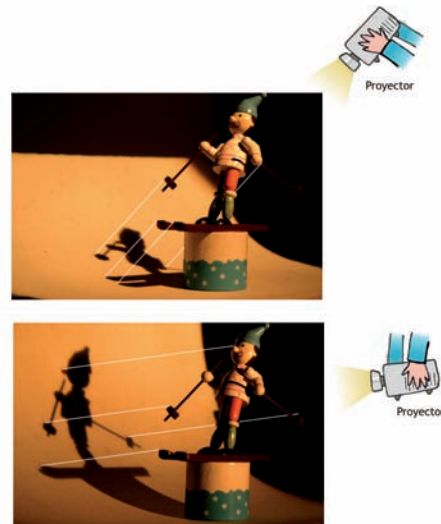


APLICACIÓN EN EL AULA



Para estudiar con algún detalle el efecto de la proximidad de la fuente luminosa a los objetos en la producción de luces y sombras, debemos repetir los experimentos en el interior del aula, con las luces apagadas y empleando una fuente de luz poco extensa (un proyector o una bombilla de linterna, sin utilizar el espejo parabólico). De esta manera veremos que las sombras que proyectan los objetos no conservan el tamaño de los mismos, sino que lo aumentan. Además, el tamaño de las sombras depende de la distancia del objeto a la fuente y de la distancia del objeto a la pantalla.

Es muy fácil idear ejercicios para que los alumnos tracen el camino de los rayos en diferentes situaciones, de manera que comprueben que el modelo de rayos explica la formación de sombras.



Capítulo

2

LUCES Y SOMBRAS EN
LA ASTRONOMÍA
COTIDIANA



2.1. Experimento sobre el sistema Tierra-Sol

Hemos visto en experimentos anteriores que cuando una esfera es iluminada por los rayos del Sol, los rayos de luz inciden sobre la mitad de la esfera y permanece la otra mitad en sombra. El hecho de que podamos ver la semiesfera en sombra se debe a que, aunque no recibe luz del Sol directamente, recibe la que se ha reflejado en otros objetos, como en la pared o en nosotros mismos. A continuación, veremos la trascendencia que tienen los pequeños experimentos que hemos realizado cuando trasladamos las conclusiones al sistema solar, cuyos cuerpos tienen ante la luz el mismo comportamiento.

Para ello el profesor deberá elaborar la secuencia de construcción de conocimientos que le parezca más apropiada para cada caso particular. Nosotros proponemos la siguiente:

1. La Tierra es nuestro planeta, el lugar en el que vivimos. En nuestro modelo simplificado la consideraremos esférica.
2. Tiene un movimiento de giro en torno a su eje que es el responsable de la sucesión de los días y de las noches. Este hecho puede utilizarse en la construcción de un reloj de Sol.
3. La Tierra gira en torno al Sol en una órbita casi circular durante el periodo de un año.
4. La duración de los días y de las noches está regulada por la inclinación del eje de giro de la Tierra respecto al plano en el que gira en torno al Sol. Esto da lugar a las estaciones.
5. La Luna gira en torno a la Tierra de manera que siempre nos muestra la misma cara.

Antecedentes históricos

Es difícil llegar a la conclusión de que la tierra es esférica sin encontrarse en un medio rural, en el que pueda contemplarse el cielo fácilmente y en el que se esté habituado a observar las fases de la Luna e incluso los eclipses. Históricamente el primer modelo práctico fue realizado por Ptolomeo, siguiendo los pasos de Apolonio e Hiparco. En él, la Tierra estaba fija en el centro del universo, el Sol giraba en torno a ella siguiendo una trayectoria que recorría en un año y la Luna daba vueltas en torno a nuestro planeta. La trayectoria del Sol se producía en un plano inclinado respecto al plano ecuatorial de la Tierra. Romper el preconcepto de la Tierra fija fue un proceso largo y difícil, debido fundamentalmente a que era el admitido por Aristóteles y a que es el que se desprende de un estudio superficial de las observaciones.

El proceso a que nos referimos se realizó por tres caminos diferentes: el primero, puramente matemático, fue seguido por el astrónomo Copérnico y se basaba en una mayor sencillez en la descripción de los movimientos de los planetas, si se situaba el Sol en el centro del universo. El segundo se fundamentó en la observación del sistema solar, principalmente a partir de la aplicación del telescopio a la astronomía. Así, Galileo observó las fases de Venus, incompatibles con el modelo de Ptolomeo, y la existencia de los satélites de Júpiter, que rompían el preconcepto de la inmovilidad del universo más allá de la esfera de la Luna. Finalmente, el tercer camino estaba basado en la modificación de las leyes de la mecánica, y dirigido contra el preconcepto aristotélico de la fuerza como causa del movimiento. De acuerdo con este preconcepto los cuerpos se mueven con una velocidad proporcional a la fuerza que se aplica sobre ellos, de manera que si a un cuerpo no se le aplica una fuerza debe permanecer en reposo. La citada modificación se debe a Galileo y Newton. Galileo aportó el principio de *inercia* según el cual en *ausencia*



de fuerzas un cuerpo *puede o bien estar en reposo* (como decía Aristóteles) *o moverse con una velocidad constante*. Newton completó las leyes de la mecánica añadiendo que las fuerzas *modifican el movimiento de los cuerpos comunicándoles una aceleración*.

APLICACIÓN EN EL AULA

La tierra es esférica



Los alumnos empezarán observando una pelota iluminada por la luz del Sol y después podemos repetir esta experiencia en el aula, a oscuras, utilizando una linterna, un proyector de diapositivas o cualquier fuente de luz que proyecte un haz luminoso horizontal. Es importante explicarles que lo que vamos a utilizar es un modelo de la situación real. Entre el modelo y la realidad existe una relación semejante a la que hay entre un diorama y la escena real que queremos simular, o entre un plano y la ciudad que representa. Con el haz que emita la fuente de luz elegida iluminamos la misma pelota blanca que hayamos utilizado con el Sol real en los experimentos. A los alumnos se les explica que ésta representa a nuestro planeta en el modelo que estamos construyendo.

Sustituiremos después la pelota blanca por una esfera terráquea, con la que nuestros alumnos están familiarizados desde muy pequeños, y veremos que una semiesfera está iluminada en tanto que la otra permanece en la oscuridad. De momento, debemos mantener

el eje de la esfera perpendicular al suelo por razones obvias. Dirigidos por el profesor, los alumnos deben identificar ambas situaciones como correspondientes al día y la noche; se puede utilizar el globo terráqueo para fijar algunos países conocidos, así como la situación aproximada del colegio. Señalaremos este punto de alguna manera, por ejemplo mediante un muñeco pequeño, y lo colocaremos en la parte iluminada. Es muy importante dirigir la imaginación de nuestros alumnos de manera que identifiquen el colegio con la posición del muñeco en la esfera terráquea, para que relacionen la realidad con un modelo simplificado, operación fundamental en el desarrollo de la ciencia.



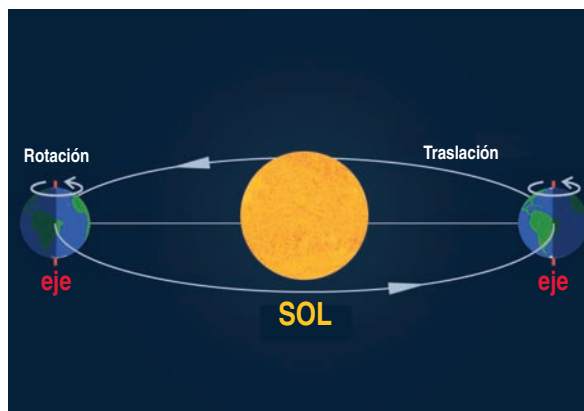
2.2. El sistema Tierra-Sol

La sucesión de los días y las noches

Como consecuencia de los experimentos la pregunta siguiente es obvia: ¿Por qué no es siempre de día en la ciudad? ¿Cuál es la razón por la que se suceden los días y las noches? Estas preguntas son enormemente interesantes, ya que recrean la situación con la que se encontraron los primeros seres humanos cuando se hicieron las mismas preguntas. Y suele surgir el conocido preconceito de Ptolomeo, que explica la sucesión de los días y las noches por un movimiento del Sol en torno a la Tierra fija, movimiento fácil de simular en nuestro modelo. Igualmente sencilla es la solución contraria, en la que el Sol está fijo y la Tierra da una vuelta al día sobre su eje, produciéndose el efecto de la sucesión del día y la noche, solución que elegiremos para nuestro modelo. Esta solución no requiere que la Tierra se desplace en torno al Sol para explicar los periodos de luz y oscuridad, ya que el modelo los reproduce con sólo girar el globo terráqueo. Pero como el alumno está familiarizado con la idea de que la Tierra gira en torno al Sol durante un periodo anual, creemos que es preferible introducir este giro en el modelo.

La Tierra gira en torno al Sol

Así, nuestro primer modelo consistirá en una Tierra esférica con el eje de rotación perpendicular al plano que contiene su órbita, por la cual la Tierra desarrolla su movimiento de traslación en torno al Sol. De esta manera hemos construido un modelo del sistema Tierra-Sol que nos explica la sucesión de días y noches como el resultado de los periodos de luz y sombra en el lugar en que estamos situados en nuestro planeta.



La duración de los días y las noches: las estaciones

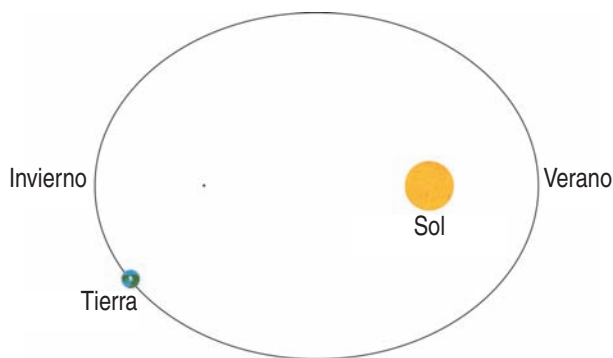
Pero todos los modelos son aproximados y sus predicciones deben compararse con la realidad constantemente. La modificación de un modelo se fundamenta en el avance de la ciencia, por lo cual deberemos prestar la máxima atención a este proceso. Sin lugar a dudas el camino que vamos a seguir a continuación es el que recorrieron los astrónomos a lo largo de la historia de la humanidad.

Una de las observaciones que **no** explica este modelo es la existencia de las estaciones, así como **tampoco** aclara la duración variable de los días y las noches a lo largo del año. De acuerdo con nuestro modelo, el día estaría dividido en dos periodos de luz y sombra de doce horas de duración cada uno. Además, la cantidad de luz solar que cualquier punto del planeta recibe a lo largo del año permanece constante, lo que es contrario a la existencia de las estaciones con veranos calurosos e inviernos fríos en nuestro país.





Con estos experimentos y las discusiones subsiguientes debemos dejar claro a nuestros alumnos que el modelo que hemos elaborado no es suficientemente preciso. La primera carencia de nuestra representación es, como hemos señalado, la de no explicar la existencia de las estaciones. Si preguntamos a nuestros alumnos por la razón por la que en verano la temperatura es superior a la del invierno, veremos que una de las respuestas más frecuentes es la de achacar la diferente temperatura estacional a una variación de la distancia de la Tierra al Sol, lo que implica una órbita con una pronunciada excentricidad, como indica la figura.



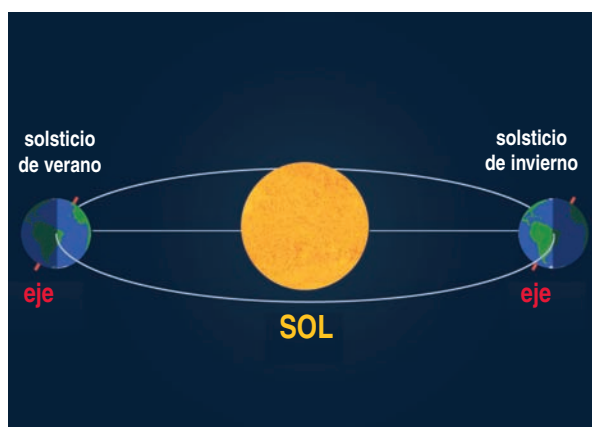
Nuestro modelo, así modificado, reproduciría la existencia de las estaciones, con unos veranos que corresponderían a un acercamiento al Sol y unos inviernos en los que el planeta estaría más alejado de nuestra fuente de luz y calor.

En este punto deberíamos preguntar a nuestros alumnos si la predicción del modelo de distancia variable está de acuerdo con todas las observaciones que ellos conocen sobre la existencia de las estaciones en el planeta, y siempre encontraremos a alguien que señale la disparidad entre verano e invierno en diferentes países. Sabemos, por ejemplo, que cuando es verano en nuestro país es invierno en Argentina, por ejemplo. Así, debemos llegar a la conclusión de que es un hecho conocido que cuando es verano en el hemisferio norte es invierno en el hemisferio sur y viceversa, observación que nuestro modelo de órbita excéntrica no reproduce. Apenas pensemos un poco descubriremos que la Tierra, al acercarse al Sol, recibe una mayor radiación solar en ambos hemisferios **simultáneamente**, lo que es contrario a la realidad. Además, el modelo sigue prediciendo días y noches de duración constante a lo largo de todo el año, lo que también es contrario a lo que se observa. Todo el mundo sabe que los días son más largos en verano y más cortos en invierno.

Esto nos obliga a modificar nuestro modelo de manera que produzca veranos calurosos de días largos e inviernos fríos de días cortos. ¿Qué modificaciones del modelo sugieren nuestros alumnos? Son muchas las posibilidades que tenemos a nuestra disposición, las respuestas de nuestros alumnos nos dejarán asombrados. Algunos pueden proponer una velocidad de rotación de la Tierra variable, sincronizada con la distancia variable al Sol. Pero esta solución no explica la existencia de las estaciones, que está íntimamente relacionada con la duración de los días. El hecho es que esta divergencia entre el modelo y la realidad nos obliga a considerar qué características de la teoría debemos

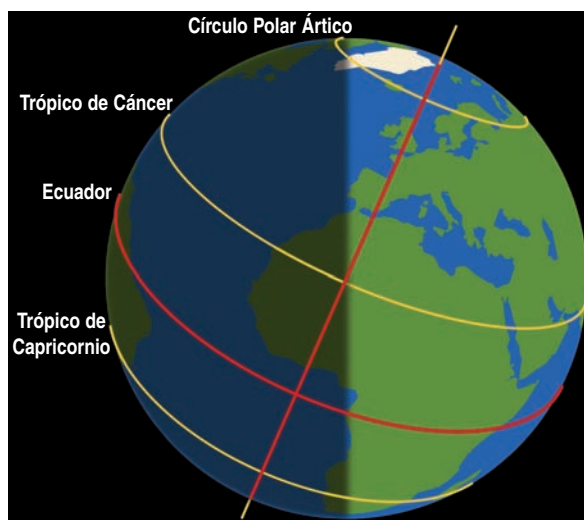
cambiar para adecuarla a las observaciones, proceso éste que se encuentra en el corazón de la construcción de la ciencia.

La solución más sencilla es, como todos sabemos, la de inclinar el eje de giro de la Tierra respecto al plano de la órbita terrestre, como indica la figura, postulando que esta inclinación se mantiene constante a lo largo de toda la órbita.



Inclinación del eje de giro de la Tierra

Esta inclinación del eje de la Tierra tiene importantes consecuencias que debemos investigar con nuestros alumnos y comparar con la realidad. Es importante señalar que el único concepto físico que estamos empleando en este juego de elaborar un modelo que se comporte igual que el sistema Tierra-Sol es el de la iluminación y producción de sombras por objetos opacos, que hemos investigado en el aula de forma exhaustiva.



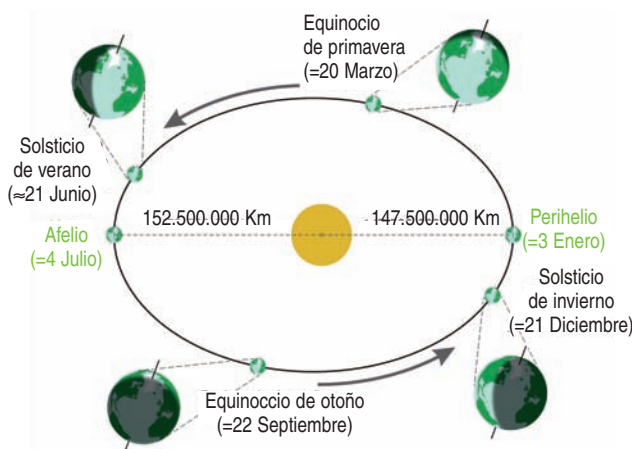
Si estudiamos la situación de la Tierra en el solsticio de verano, en la representación de la figura anterior (extremo izquierdo de la órbita), vemos que corresponde a una situación en que los días son más largos que las noches en el hemisferio norte, y las noches más largas que los días en el hemisferio sur. Además, si meditamos sobre esta situación nos damos cuenta de que la Tierra en ese punto se encuentra en la situación correspondiente al día más largo del año en el hemisferio norte, ya que viene de una parte de la trayectoria en la que la duración de los días crece y se dirige a un sector en el que los días decrecen. Esta situación la identificamos fácilmente como la correspondiente al día más largo del año que tiene lugar, como hemos dicho, en el solsticio de verano.

Justamente al lado opuesto de la trayectoria encontramos la situación contraria, con los días más cortos del año en el hemisferio norte y las noches más largas, situación que corresponde al solsticio de invierno. A partir de este punto la duración de los días crece, por lo que en antiguas civilizaciones se identificaba este punto con el nacimiento del año. Así pues, reciben el nombre de solsticios los dos puntos de la órbita terrestre en los que los días presentan una duración extrema.



En el hemisferio norte del planeta el día más largo corresponde al solsticio de verano (en torno al 21 de junio) y el día más corto al solsticio de invierno (en torno al 21 de diciembre).

Como es lógico, si la Tierra recorre su órbita manteniendo su eje paralelo a sí mismo, pasará por dos puntos en los que la duración del día y la noche sean iguales. Estos puntos en los que el eje de la Tierra es tangente a la órbita reciben el nombre de *equinoccios*, y corresponden a las situaciones que se señalan en la figura:



Para fijar estas ideas vamos a referir una historia imaginaria, el nacimiento de una catedral, en la que pueden emplearse los conocimientos que hemos adquirido para señalar una dirección en la superficie de la Tierra. En esta historia asistiremos al acto en el que un obispo señala el eje de una nueva catedral en la dirección este-oeste, de manera que el ábside se situará mirando al este.

Cuando el obispo llegó, aún no había salido el Sol. El maestro lo estaba esperando, acompañado por dos obreros del gremio de los canteros. Tras saludarse brevemente el obispo clavó su báculo en el suelo y se retiró unos pasos para contemplar el espectáculo. Era la noche del 22 de marzo, noche de equinoccio, en la que

la duración del día y de la noche se igualaba. Para nuestros cuatro personajes se aproximaba un momento mágico. La sombra del báculo del obispo, elevado exactamente en el lugar que ocuparía el altar, señalaría la dirección este-oeste que seguiría el trazado del nuevo templo.



De repente ocurrió lo esperado. El disco del Sol apareció repentinamente por Oriente (exactamente por el este). El espacio adquirió un extraño tinte rojizo y simultáneamente el báculo proyectó una sombra infinita señalando la dirección de la nave principal de la futura iglesia. Durante unos instantes nuestros amigos quedaron sobrecogidos gozando de aquella sensación extraña de unión entre cielos y tierra. Todavía sumergido en aquel ambiente rojizo, los dos canteros clavaron un par de estaquillas en el suelo y tendieron una cuerda blanca entre ellas. Esta cuerda sería la columna vertebral del edificio.

Toda la escena duró apenas unos minutos. Cuando el disco del Sol se dejó ver completamente todo volvió a la normalidad. El campamento despertó súbitamente, los hombres comenzaron a salir de sus alojamientos y avivaron los fuegos dormidos, soplando los rescoldos cuidadosamente cubiertos la noche anterior con ceniza. La magia del momento se desvaneció como por ensalmo.

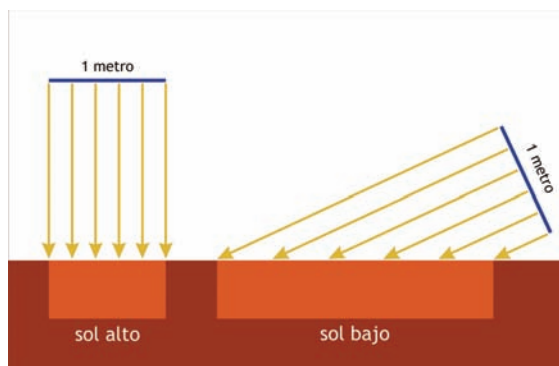
Volvamos de nuevo a nuestro estudio. Existen, como todos sabemos, dos *equinoccios*, el de primavera (en torno al 20 de marzo) y el de otoño (el 22 de septiembre aproximadamente). En el calendario occidental se hace coincidir el inicio de las estaciones con estos puntos singulares.

Una vez resuelto el problema de la duración de los días, debemos estudiar si el modelo de eje inclinado veintitrés grados y medio explica también la distinta temperatura que se produce en las diferentes estaciones. El modelo, si está bien construido, debe predecir una potencia de insolación mayor en nuestra latitud cuando los días son más largos (en verano), y menor cuando los días son más cortos (en torno al solsticio de invierno).

Pero para ello deberemos realizar algunos experimentos previos que nos ayuden a entender cómo cambia la energía que recibe la Tierra en función del ángulo de incidencia del haz de radiación.

El Sol se comporta, en cierto modo, como un cuerpo a muy alta temperatura. No sólo emite luz visible sino también radiaciones infrarrojas y ultravioletas, todas ellas con gran poder energético.

Es fácil ver que la energía que recibe la Tierra por unidad de superficie depende del ángulo de incidencia, es decir, de la inclinación del Sol. Por esa razón, al amanecer el Sol *calienta* menos que al mediodía, cuando los rayos caen formando un ángulo menor con la perpendicular al lugar.

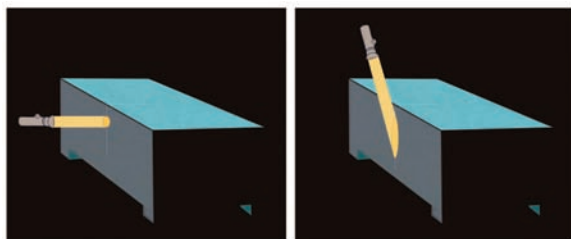


APLICACIÓN EN EL AULA



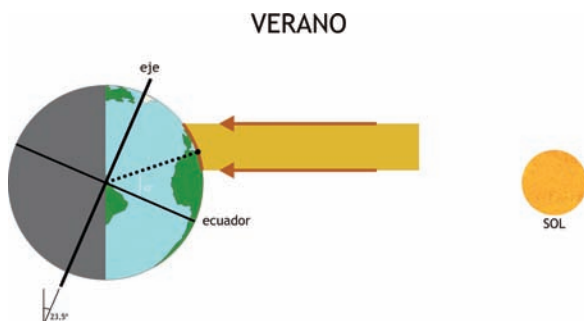
Podemos reproducir esta situación en nuestra aula, realizando experimentos con una linterna o cualquier tipo de foco que ilumine una superficie circular bien definida. En nuestro experimento, la linterna representa una parte de la superficie solar y la mesa sobre la que proyectamos su haz de luz representa la superficie de la Tierra.



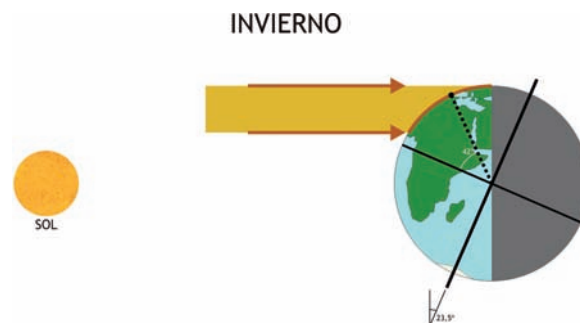


Se ve fácilmente que la superficie iluminada aumenta cuando el ángulo que forma el haz de luz con la perpendicular a la mesa disminuye, y viceversa. Esto es lógico, ya que la linterna emite la misma cantidad de energía independientemente de la forma en que se ilumine la superficie, pero el área iluminada varía con el ángulo de incidencia. Cuando la linterna se sitúa de forma que el haz de luz es perpendicular a la superficie, el área iluminada es mínima y la energía está más concentrada. Cuando inclinamos la linterna, la superficie de la zona iluminada aumenta, pero como la energía que emite la linterna por unidad de tiempo es la misma, ésta queda más repartida.

Una vez que hemos entendido estos experimentos, podemos aplicar el mismo modo de razonar al Sol y a la Tierra. Así entenderemos por qué durante la estación de verano, en el hemisferio norte la cantidad de energía solar que incide por unidad de superficie es mayor en cualquier punto de este hemisferio que en el correspondiente del hemisferio sur.



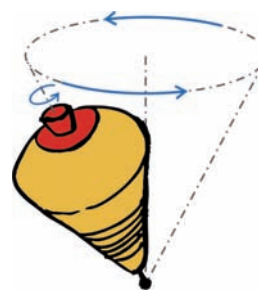
Durante el invierno en nuestro hemisferio la situación es la contraria, como indica la figura.



Así se puede explicar fácilmente la variación de temperatura media en las distintas estaciones y la periodicidad de este fenómeno a lo largo del año.

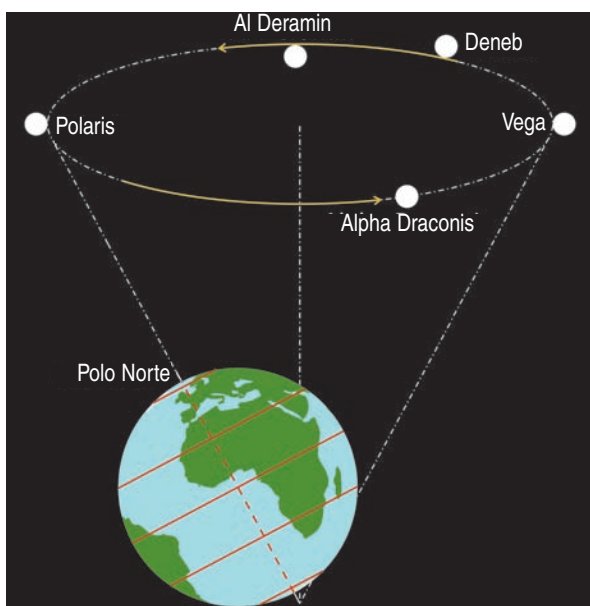
Movimiento de precesión

El modelo que hemos construido implica que la Tierra gira en torno a un eje que conserva su dirección en el espacio a lo largo del tiempo. Pero todo el que haya observado una peonza sabe que el eje de giro cambia, debido a la fuerza de la gravedad.



Como la Tierra está sometida también a diferentes fuerzas, debidas a la Luna, al Sol y a los demás planetas del sistema solar, su eje también cambia. Pero este cambio se produce muy lentamente debido a su enorme masa y tamaño, por lo que el eje tarda unos 25.780 años en ejecutar una vuelta completa y volver a su

posición original. En su recorrido, el eje de giro de la tierra irá *apuntando* a lugares diferentes de la esfera de las estrellas fijas, en la forma en que se señala en la figura. En el momento presente, el eje de la Tierra señala aproximadamente a la estrella Polar, simplificando la operación de orientarse en la noche. Pero debemos ser conscientes de que no siempre fue así ni lo será en el futuro.



Este movimiento, origen de la *precesión* de los equinoccios, no lo vamos a estudiar pero debemos citarlo para que los profesores sepan que existe, ya que cualquier cuerpo que gire, sea una pequeña peonza o un enorme planeta, se comporta de la misma manera.

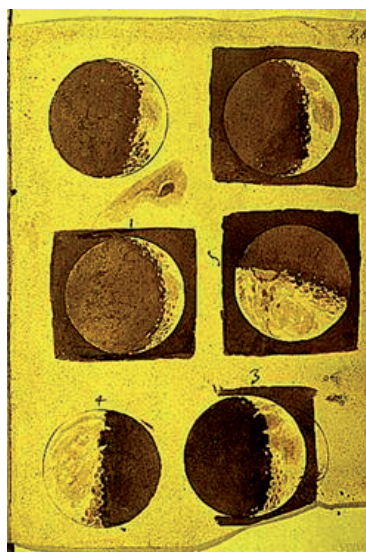
2. 3. Otro efecto de luces y sombras: las fases de la Luna

Antecedentes históricos

Podríamos decir que, casi con seguridad desde la aparición de la humanidad, todos los seres humanos que gozan del sentido de la vista, han observado la Luna muchas veces a lo largo de su vida. Los griegos sabían

que nuestro satélite tenía forma de esfera, y habían determinado su tamaño y la distancia a la que se encuentra de nosotros. Pero hasta 1609 la observación de la Luna se había hecho simplemente mirando, como dicen los ópticos, a ojo desnudo. Afortunadamente en 1609, un pulidor de lentes holandés construye el primer telescopio y, poco tiempo después, la noticia le llega a Galileo en una carta que su amigo Jacques Badovere le envía desde París. Galileo inicia una investigación sobre el tema y un año después dispone de un instrumento de unos veinte aumentos que inmediatamente utilizó para estudiar el cielo. Así, por primera vez, un ser humano pudo ver la Luna a través de un telescopio. Y vio que, como la Tierra, tenía valles y montañas, por lo que creyó que tenía que ser muy parecida a nuestro planeta.

Como buen científico, plasmó sus observaciones en el cuaderno de laboratorio, dibujando lo que veía. Y por ello nosotros, muchos años después, tenemos la posibilidad de ver sus dibujos originales, tal como se conservan en la Biblioteca Nacional de Florencia. En ellos se apoyan las historias que describen la Luna como un mundo como el nuestro, al que suponen habitado por selenitas.



Galileo vivió en lo que hoy es Italia desde 1564 hasta 1642, en la época en la que en España reinaron Felipe II, Felipe III y Felipe IV, cuyo pintor de cámara era Diego Velázquez. Es posible que Galileo y Velázquez se conocieran, al menos por carta, con ocasión del diseño de una escultura ecuestre que Felipe IV ordenó realizar siguiendo las líneas del cuadro que Velázquez había pintado en 1635, y de la que Galileo calculó algunas de sus características principales.



La construcción de una estatua de este tipo, con el centro de gravedad tan alejado de la base, presenta serios problemas de estabilidad y de resistencia de materiales; por ello se decidió pedir a Galileo que estudiase el problema e indicarse la distribución de pesos más conveniente. La escultura fue realizada por Martínez Montañés y fundida por Pietro Tacca según las indicaciones enviadas por Galileo, que nosotros no hemos podido resistir la tentación de reproducir:

[...] colaborar con vos y con el maestro Velázquez es una tentación difícil de evitar. He calculado que serán necesarias unas ocho toneladas de bronce para la obra, pues la parte trasera del caballo tiene que ser maciza. La inclinación, ángulos y cálculos para el vaciado os lo haré llegar a la mayor brevedad posible. No dudéis que pondré tanto empeño en esta adivinanza como en el más grande de mis proyectos."

La estatua se encuentra ahora en la plaza de Oriente de Madrid, donde podemos admirarla.

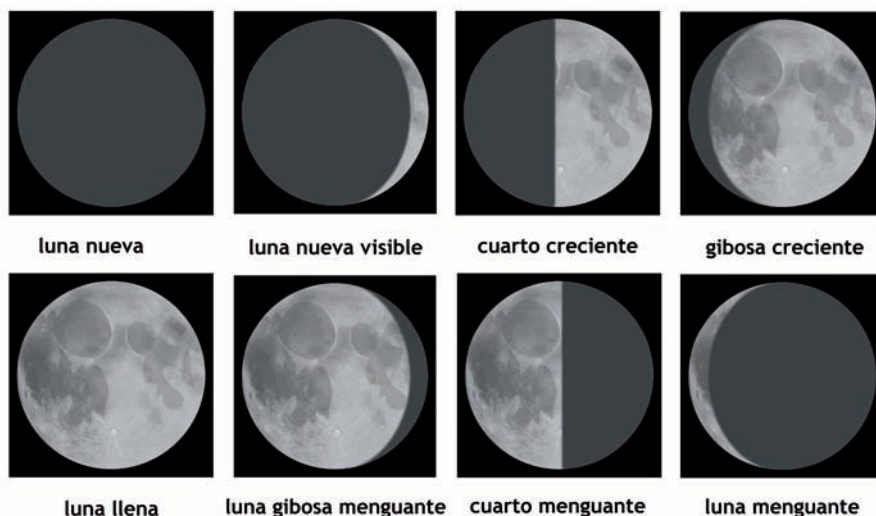


Tras esta breve introducción histórica, podemos volver a nuestro tema. El fenómeno de las fases de la Luna es uno de los más interesantes desde el punto de vista didáctico, ya que el profesor puede diseñar diferentes caminos para que el alumno se dé cuenta de la relación directa de la producción de sombras en su aula y de la aparición de las fases en nuestro satélite. Esta transposición de un mismo fenómeno de su mesa de trabajo al sistema solar (de unas dimensiones del orden de los cientos de millones de kilómetros) le dará idea de la potencia de las ciencias experimentales y de la constancia del comportamiento de la naturaleza, reflejada en sus leyes.

Como es tradicional, comenzaremos por presentar el fenómeno a nuestros alumnos mediante observaciones sobre la posición de la Luna y del Sol en el firmamen-

to al anochecer y al amanecer, así como en todo momento en que la Luna esté visible. En seguida nos daremos cuenta de la existencia de un preconcepto tan absurdo como pensar que la Luna y el Sol no se encuentran nunca a la vez en el cielo. Afortunadamente este preconcepto es fácil de destruir, ya que lo único que se necesita es mirar al cielo. Además esta observación, que nos lleva a darnos cuenta de que la Luna y el Sol se pueden ver a la vez a lo largo de casi todo el ciclo de las fases, nos dará pie para explicar a los alumnos que la respuesta a muchas preguntas en la ciencia, la encontramos, simplemente, por medio de la observación del fenómeno.

Tras un mes de estudio del cielo, tomaremos nota de todo ello, ordenando nuestros resultados de la manera tradicional:



El estudio del ciclo completo de la Luna nos lleva a la conclusión de que su duración es de unos 29,5 días, ciclo que tradicionalmente se ha dividido en cuatro partes o cuartos cuya duración es aproximadamente de siete días, número considerado en la antigüedad como especial y que da origen a la semana.

Si preguntamos a nuestros alumnos por la causa de la aparición de las fases nos encontraremos con una nueva sorpresa: muchos de ellos creen que se debe a la sombra proyectada por la Tierra, que intercepta la luz del Sol que ilumina a nuestro satélite. La destrucción de este error, muy extendido, es la primera tarea que debemos emprender.



APLICACIÓN EN EL AULA



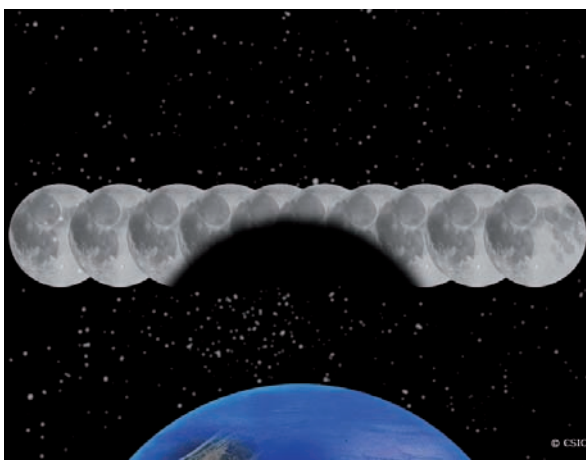
Lo más sencillo, a nuestro juicio, es construir un modelo que reproduzca el preconcepto: se ilumina una pelota de fútbol con la luz del Sol y se hace que su sombra se proyecte sobre otra más pequeña del tamaño de una naranja, que podemos desplazar, como indica la figura, para estudiar la variación de la sombra.



Así pues, la hipótesis de la sombra terráquea sobre la Luna resulta ser falsa (pues no explica los hechos), lo que nos obliga a meditar un poco más sobre el tema.

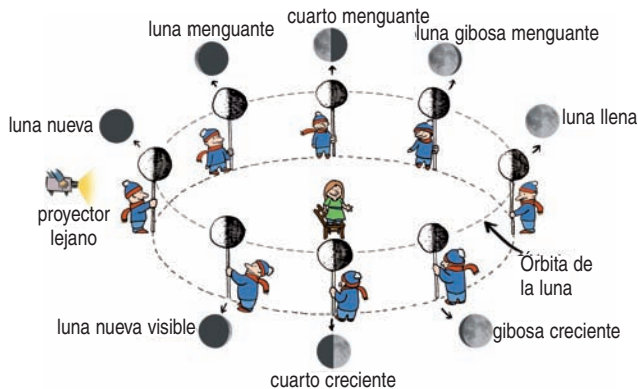
2.4. El sistema Tierra-Luna-Sol: los eclipses de la Luna y del Sol

APLICACIÓN EN EL AULA



El resultado es, como todos sabemos, el de un eclipse y no el de la fases; es un resultado fácil de comprobar con nuestro modelo, ya que la sombra de la Tierra, que es la que se proyecta sobre la Luna, tiene siempre la forma de un círculo, no existiendo nunca una frontera entre la parte iluminada y la oscura que sea una línea recta.

El paso siguiente es el de idear un modelo del sistema Tierra-Luna-Sol que explique la observación de las fases lunares desde la Tierra y la periodicidad con las que se producen. El objetivo es que el alumno **invente** la parte del sistema solar que se refiere a estos tres cuerpos celestes, que no es otra que la que se indica a continuación.



Una vez fijado el modelo de la Luna iluminada por el Sol, girando en torno a la Tierra, con un periodo aproximadamente mensual, (en una órbita contenida en el mismo plano que la órbita que describe la Tierra en torno al Sol) se puede mostrar el sistema de Copérnico a los alumnos, explicando el giro de la Tierra en torno al Sol y la presencia de los demás planetas, como se indica en la figura.

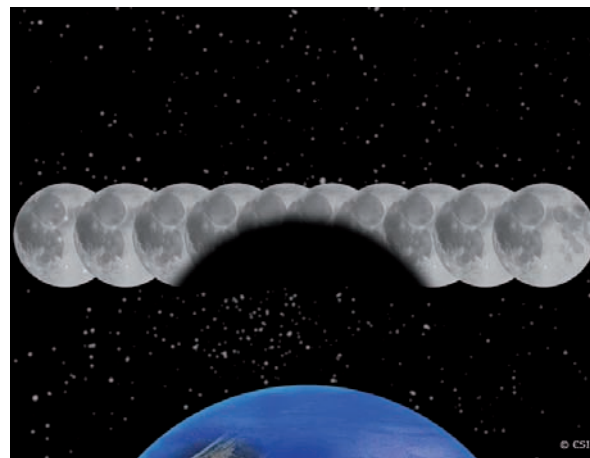


Como hemos dicho al principio, de acuerdo con los criterios del profesor, los conocimientos previos de los alumnos y los objetivos programados, también se puede optar por comenzar mostrando el sistema heliocéntrico y comprobar experimentalmente que este modelo explica las observaciones de las fases de la Luna. Ambos caminos son diferentes y siguen vías didácticas distintas, pero su elección es tarea del profesor.

Eclipses de Luna

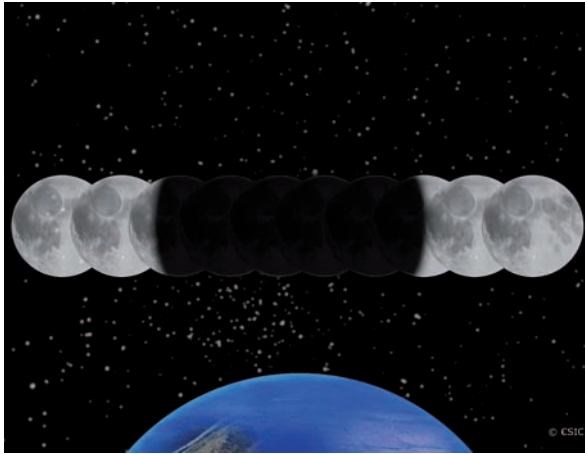
Podemos volver de nuevo sobre el efecto de la sombra de la Tierra sobre la Luna, repitiendo los experimentos anteriores, y explicar los eclipses de Luna con nuestro modelo de Copérnico.

Si no tenemos la suerte de poder observar un eclipse, deberemos utilizar nuestro modelo y los recursos de la web <http://museovirtual.csic.es> para estudiarlos. Recordemos el resultado de nuestro experimento.

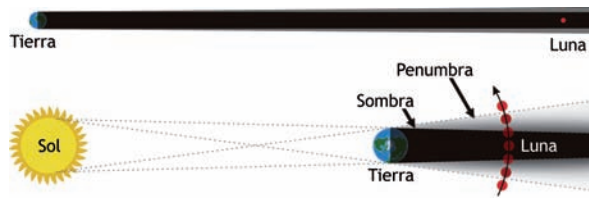


Como vemos, en este eclipse no queda la Luna completamente en sombra, por lo que recibe el nombre de eclipse parcial de Luna. Si modificamos ligeramente la posición relativa de la Luna y de la Tierra, podemos producir un eclipse total de Luna, que ocurre cuando la Tierra se interpone entre el Sol y la Luna, haciendo que la Luna se introduzca totalmente dentro del cono de sombra del planeta.





En la figura siguiente, se ha representado la misma situación desde un punto de vista perpendicular a la órbita de la Tierra, pero respetando los tamaños relativos de la Tierra y la Luna.



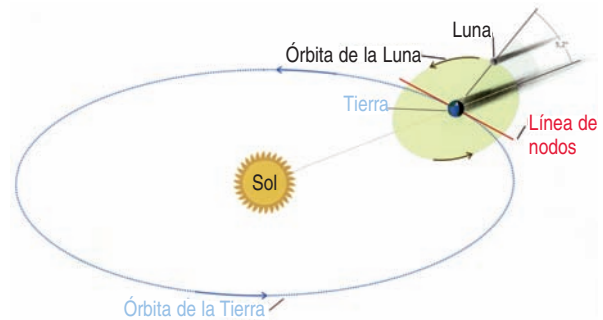
A continuación, vamos a explorar nuestro modelo y a estudiar sus predicciones, con el fin de buscar posibles contradicciones con la realidad observada.

Como hemos visto, para que un eclipse lunar ocurra, la Luna tiene que estar entre ambos cuerpos en el plano de la órbita de la Tierra en torno al Sol. Por esa razón, en el modelo que hemos construido las órbitas de la Luna en torno a la Tierra y de la Tierra en torno al Sol están en el mismo plano. Así, para que se produzca un eclipse lunar, nuestro satélite debe estar muy próximo al primer día de Luna llena.

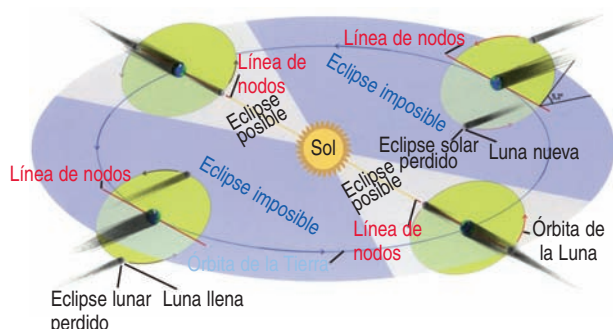
No es raro que los alumnos, una vez que han entendido el modelo y su funcionamiento, pregunten por qué

no se produce un eclipse cada mes lunar, ya que en Luna llena se dan las condiciones para que se produzca, es decir, la Luna se encuentra en la zona de sombra de la Tierra. Nos encontramos, pues, con una predicción del modelo contraria a la realidad observada y, como siempre ocurre en la ciencia, cuando un modelo presenta inexactitudes debemos entenderlas y tratar de solucionarlas, en general modificando el modelo para refinar sus resultados.

Como es evidente, el fallo de nuestro modelo se encuentra en suponer que el plano de la órbita lunar es el mismo que el de la órbita terrestre. En realidad, ambas órbitas se encuentran en planos distintos que forman un ángulo suficiente para que la Luna no pase por la zona de sombra de la Tierra cada vez que pasa por Luna llena, como indica la figura.



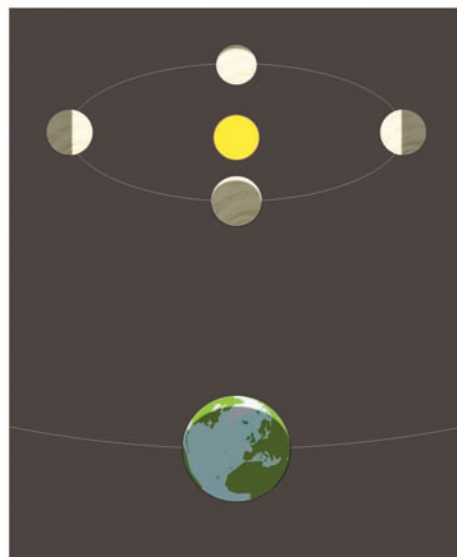
Pero si este modelo es correcto, nunca se produciría un eclipse, lo que es igualmente falso. La solución es evidente: el plano de la órbita lunar se mantiene paralelo a sí mismo mientras la Tierra se traslada alrededor del Sol. Esto hace que se den, en algún momento, las condiciones para que se produzca un eclipse, como indica la figura.



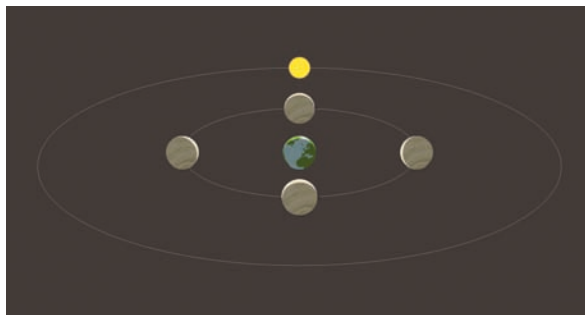
Como ejercicio de acomodación y como información relacionada con este tema citaremos el caso de las fases de Venus, descubiertas por nuestro amigo Galileo utilizando su telescopio.

Cualquier objeto iluminado por el Sol que cambia su posición respecto a nosotros presenta fases. Así, si nos movemos en torno a una figura cualquiera iluminada por el Sol vemos que la parte iluminada y la oscura muestran formas diferentes. El ejemplo más directamente relacionado con el tema que nos ocupa es el de la observación de una pelota iluminada por el Sol desde distintos puntos de vista. Para ello podemos colocar en el patio una esfera de poliuretano sujeta por un alambre o una varilla fina a algún soporte que le permita reposar en el suelo. Si la esfera es iluminada por el Sol, al girar el observador en torno a ella verá cómo la parte iluminada y la sombra reproducen las fases de la Luna.

Ya hemos citado el ejemplo clásico de las fases de Venus, cuyo esquema representamos a continuación y que fue crucial para desechar el modelo de Ptolomeo frente al de Copérnico. En la figura se han representado las fases de Venus vistas desde la Tierra (suponiendo que Venus gira en torno al Sol en una órbita más cercana al Sol que la de la Tierra), tal como lo predice el modelo heliocéntrico, que se ajusta a lo observado desde nuestro planeta.



En cambio, el modelo geocéntrico de Ptolomeo predice una situación diferente. En éste, la Tierra se encuentra en el centro y Venus gira en torno a ella en una órbita de radio menor que la del Sol. Esta situación se ha representado en la figura siguiente y produce un resultado contrario a lo observado.



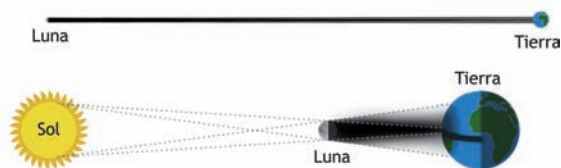
Ambos modelos, heliocéntrico y geocéntrico, son fáciles de materializar por los alumnos con esferas de poliespán y un proyector de diapositivas. La construcción del modelo y el estudio de sus predicciones constituyen una actividad divertida y útil.



Eclipses de Sol

Podemos aprovechar nuestra representación del sistema Tierra – Luna – Sol para estudiar otro fenómeno interesante, también debido a la propagación rectilínea de la luz y a la producción de sombras: los eclipses solares. Así nuestros alumnos podrán utilizar el modelo de rayos para explicarlo y se acostumbrarán a manejar modelos.

Un eclipse de Sol ocurre cuando la Luna se interpone entre la Tierra y Sol y proyecta su sombra sobre nuestro planeta. Para que un eclipse solar ocurra, la Luna tiene que estar cruzando el plano de la órbita de la Tierra en torno al Sol en el momento apropiado (cuando la línea de nodos apunta hacia el Sol). Esto trae como consecuencia que el día de un eclipse solar sea un día muy próximo al primer día de Luna nueva. El resto de las consecuencias que se deducen de nuestra representación es fácil de trabajar en clase.



Capítulo

3

FORMACIÓN DE
IMÁGENES CON EL
MODELO DE RAYOS



3.1. La cámara oscura

Existen indicios de que ya Aristóteles, en el siglo IV antes de Cristo, tenía conocimiento tanto de la existencia de la cámara oscura como del principio de su funcionamiento. También se sabe que los nómadas de los desiertos conocían el fenómeno y lo reproducían a voluntad. Para ello practicaban un pequeño orificio en la pared de piel de la tienda, cerrada completamente de manera que en su interior reinase la oscuridad. En la pared opuesta a la que tenía la perforación, aparecían invertidas y con toda la riqueza de colores y matices las imágenes de las escenas del exterior, iluminado por el intenso Sol del desierto. Este efecto no dejaría de maravillar a los nómadas, pero no tanto como podemos suponer; estaban acostumbrados a ver agua donde no la había y a que se trastocasen las posiciones de las pocas cosas que se veían en el desierto, de manera que lo tomarían, probablemente, como otra ilusión óptica debida al comportamiento, para ellos desconocido, de la luz.

Los pintores del Renacimiento, interesados en todo lo relacionado con la visión y la luz, no tardaron en construir pequeñas tiendas de nómadas modificadas. En ellas sustituían la pared de proyección por una pantalla plana y, penetrando en su interior, estudiaban los tamaños y proporciones de las imágenes que se formaban sobre la pantalla de proyección, comparándolas con los tamaños de las figuras originales. Surgió así la ciencia de la perspectiva, utilísima para su arte. En realidad, el empleo de la perspectiva señala la muerte de la Edad Media y del Gótico, y el comienzo del Renacimiento.

Explicación de la cámara oscura utilizando el modelo de rayos

Antes de explicar el fundamento de la cámara oscura, debemos presentarla a los alumnos de manera que sientan la misma emoción que el que observe el fenó-

meno por primera vez, ya se trate de Aristóteles, los nómadas del desierto o cualquier persona dotada de curiosidad y buen juicio. Como ejemplo de lo que decimos, podemos citar la primera experiencia de Santiago Ramón y Cajal cuando observó este curioso fenómeno. Santiago a los ocho años mostraba ya una gran habilidad en el manejo de los lápices, habilidad que le sirvió más adelante para esquematizar lo que veía con ayuda del microscopio. Pero a esa temprana edad utilizaba este don para caricaturizar a sus maestros. Como todo artista, deseoso de que su obra fuera conocida, repar-tía los dibujos entre sus compañeros, con el peligro consiguiente. Inevitablemente sus maestros tuvieron ocasión de admirar su obra y, aunque apreciaron su destreza, fue confinado en un recinto que actualmente ha caído en desuso pero que era famoso en las escuelas de la época: el cuarto de las ratas. Era este un espacio generalmente oscuro, de pequeño tamaño y con una puerta que sólo se abría desde fuera. Y fue allí donde Don Santiago nos relata lo que él creyó su primer descubrimiento científico:

“En la escuela, mis caricaturas, que corrían de mano en mano, y mi cháchara irrestañable con los camaradas, indignaban al maestro, que más de una vez recurrió, para intimidarme, a la pena del calabozo, es decir, al clásico “cuarto oscuro”, habitación casi subterránea plagada de ratones, hacia la que sentían los chicos supersticioso terror y yo miraba como ocasión de esparcimiento, pues me procuraba la calma y recogimiento necesarios para meditar mis travesuras del día siguiente.

Allí, en las negruras de la cárcel escolar, sin más luz que la penosamente cernida a través de las grietas del ventano desvencijado, tuve la suerte de hacer un descubrimiento físico estupendo, que en mi supina ignorancia creía completamente nuevo. Aludo a la cámara oscura, mal llamada de Porta, toda vez que su verdadero descubridor fue Leonardo da Vinci.



He aquí mi curiosa observación: el ventanillo cerrado de mi prisión daba a la plaza, bañada por el sol y llena de gente. No sabiendo qué hacer, se me ocurrió mirar al techo y advertí con sorpresa que el tenue filete de luz proyectaba, cabeza abajo y con sus naturales colores, las personas y caballerías que discurrían por el exterior... Por donde caí en la cuenta de que los rayos luminosos, gracias a su dirección rigurosamente rectilínea, siempre que se les obliga a pasar por angostísimo orificio, pintan la imagen de punto de que provienen. Naturalmente mi teoría carecía de precisión, ignorante como estaba de los rudimentos de la óptica.

Qué me importa, pensaba yo, carecer de libertad. Se me prohíbe corretear por la plaza, pero en compensación la plaza viene a visitarme".

Mi infancia y juventud. Santiago Ramón y Cajal.

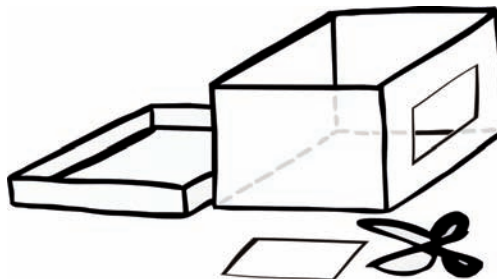
APLICACIÓN EN EL AULA



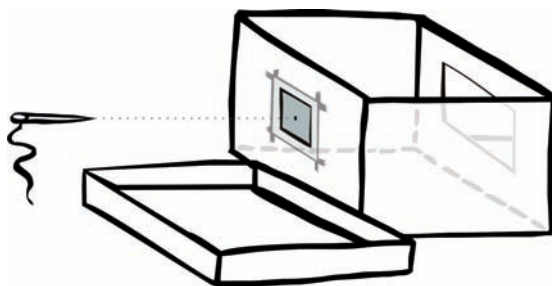
Para proporcionar a nuestros alumnos la oportunidad de asombrarse, no nos queda otro remedio que construir una cámara oscura. Afortunadamente es un trabajo sencillo que puede llevarse a cabo con elementos fáciles de conseguir. Una caja de cartón y un papel vegetal o un vidrio mate sirven para construir uno de estos aparatos. Si se desea, se puede mejorar el diseño pintando de negro el interior de la caja, por razones que quedarán claras más adelante.



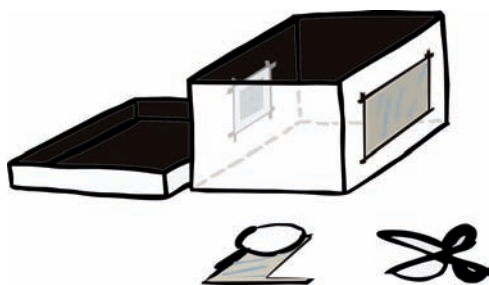
Una vez que los alumnos hayan observado el fenómeno, debemos proceder a construir nuestra cámara.



Perforaremos una de las paredes de la caja con un punzón de menos de 1mm de diámetro.

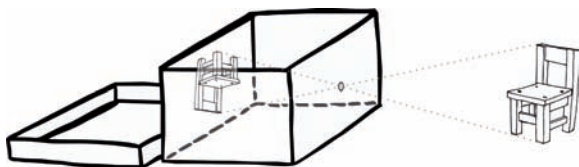


Sustituiremos parte de la cara opuesta con el papel o el vidrio deslustrado, como indica la figura.

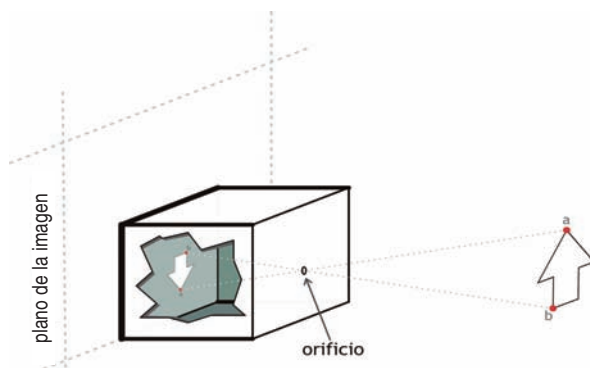


A continuación, saldremos con nuestros alumnos al patio del colegio, preferiblemente a la hora en la que el Sol ilumine con más fuerza. Cubiertos convenientemente con una manta que no deje pasar la luz, como hacían los fotógrafos hasta mediados del siglo XX, observaremos la imagen formada. La razón para cubrirnos es evidente: queremos que sólo llegue a nuestros ojos la luz que proviene de la imagen formada sobre el papel.

La figura siguiente muestra un experimento imaginario, tan del gusto de los científicos y, entre ellos, de nuestros alumnos. Si pudiésemos levantar la tapa de la caja de cartón y ver los rayos de luz, observaríamos algo semejante a lo que el artista ha representado: la imagen del objeto modelo aparece invertida ante nuestro ojos y está formada por los rayos de luz que dicho objeto, convenientemente iluminado, refleja. Así es como la imagen es captada por nuestra rudimentaria cámara oscura.



En la figura siguiente, hemos empleado un objeto más del gusto de los físicos, una flecha. Y si señalamos dos puntos que consideremos importantes en el objeto, de manera que los podamos identificar en la imagen, veremos que se encuentran en la forma señalada en la figura siguiente.



Funcionamiento de la cámara oscura

Es fácil explicar a nuestros alumnos el funcionamiento de la cámara. Si imaginamos el orificio de la cámara extremadamente estrecho, del mismo diámetro que lo que los alumnos piensan que tiene cada uno de nuestros imaginarios rayos de luz, cada punto del objeto emitirá un rayo que pasará por la perforación e iluminará un punto de la imagen. Ese es el mecanismo de formación de la imagen explicado con el modelo de rayos, y los alumnos deben darse cuenta de que estos rayos son los mismos que han conceptualizado al estudiar la formación de las sombras.

Para terminar esta serie de observaciones que tienen como finalidad el que los alumnos comprendan el modelo de rayos, podemos experimentar con la definición y la luminosidad de la imagen en función del diámetro de la perforación de la cámara. Veremos que, si aumentamos el diámetro, aumenta la iluminación de la imagen, pero disminuye su definición y viceversa. La explicación es muy sencilla. Si el orificio es muy estrecho, la luz emitida por un punto del objeto llegará a la



pantalla (el papel vegetal) formando un cono que iluminará una superficie determinada. Si el orificio es ancho, los diferentes conos se solaparán, y se producirá una sensación de desenfoco en la imagen pero aumentará la luminosidad. En cambio, con una perforación muy estrecha, el haz de luz, que hemos modelizado como un rayo, llega a la pantalla cubriendo una superficie muy pequeña, y da la sensación de imagen enfocada; el precio que hay que pagar es el de perder luminosidad. Esta relación entre diámetro de la perforación, luminosidad y definición de la imagen es muy fácil de observar y permite al alumno fijar las ideas esenciales que tienen lugar en la formación de la imagen en una cámara oscura.

Si el maestro dispone de recursos, es muy sencillo construir una cámara oscura en la que quepan unos cuantos alumnos, y que reproduzca la situación de los nómadas a la que nos hemos referido anteriormente.

3. 2. Un experimento interesante: la medida del diámetro del Sol

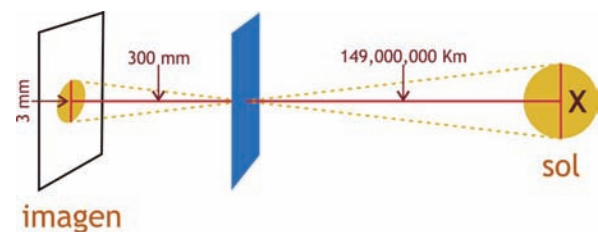
Una vez que los alumnos han aprendido a manejar en el aula el modelo de rayos y su aplicación a la formación de imágenes, podemos hacer una pirueta mental y aplicar estos conocimientos a procesos semejantes en los que intervengan magnitudes del tamaño del sistema solar: podemos medir el diámetro del Sol. Es un ejemplo en el que se hace patente la potencia del método científico, se parte de la hipótesis de que la luz se comporta de la misma manera en nuestra aula que en el espacio del sistema solar. A continuación, vamos a medir el tamaño del Sol a partir del hecho de que los rayos de luz siguen caminos que son líneas rectas.

Para ello utilizaremos un cartón con una perforación semejante a la de una cámara oscura, lo dirigiremos al Sol y usaremos una pantalla de papel blanco, paralela al plano del cartón. Obtendremos así una imagen del

Sol sobre el papel. El principio de la formación de la imagen es el mismo que en la cámara oscura, pero el Sol es una fuente de luz tan intensa que no es necesaria la oscuridad de la cámara para observar su imagen.



Si medimos la distancia que separa el cartón perforado de la pantalla y conocemos la distancia aproximada de la Tierra al Sol, que es de unos 149.000.000 Km, podemos determinar de forma aproximada el diámetro del Sol, X, mediante una sencilla proporción.



$$\frac{X \text{ Km}}{149,000,000 \text{ Km}} = \frac{3 \text{ mm}}{300 \text{ mm}}$$

$$300 X = 3 \cdot 149,000,000$$

$$X = 1,490,000 \text{ Km}$$

3. 3. ¿Qué ocurre cuando un rayo encuentra un espejo? Las leyes de la reflexión

Todos sabemos que la luz se propaga en línea recta a menos que encuentre un obstáculo en su camino. Cuando dicho obstáculo es un espejo, se produce un fenómeno llamado **reflexión especular**, que consiste en que el rayo de luz se **desvía** de su trayectoria rectilínea y da lugar al **rayo reflejado**. Gracias a este fenómeno podemos vernos reflejados en la superficie del agua de un lago o en la de los muchos espejos que tenemos en nuestros hogares. El objetivo de este apartado es el de esclarecer el mecanismo de la formación de imágenes en los espejos planos a partir de nuestro modelo de rayos.



La desviación que sufre un rayo de luz cuando incide en un espejo no es arbitraria. La primera tarea que debemos acometer es la de investigar las leyes a las que obedece la luz en la reflexión. El procedimiento que seguiremos será el habitual en la ciencia, es decir, la experimentación.

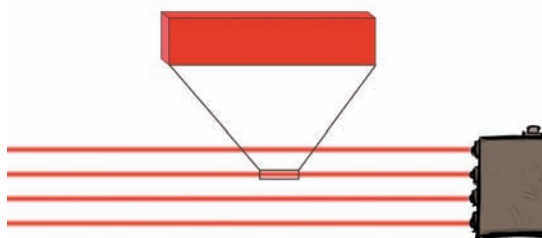
Para ello debemos aislar el fenómeno tanto como sea posible y estudiar el caso más sencillo que podamos concebir: un rayo que incide (rayo **incidente**) perpendicularmente sobre la superficie de un espejo plano.

APLICACIÓN EN EL AULA



Para realizar el experimento podemos utilizar un puntero láser. Hay que controlar debidamente el rayo para que no se dirija directamente al ojo. También puede utilizarse un proyector de diapositivas, además de una diapositiva opaca en la que se ha realizado una perforación, cuyo diámetro sea del tamaño del haz producido por el puntero láser. Esta segunda opción es menos peligrosa ya que no tiene la potencia necesaria para producir quemaduras instantáneas en la retina.

Especialmente útiles son los láseres de rayos múltiples, que se adquieren en empresas de aparatos de enseñanza, que lanzan rayos con perfil rectangular para poder seguir su camino sobre un papel o una pizarra.



Y para materializar el rayo podemos realizar el experimento en un vaso lleno de agua con una gota de leche (como se hizo para visualizar los coloides), o con uno de esos aparatos de producir humo que utilizan los apicultores.

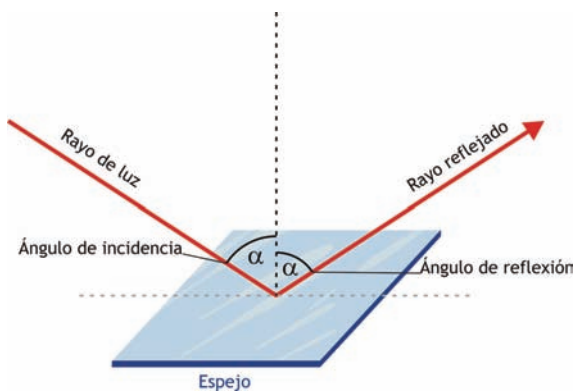


Nuestros alumnos se encuentran ahora en una situación privilegiada: están a punto de descubrir una ley de la naturaleza.

A partir de cualquiera de los procedimientos citados para materializar el camino de la luz, veremos que el rayo que sale del espejo (rayo reflejado) se mantiene en el plano formado por el rayo incidente y la recta perpendicular al espejo en el punto de incidencia, como podemos comprobar si utilizamos un cartón plano. Este resultado es muy importante, ya que el rayo reflejado podría haber tomado cualquier dirección a partir del punto en que el rayo incidente llega al espejo. De este modo comprobamos que, cualquiera que sea la dirección del rayo incidente, el comportamiento del rayo reflejado es el mismo.

Así, podemos enunciar (siempre de forma provisional) una ley que determine el comportamiento de los dos rayos, de manera que sea una especie de reglamento del fenómeno de la reflexión. Esta ley, que deberán intentar enunciar los alumnos, se puede expresar de la siguiente manera:

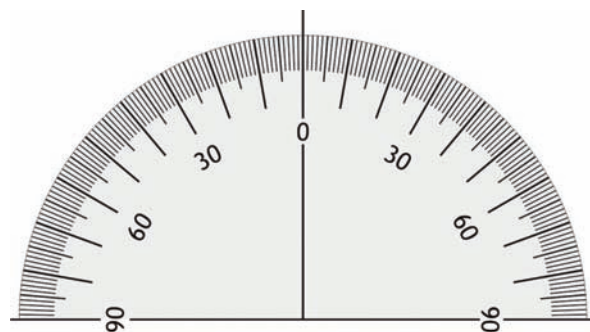
Cuando un rayo incide sobre una superficie especular, se produce un rayo reflejado que se encuentra en el plano definido por el rayo incidente y la perpendicular al espejo en el punto de incidencia.



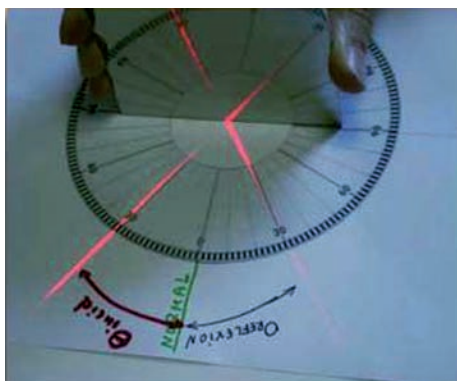
Después de observar el fenómeno y de estudiarlo de forma cualitativa, debemos pasar a cuantificar las magnitudes que consideremos relevantes para caracterizarlo y concretar su comportamiento. En este caso, las magnitudes que se pueden considerar relevantes son los *ángulos de incidencia* y de *reflexión*, que definimos como los ángulos que forman el rayo incidente y el rayo reflejado con la perpendicular a la superficie reflectante en el punto de incidencia.

Medida de los ángulos de incidencia y de reflexión

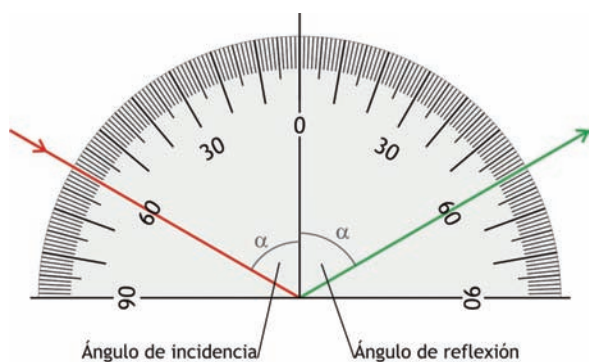
Para ello debemos utilizar un instrumento de medida de ángulos, de la misma forma que para medir longitudes empleamos un metro. Como todos sabemos, los ángulos se miden con un transportador, sencillo aparato que consiste en un círculo dividido en 360 partes iguales, a las que llamamos grados. A nosotros, por el momento, nos bastará con medio círculo, como el de la figura.



Es muy fácil realizar experimentos de reflexión sobre un espejo, ya sea empleando un rayo de sol, una linterna y una cartulina que deje pasar un haz de perfil rectangular o con un puntero láser. El transportador se sitúa perpendicularmente a la superficie de un espejo, como indica la fotografía.



Debemos realizar el experimento variando el ángulo de incidencia y midiendo el de reflexión, y comprobaremos que para todos los valores del ángulo de incidencia se obtiene un ángulo de reflexión del mismo valor. Así pues, en todos los casos ambos ángulos son iguales.



Repitamos el experimento anterior con el espejo situado en el fondo de un recipiente transparente que llenaremos sucesivamente con diversos líquidos también transparentes como agua, agua con sal, aceite incoloro, etc. Por precaución, no deben usarse líquidos inflamables. En todos los casos se puede observar que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Leyes de la reflexión

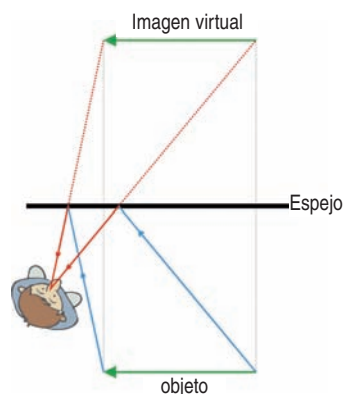
Ahora es el momento de recopilar nuestro trabajo. En primer lugar, hemos observado un fenómeno de la naturaleza, la reflexión de la luz. A continuación, como sabemos que la luz está formada por rayos que se pro-

pagan en línea recta, hemos diseñado varios experimentos que nos permiten investigar cómo se comporta un rayo cuando incide sobre un espejo. Seguidamente hemos estudiado el fenómeno y hemos definido las magnitudes que nos han parecido relevantes: los ángulos de incidencia de y reflexión. Finalmente se ha estudiado cuantitativamente (es decir, mediante medidas), la relación de estas magnitudes, en los distintos experimentos. Podemos concentrar los resultados de los citados experimentos en unas pocas líneas, que formarán el enunciado de las *leyes de la reflexión*:

El rayo incidente, la normal al punto de incidencia y el rayo reflejado se encuentran en el mismo plano.

El valor del ángulo de reflexión es igual al del ángulo de incidencia.

Una vez que hemos enunciado las leyes, para que nuestros alumnos se den cuenta de la información que contienen, deberemos mostrarles que todos los fenómenos de reflexión se pueden entender si sabemos este enunciado que apenas ocupa unas pocas líneas. Para que se den cuenta de ello estudiaremos algunos casos en los que este hecho se compruebe. En primer lugar, trataremos de entender cómo se forma la imagen de un objeto (en el caso de la figura, una flecha) que se encuentra detrás de nosotros.

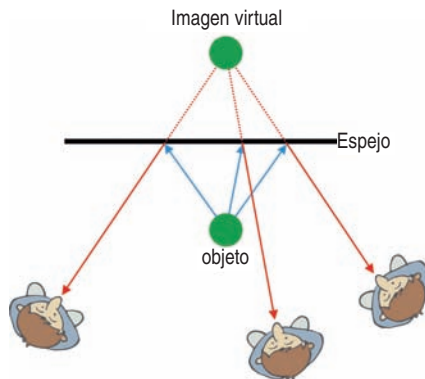


La punta de la flecha, iluminada por alguna fuente de luz, emite rayos en todas direcciones. De ellas, algunas inciden sobre el espejo y, por la ley de la reflexión,

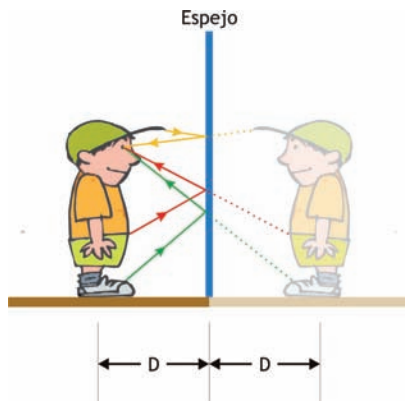


penetran en nuestro ojo y forman una imagen. Pero, como indica la figura, el rayo que penetra en nuestro ojo no lleva información que nos indique que se trata de un rayo reflejado y, en consecuencia, percibimos una sensación idéntica a la que correspondería a un objeto situado detrás del espejo. Así, decimos que el espejo ha formado una imagen virtual del objeto, que es la que nosotros percibimos.

La figura siguiente nos indica cómo veríamos un objeto desde diferentes lugares, cuando se refleja en un espejo plano, y comprobamos que la imagen permanece en el mismo lugar, tal como lo haría un objeto real.

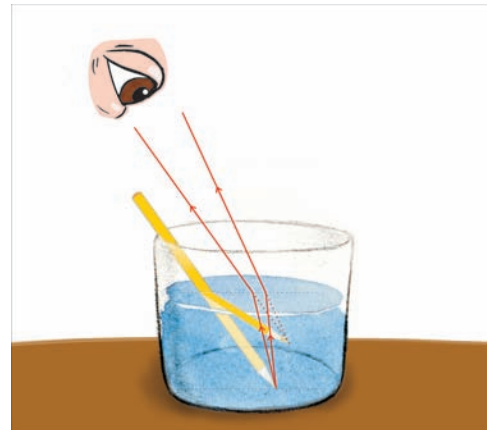
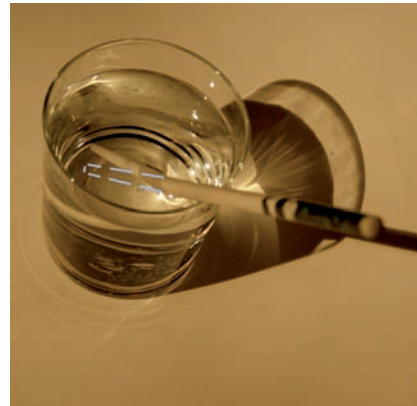


Por último, estudiaremos, a la luz de nuestro modelo de rayos, la formación de nuestra propia imagen en un espejo plano. Para ello seguiremos la misma técnica: se trazan los rayos que salen de los puntos relevantes del objeto (que este caso somos nosotros mismos) y se observa el camino que siguen hacia nuestros ojos, en la forma indicada en la figura.



3. 4. ¿Qué ocurre cuando la luz cambia de medio? Las leyes de la refracción

Todos hemos observado el fenómeno de la refracción. Si introducimos parte de un bastón en el agua, éste aparece como si se hubiese fracturado o corto.



Esa es la razón por la que al fenómeno se le llama refracción, palabra derivada de fraccionar, fracturar o romper.

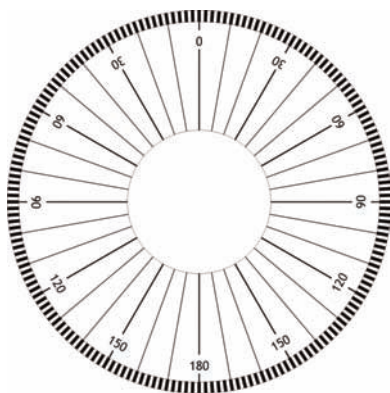
APLICACIÓN EN EL AULA



Trayectoria del rayo

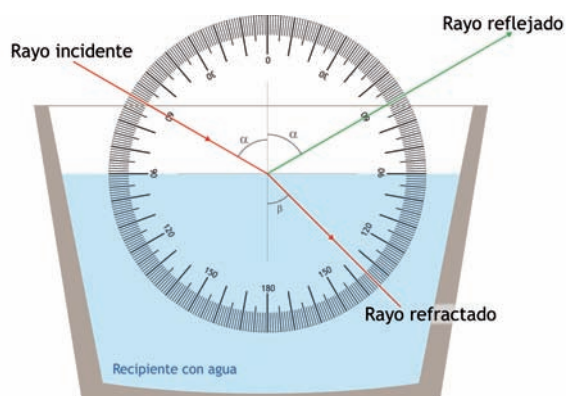
Como en el caso de la reflexión, para comprender lo que le ocurre a la luz cuando cambia la naturaleza del medio por el que se propaga, vamos a determinar el camino que sigue un solo rayo cuando pasa del aire al agua. Lo más sencillo es utilizar un puntero láser, pero hay que tomar las precauciones debidas.

Los esquemas siguientes señalan una forma conveniente de realizarlo. Se puede usar una copia del transportador de ángulos que reproducimos (en papel o en plástico transparente de los que se emplean en las transparencias de retroproyector) para medir tanto el ángulo de incidencia como el de refracción.



Cuando el rayo incidente llega a la superficie de separación entre dos medios (en nuestro caso aire, medio 1, y agua, medio 2), la superficie de separación tiene un doble comportamiento. Por un lado, actúa como un espejo al reflejar parte de rayo incidente y, por otro, se comporta como un medio transparente al dejar pasar el resto del rayo al otro medio donde se refracta. Por tanto, el rayo incidente se divide en dos rayos: uno que se refleja en dicha superficie y otro que se refracta y se propaga por el segundo medio.

En el esquema adjunto, pueden verse el rayo *incidente*, el rayo *reflejado* y el rayo *refractado*, sus correspondientes ángulos son fáciles de determinar con el transportador.



Para hacer visible el rayo refractado, podemos añadir una gota de leche al agua del vaso, como se explicó al tratar el efecto Tindall.

Es evidente que las magnitudes relevantes en este proceso son los tres ángulos: de incidencia, reflexión y refracción, y la naturaleza de los dos medios por los que se transmite la luz, caracterizada por sus *índices de refracción* n_1 y n_2 . Estos índices miden la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en cada medio.



Si estudiamos el resultado del experimento, vemos que el rayo incidente, el reflejado y el refractado se encuentran en el mismo plano, que también contiene a la perpendicular al punto de incidencia. Además, en este caso en el que el rayo de luz pasa del aire al agua, el rayo refractado se acerca a la normal en el punto de incidencia.

El paso siguiente consiste en enunciar la ley que relacione las anteriores magnitudes, para lo cual deberemos realizar numerosos experimentos variando el ángulo de incidencia y anotando tanto su valor como el del ángulo de refracción correspondiente.

El resultado de nuestras medidas será, aproximadamente, el que se refleja en la tabla siguiente:

Ángulo de incidencia, en grados sexagesimales	Ángulo de refracción, en grados sexagesimales
0,00	0,00
5,00	3,76
10,0	7,50
15,0	11,2
20,0	14,9
25,0	18,5
30,0	22,1
35,0	25,5
40,0	28,9
45,0	32,1
50,0	35,2
55,0	38,0
60,0	40,6
65,0	43,0
70,0	45,0
75,0	46,6
80,0	47,8
85,0	48,5

Leyes de la refracción

De nuevo se encuentran nuestros alumnos con una situación privilegiada para un investigador, puesto que están a punto de descubrir una ley de la naturaleza. En este caso no es fácil descubrir la relación entre el ángulo de incidencia y el de refracción. Aunque ya Ptolomeo había realizado este experimento y conocía las funciones trigonométricas (aunque no como las definimos ahora), hasta el siglo XVII no se enunció correctamente la ley.

La relación correcta fue descubierta en 1621 por W. Snell, profesor de matemáticas de la Universidad de Leiden. La ecuación que la describe fue dada a conocer de forma universal por Descartes en 1637, aunque dio una explicación falsa de una fórmula correcta. Descartes supuso que la luz estaba constituida por pequeñas partículas que se desplazaban con gran rapidez por el aire y por los medios transparentes. Además creía erróneamente, como Kepler, que la luz viajaba más rápidamente por los medios más densos que por los medios menos densos. Este comportamiento es uno de los requerimientos de las primitivas teorías corpusculares.

La ley de la refracción es muy simple, una vez que se ha descubierto:

El índice de refracción del primer medio multiplicado por el seno del ángulo de incidencia (i) es igual al producto del índice de refracción del segundo medio por el seno del ángulo de refracción (r).

Matemáticamente esto se expresa con la ecuación:

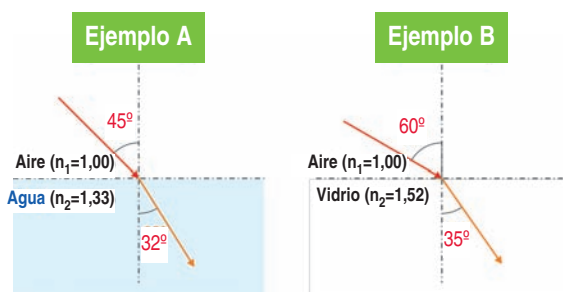
$$n_1 \sen i_1 = n_2 \sen r_2$$

Y no hay otra manera más sencilla de expresar la ley de la refracción; no tenemos más remedio que emplear la función trigonométrica del seno (o alguna equivalente).

El índice de refracción del aire, prácticamente igual al del vacío, se toma como unidad y los índices correspondientes a cada medio se refieren a los del aire. Así en nuestro experimento, n_1 vale 1 (aire) y n_2 vale 1,33 (agua).

Si realizamos el mismo experimento con otra sustancia transparente, agua con sal disuelta, aceite incoloro o vidrio, comprobaremos que se cumple la misma ley, pero en vez de 1,33 aparecerá otro número.

Como se deduce de la fórmula de Snell, los medios transparentes con mayor índice de refracción desvían más el rayo refractado respecto al incidente (es decir, se acercan más a la normal). A continuación, se representan esquemáticamente los resultados experimentales de la refracción aire/agua y aire/vidrio.



Como vemos en la figura, los índices de refracción n_2 de aire/agua y aire/vidrio son 1.33 y 1.52 respectivamente.

Como cualquier ley física, la ley de Snell sirve tanto para describir como para predecir el comportamiento de la luz al pasar de un medio a otro aunque, como vemos, no da ninguna razón para que ocurra de esta forma y no de otra. Debemos tener claro que las leyes describen comportamientos y los modelos o teorías tratan de explicar ese comportamiento.



Espejismos debidos a la refracción

Entre los efectos más espectaculares de la refracción están los espejismos. En estos casos la diferencia de temperatura entre las distintas capas de aire hace que varíe su densidad y, por tanto, su índice de refracción, lo que da lugar a que el aire se estratifique y forme capas de diferentes índices de refracción. Esta estratificación puede originar la ilusión óptica de que el cielo está al nivel de la tierra (inversión). Por dicha razón a veces, en un desierto, se tiene la sensación de que una palmera está al borde de un lago al reflejarse en una superficie de agua, como indica la ilustración adjunta. La apariencia de agua se debe a que la tierra se ve del color azul del cielo.



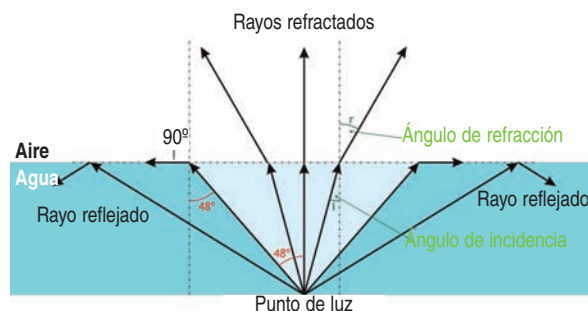
3. 5. Ángulo crítico

A continuación, vamos a estudiar lo que ocurre cuando el rayo incidente se encuentra en el medio con mayor índice de refracción (mayor *refringencia*). Para ello tendremos que cambiar ligeramente nuestro dispositivo experimental.

APLICACIÓN EN EL AULA



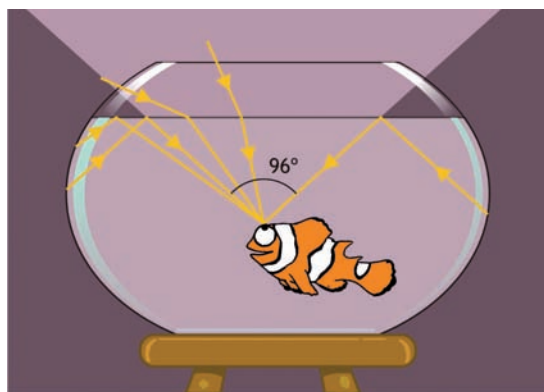
Podemos realizar un nuevo experimento en un recipiente lleno de agua que tenga un fondo plano y transparente. Después de añadir una gota de leche para conseguir un medio dispersivo, dirigiremos el rayo del puntero láser desde el centro del fondo hacia la superficie, en la forma indicada en el esquema. Así se consigue repetir el experimento de la reflexión y de la refracción, pero de forma que el rayo incidente se propague, como hemos dicho, desde un medio de mayor refringencia (el agua) a un medio de menor refringencia (el aire).



Vemos que, como se desprende de la ley de Snell, al pasar un rayo de un medio más refringente a otro menos refringente se separa de la normal. Pero llega un momento en que el ángulo de refracción vale exactamente 90° , y emerge “rasante”, es decir, por el plano de la superficie que separa los dos medios. Al ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción de

90°, se le llama **ángulo límite o de reflexión total**. En el caso de la interfase aire-agua es de unos 48°. Para ángulos de incidencia mayores, el ángulo de refracción es mayor de 90°, por lo que el rayo refractado es suprimido y toda la luz incidente se refleja (reflexión total).

Si aplicamos estas leyes para estudiar lo que ve un pez dentro del agua, vemos que su mundo, como su campo de visión, es muy complejo. En la figura adjunta se ha representado de forma esquemática.



La zona que hemos señalado en blanco es la ventana que se le abre al mundo exterior. El resto pertenece al mundo sumergido.

3. 6. Imágenes en las lentes convergentes

Vamos a introducir a continuación un nuevo elemento en nuestro recorrido por el proceso de formación de imágenes mediante el modelo de rayos: la lente *convergente*.

La palabra lente proviene del latín "lentis" que significa lenteja. Por esa razón a las lentes ópticas se las denomina así, por su similitud con la legumbre.

La lente más antigua de la que se tiene evidencia

corresponde a un ejemplar que se encontró en unas excavaciones en Nínive, fabricada con cristal de roca. En Grecia también eran conocidas las lentes convergentes y Aristófanes las cita en su obra *Las Nubes*, en la que hace referencia a una *lente para producir fuego*. Más tarde, Plinio *el Viejo* también cita este tipo de lentes y menciona la existencia de una fabricada tallando una esmeralda, y que fue utilizada por Nerón.

Para motivar a los alumnos se puede leer en el aula el pasaje de *La isla misteriosa* de Julio Verne, en el que se describe cómo unos náufragos, durante la Guerra de Secesión americana, tras evadirse en un globo y alcanzar una isla, hacen fuego con una lente convergente que fabrican llenado de agua dos cristales de reloj:

—Ya lo está viendo, amigo —exclamó el corresponsal—. Hay fuego, verdadero fuego, que asará perfectamente esa magnífica pieza, con la cual nos regalaremos dentro de poco.

—Pero ¿quién lo ha encendido? —preguntó Pencroff.

—¡El sol!

La respuesta de Gedeón Spilett era exacta. El sol había proporcionado aquel fuego del que se asombraba Pencroff. El marino no quería dar crédito a sus ojos, y estaba tan asombrado que no pensó siquiera en interrogar al ingeniero.

—¿Tenía usted una lente, señor? —preguntó Harbert a Ciro Smith.

—No, hijo mío —contestó éste—, pero he hecho una. Y mostró el aparato que le había servido de lente. Eran simplemente los dos cristales que había quitado al reloj del corresponsal y al suyo. Después de haberlos limpiado en agua y de haber hecho los dos bordes adherentes por medio de un poco de barro, se había fabricado una verdadera lente, que, concentrando los rayos solares sobre un musgo muy seco, había iniciado la combustión.



*El marino examinó el aparato y miró al ingeniero sin pronunciar palabra. Pero su mirada era todo un discurso. Sí, para él, **Ciro Smith**, si no era un dios, era seguramente más que un hombre. Por fin, recobró el habla [...].*

APLICACIÓN EN EL AULA



Nosotros podemos repetir el experimento de los naufragos con nuestros alumnos, explicándoles que cualquier sistema de producir fuego encierra siempre un riesgo. Podemos, además, utilizar la experiencia para indicar la forma en la que se puede iniciar un fuego en un bosque con un casco de botella roto, e incluso realizar alguna demostración.



Características de una lente

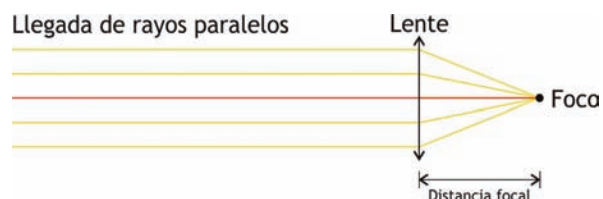
Como se desprende del relato de Julio Verne, una lente convergente está formada por dos superficies esféricas

(como las de los vidrios de reloj) en cuyo interior se encuentra un material más refringente que el aire. En el caso de los naufragos este material era agua pero, en general, las lentes se fabrican de plástico o de vidrios especiales.

Trataremos de explicar el resultado de este experimento mediante nuestro modelo de óptica geométrica. Aunque sabemos que no es cierto, en primera aproximación podemos considerar el Sol como un objeto sin dimensiones, como si fuese un punto muy alejado, por lo que sus rayos nos llegarían siguiendo caminos paralelos. Cuando atraviesan la lente, sus caminos se modifican de manera que convergen en un punto (*foco*).

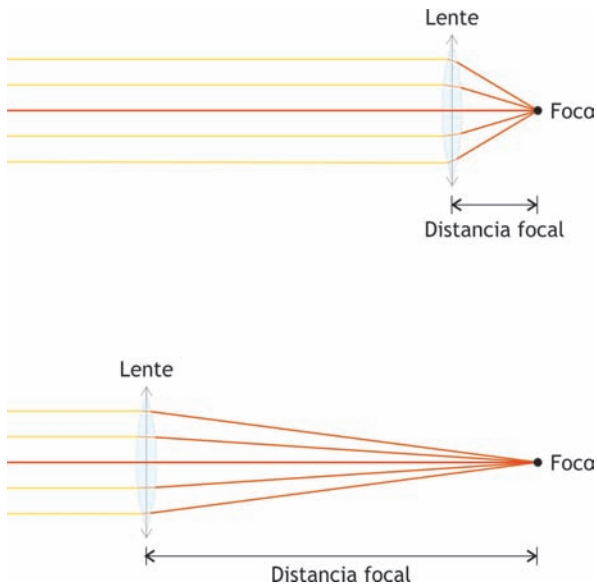
Así, definimos el foco de una lente convergente como el punto en el que se encuentran los rayos que vienen paralelos entre sí y perpendiculares al plano de la lente.

En ese punto se concentran los rayos que han atravesado nuestra lente y producen el suficiente calor para que la temperatura del papel alcance los 230 o 240° C necesarios para que comience a arder. Si dibujamos el recorrido de algunos rayos, obtenemos el esquema siguiente:

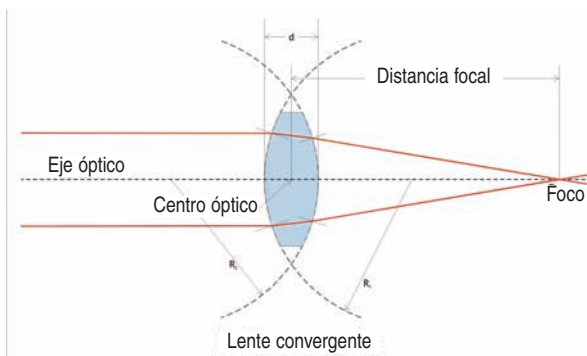


Hemos sustituido el dibujo de la lente convergente (que suponemos delgada) por su símbolo, un segmento con dos puntos de flecha como indica la figura. A la distancia a la que se forma la imagen del Sol, medida desde el centro de la lente, se la llama *distancia focal*.

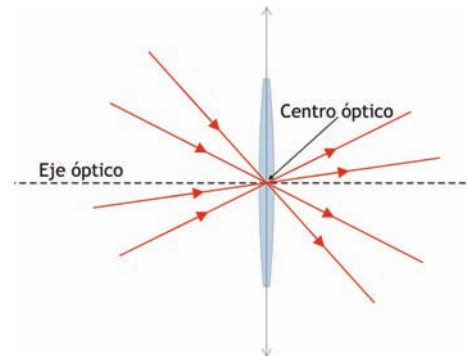
Si empleamos diferentes lentes, veremos que no todas forman la imagen a la misma distancia, es decir, su distancia focal es distinta.



Aunque existen varios tipos de lentes convergentes, nosotros nos vamos a referir a la lente *biconvexa*, formada por dos superficies esféricas (como son los vidrios de reloj a los que se refiere Julio Verne). Estas lentes están compuestas por dos superficies esféricas, cada una con su *centro de curvatura*. La recta que coincide con el eje de simetría de la lente y que pasa por los centros de curvatura, recibe el nombre de *eje óptico* de la lente.



El punto en el que el eje óptico corta al plano de simetría de la lente recibe el nombre de *centro óptico de la lente*, que en este caso coincide con el centro de simetría. Tiene la propiedad de que los rayos que pasan por él no sufren desviación.

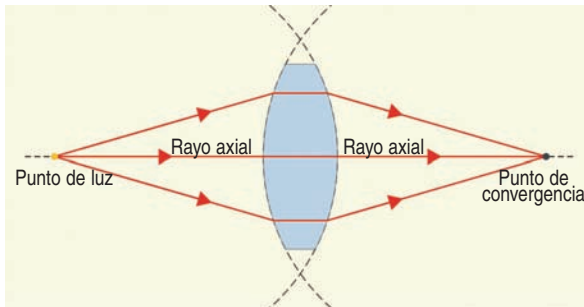


Una vez que conocemos la ley de Snell, es fácil calcular la trayectoria que sigue un rayo que incida sobre la superficie de la lente. Todo lo que tenemos que hacer es trazar la perpendicular a la superficie en el punto en que incide el rayo, medir el ángulo de incidencia y calcular el ángulo de refracción. El rayo se propaga en línea recta en el interior de la lente y llega a la superficie de la cara opuesta, donde deberemos hacer el mismo cálculo.



A partir de la trayectoria de los rayos podemos predecir dónde se forma la imagen de un foco luminoso colocado en cualquier punto del espacio.

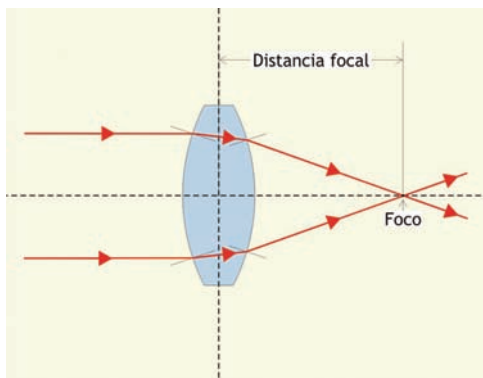




Pero nosotros no vamos a seguir este camino, sino que haremos uso de las propiedades de algunos puntos y distancias que caracterizan la lente, en la aproximación que estamos empleando.

Ya hemos descubierto que hay algunos puntos y rectas que tienen propiedades especiales, que nos servirán para formar imágenes de una manera sencilla. Vamos a repasar cuáles son.

El primer punto importante es el foco, en el que se forma la imagen de un objeto situado sobre el eje óptico y en el infinito. La distancia entre el plano de simetría de la lente y el foco es la distancia focal de la lente.



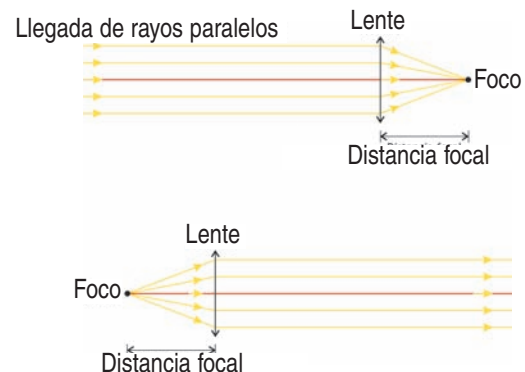
Las lentes se caracterizan por su distancia focal, y una de las magnitudes que se emplea para caracterizar una lente es su *potencia*, cuya unidad es la *dioptría*. La potencia se define como el inverso de la distancia focal,

expresada en metros. Así, si una lente forma la imagen del Sol a una distancia de un metro (su distancia focal es un metro) su potencia es de una dioptría. Si la imagen la forma a 0,5 metros su potencia es el doble:

$$1/0,5 = 2 \text{ dioptrías.}$$

La potencia de una lente, tal como la hemos definido, no tiene nada que ver con su capacidad para concentrar los rayos del Sol. Todos los que inciden sobre ella convergen en su foco. La cantidad de calor que se concentra en el foco depende de la cantidad de luz que admita la lente, es decir, de su superficie.

En el modelo geométrico que estamos utilizando es fácil ver que el camino de los rayos puede invertirse, de tal manera que todo rayo que incida sobre la lente después de pasar por un foco emerge paralelo al eje óptico. Por esa razón, las lentes tienen dos focos, cada uno está situado a un lado de la lente y a la misma distancia, como hemos indicado en la ilustración adjunta. Así, los rayos que pasen por el foco de una lente y la atraviesen, saldrán por el lado contrario paralelos a su eje óptico.

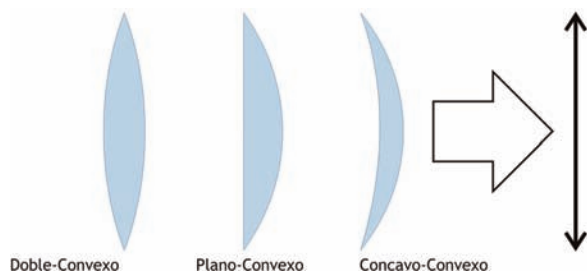


De aquí en adelante, en las construcciones de rayos siempre supondremos que la luz procede de la izquierda de la lente, donde se encuentra el foco que llamaremos F, incide sobre la lente y emerge por la cara de la derecha, en la región donde se encuentra el otro foco, que designaremos como F'.

Con estas convenciones lo que hemos aprendido se puede expresar del modo siguiente: *todo rayo que incide sobre la lente, paralelo al eje óptico, se desvía de tal manera que pasa por el foco del lado contrario, F' , y todo rayo que incide sobre la lente pasando por un foco F se desvía de tal manera que sale por la otra cara de la lente, paralelo al eje óptico.*

Como veremos a continuación, con estos conocimientos podemos predecir o explicar cómo y dónde se forman las imágenes de los objetos en una lente convergente.

Para terminar con la descripción de las lentes convergentes diremos que éstas, como todo el mundo sabe, no están necesariamente formadas por dos superficies convexas como la de la historia de Julio Verne, sino que se pueden construir con caras geométricas de otros tipos. Pero todas son más gruesas por el centro que por los extremos. Para no tener que representar estas lentes con detalle, como hemos visto en el caso de las lentes delgadas se suele utilizar un símbolo y se representan como líneas, con dos puntas de flechas en los extremos, como indica la figura. En muchas de las actividades siguientes utilizaremos esta representación de lente delgada, en la que se desprecia el grosor de la lente y se supone que los rayos cambian de dirección en el segmento rectilíneo que representa el plano de simetría que separa las dos caras de la lente.



APLICACIÓN EN EL AULA



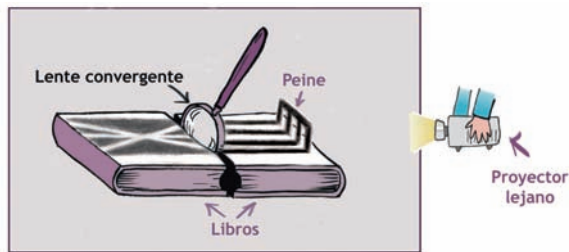
El comportamiento de los rayos de luz en las lentes convergentes es muy fácil de estudiar, como veremos a continuación.

Utilizaremos un puntero láser y haremos un montaje semejante al de la figura, con dos libros y una lupa. Sobre el papel trazaremos una recta que coincidirá con el eje óptico de la lente.

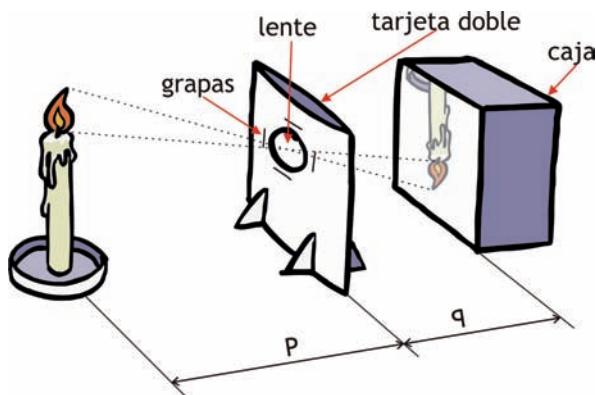


Con los niños más pequeños podemos emplear un proyector de diapositivas enfocado al infinito (o la luz del Sol) y un peine, como indica la figura siguiente, de manera que se materialice la idea de los rayos que se han formado. Este resultado es adecuado para ilustrar el proceso de convergencia.





El primer ejercicio que vamos a llevar a cabo se refiere a la formación de imágenes por una lente convergente. Para ello podemos realizar un montaje parecido al que representa la figura: utilizaremos una lente de las que se venden en los antiguos establecimientos de “*todo a 100*”. Para obtener buenos resultados es importante mantener la habitación con una luz moderada e iluminar el objeto con una fuente de luz intensa, como puede ser una lámpara de mesa de trabajo. El resultado es semejante al obtenido en el caso de la cámara oscura, es decir, se forma una imagen invertida de menor tamaño que el del objeto.

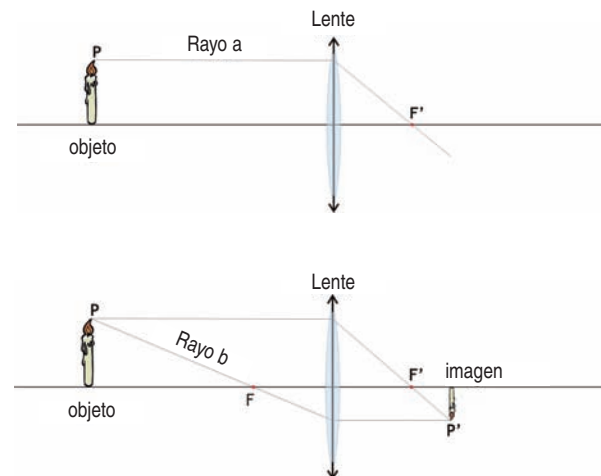


Formación de la imagen

La trayectoria de los rayos que corresponde a la formación de la imagen de la vela es muy fácil de construir.

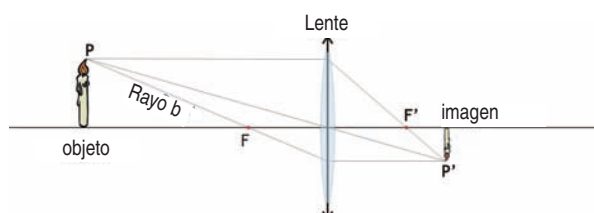
Comenzaremos por determinar la imagen que corresponde a un punto determinado del objeto, al punto superior del mismo, al que llamaremos P. En primer lugar, trazaremos un rayo (señalado como rayo a) que parta del punto P y sea paralelo al eje óptico. Como sabemos, al llegar a la lente se desviará de tal manera que pase por el foco F' , situado a la derecha de la lente. A continuación, trazaremos un segundo rayo (rayo b) que parta del mismo punto del objeto y pase por el foco situado a la izquierda de la lente, F. Este rayo, tras pasar por la lente emergerá paralelo al eje óptico. El punto en el que se cruzan es el que determina la posición de la imagen del punto P, al que llamamos P' .

Si construyésemos del mismo modo las imágenes de todos los puntos que pertenecen al objeto, formaríamos la imagen completa, pero es fácil comprobar que con solo el punto P se puede determinar la posición de la imagen, como indica la figura.



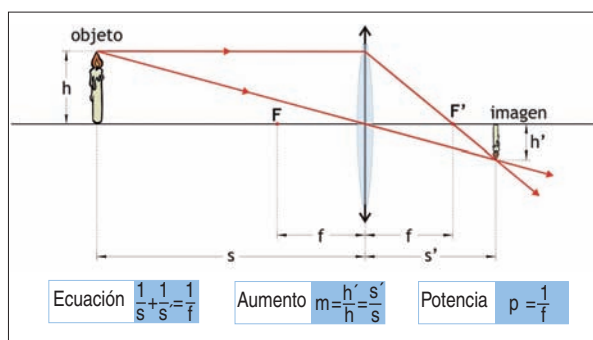
Ambos rayos (y todos los demás emitidos por el objeto y que incidan en la lente) se pueden proyectar sobre una pantalla, como hemos visto en el experimento descrito. A este tipo de imágenes que se pueden proyectar se las denomina imágenes reales. A aquellas que no se

pueden proyectarse las denominadas virtuales, como ya hemos dicho al estudiar los espejos planos.



En el esquema anterior hemos añadido un tercer rayo. Corresponde al camino que parte del punto P y pasa por el centro óptico de la lente, que ya hemos dicho que no sufre desviación. Los tres rayos convergen en el punto de formación de la imagen.

Una vez comprendido el recorrido de los rayos es muy sencillo calcular las distancias si aplicamos la geometría, ya que se trata simplemente de determinar las longitudes de los lados de los triángulos que se forman. En la figura siguiente se muestra un ejemplo que corresponde al caso que hemos tratado: la formación de la imagen de un objeto situado entre el foco de la lente y el infinito.

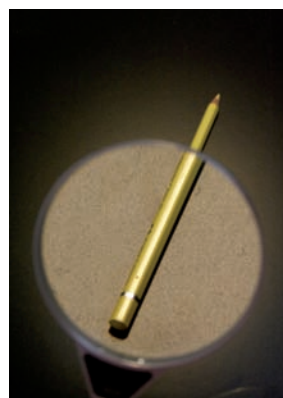


APLICACIÓN EN EL AULA



La lupa

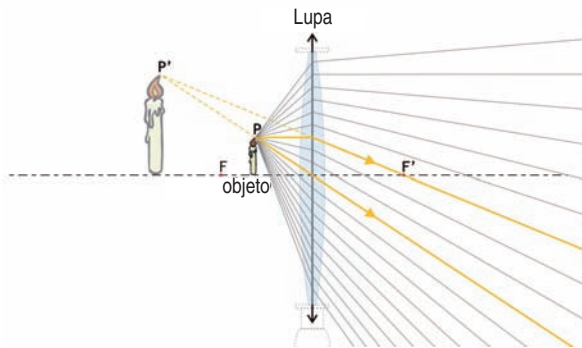
En este punto todos nuestros alumnos deberán experimentar el poder de la lente convexa utilizada como lupa.



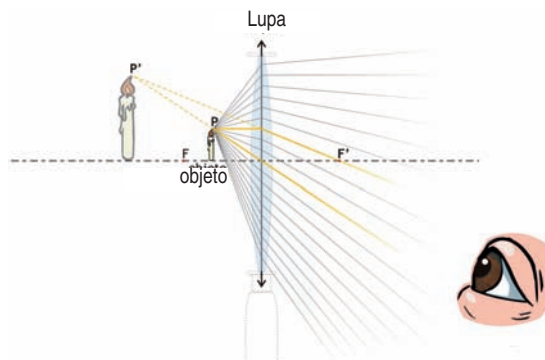
Funcionamiento de la lupa

Para emplear una lente de manera que funcione como lupa deberemos situar el objeto entre el foco F y la lente, de manera que los rayos sigan los caminos indicados en el esquema siguiente:





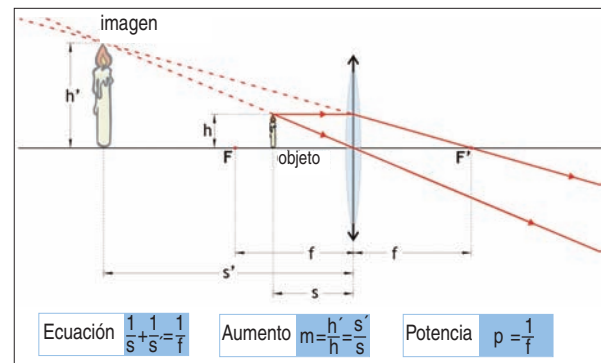
Cuando miramos un objeto a través de una lupa vemos una imagen nítida. Esto quiere decir que todos los rayos que emergen del instrumento lo hacen de forma organizada, de tal manera que los que provienen de un determinado punto del objeto forman el punto correspondiente de la imagen. Por ello no es necesario, como hemos visto antes, dibujar todos los rayos que salen de cada punto del objeto, sino los rayos relevantes de los puntos necesarios para determinar la posición y tamaño de la imagen. En este caso, como en el anterior, el elemento más representativo es el punto superior del objeto, P. Si trazamos desde este punto un rayo paralelo al eje óptico, sabemos que saldrá de la lente siguiendo la dirección del foco F' . Podemos trazar otro rayo que pase por el centro óptico de la lente, que emergerá por el lado opuesto sin desviarse.



Si el observador se sitúa en el lado contrario al objeto, estos dos rayos y todos los que emergen de la lente que provienen del objeto llegarán a nuestro ojo de tal manera que parecerá que provienen de un punto situa-

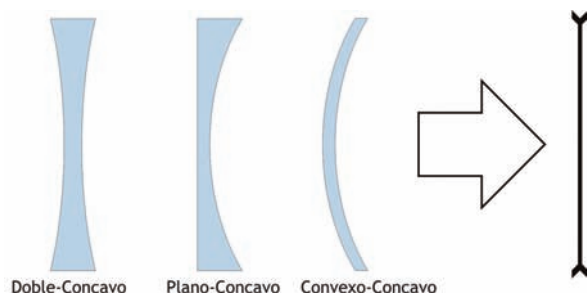
do en P' , aunque no sea cierto. Pero el ojo forma las imágenes en el punto del que parecen partir los rayos. A este tipo de imágenes, que pueden ser percibidas por los ojos pero que no se pueden proyectar, sabemos que se las llama imágenes *virtuales*. Así pues, la lupa forma imágenes invertidas, de mayor tamaño y *virtuales*, por lo que es útil como ayuda en la visión de objetos pequeños.

Como en el caso anterior, una vez que conocemos el recorrido de los rayos es fácil realizar cálculos. En la figura siguiente se indica la forma en la que se determina el aumento de la lupa, en función de la posición del objeto y de la potencia de la lente.



3. 7. Imágenes en las lentes divergentes

Como veremos más adelante, para entender la forma en la que se corrigen algunos defectos del ojo debemos estudiar otro tipo de lentes, llamadas *divergentes*. Estas lentes pueden construirse de varias formas, como las representadas en la figura, pero todas se caracterizan por ser más delgadas en el centro que en los extremos. Como en el caso de las lentes convergentes, se suele emplear un símbolo especial para referirse a ellas en la aproximación de lentes delgadas, consistente en un segmento rectilíneo terminado en dos ángulos contrarios a los del símbolo de la lente convergente, como indica la figura.



En las construcciones de rayos, como hemos dicho antes, siempre supondremos que la luz procede de la izquierda de la lente, donde se encuentra el foco F , incide sobre la lente y emerge por la cara de la derecha, en la región donde se encuentra el foco F' .

APLICACIÓN EN EL AULA



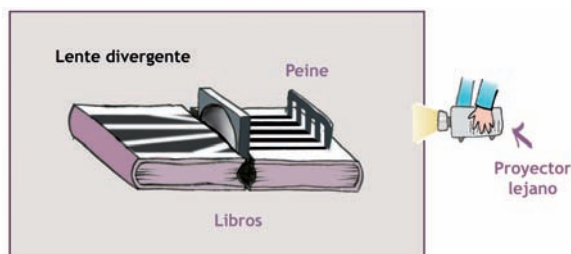
El comportamiento de los rayos de luz en las lentes divergentes es un poco más complicado que el de las convergentes, como veremos a continuación. Lo primero que se ve, al estudiar con un láser el recorrido de los rayos, es que éstos divergen cuando son refractados por la lente.

Se puede utilizar el puntero láser o un montaje semejante al de la figura, realizado con dos libros y una lente divergente, que se puede comprar en cualquier tienda de óptica de las que venden gafas para corregir defectos de visión, o un cristal desechado.

Comencemos por trazar una recta en el papel blanco, que tiene que coincidir con el eje óptico de la lente.



En las aplicaciones al aula de los más pequeños podemos emplear, como en el caso anterior, un proyector de diapositivas enfocado al infinito y un peine, lo que produce resultados suficientemente buenos para ilustrar el proceso.

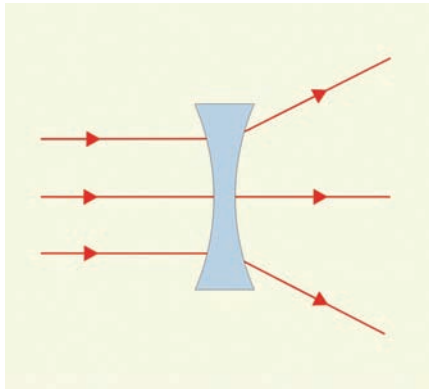


Formación de imágenes

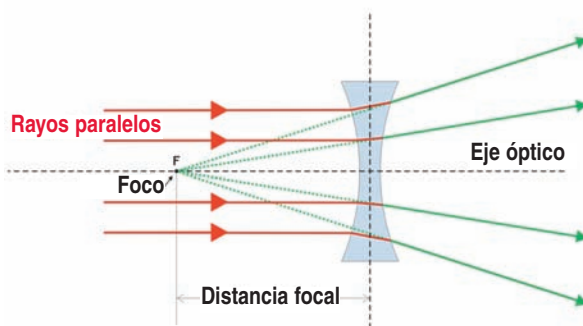
La primera operación que deberemos realizar será ajustar la posición de la lente de manera que su eje óptico coincida con la línea recta que hemos trazado, lo que se consigue fácilmente con la ayuda del puntero láser y moviendo la lente hasta conseguir que el rayo siga la recta en todo momento. Después, situaremos el



puntero en diversas posiciones, como en el caso de las lentes convergentes, y comprobaremos que *los rayos que inciden sobre la lente paralelos al eje óptico divergen y se separan de dicho eje al atravesar la lente*.

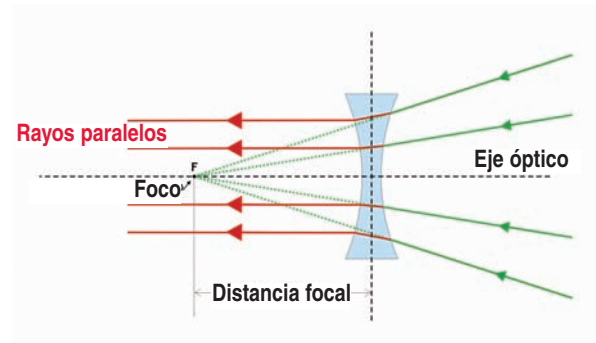


Como es lógico, debemos ser un poco más precisos al describir el comportamiento de los rayos de luz. Con un poco de paciencia y habilidad, se dibujan en el papel los caminos que siguen los rayos tras atravesar la lente, se comprueba que los rayos divergen *de tal manera que sus prolongaciones pasan por el foco F* . Ésta es la primera regla para describir el comportamiento de las lentes divergentes.

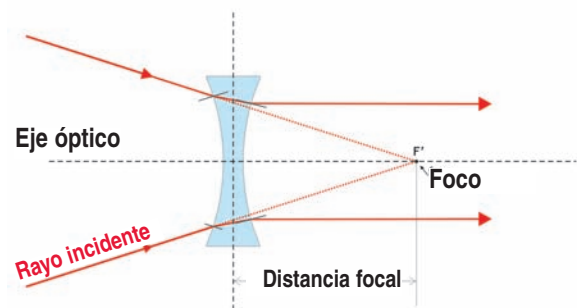


La segunda regla que rige la formación de imágenes en las lentes divergentes se puede intuir sin más que invertir la marcha de los rayos en la figura anterior, operación que siempre da resultados correctos, pues la luz

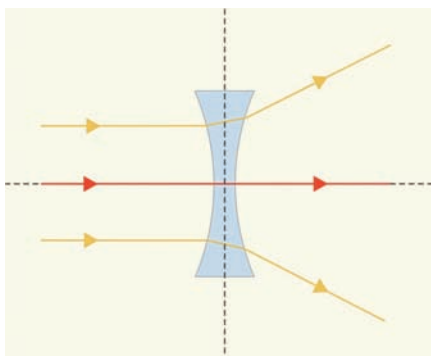
sigue en estos casos caminos reversibles. Para dramatizar este hecho hemos representado en la figura siguiente una imagen simétrica de la anterior, que describe perfectamente el comportamiento simétrico de las lentes delgadas.



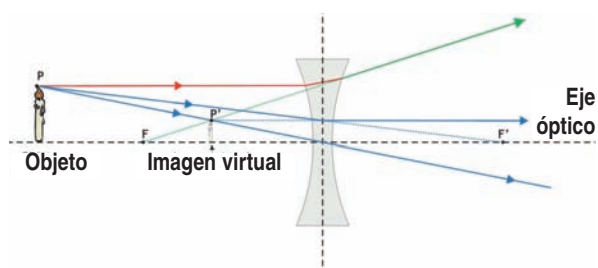
Para comprobar que este resultado es correcto deberemos realizar los experimentos correspondientes, utilizando el puntero láser y el montaje descrito. Veremos que, como es lógico, se cumple nuestra idea, que podemos formular diciendo que *todo rayo que incide sobre la lente, si se prolonga y pasa por un foco F' , se desvía de tal manera que sale por la otra cara de la lente, paralelo al eje óptico, tal como muestra la figura*.



Se cumple, además, una tercera regla referente a los rayos que atraviesan la lente por su eje óptico, que lo hacen sin sufrir desviación.



A partir de estas tres reglas es fácil construir la imagen que corresponde a un objeto situado entre el foco F y el infinito. Para ello trazamos un rayo paralelo al eje óptico que parta del punto relevante P , como en los demás casos. Este rayo se refracta en la lente y emerge separándose del eje óptico, de tal manera que su dirección es la misma que si se hubiese originado en el foco F . Trazamos a continuación un nuevo rayo en la dirección del foco F' que, al llegar a la lente, se refracta y sale paralelo al eje óptico. Situamos el punto P' en el punto en que ambos se crucen. Si trazamos un tercer rayo que pase por el eje óptico, que ya sabemos que no sufre desviación, veremos que se cruza con los otros dos en el mismo punto P' .



Como en el caso anterior, el ojo, cuando capta estos rayos emergentes, forma la imagen en el lugar del que parecen provenir los rayos, es decir, en el punto P' . Y la imagen es virtual, ya que no puede ser proyectada porque los rayos reales no pasan por ese punto.

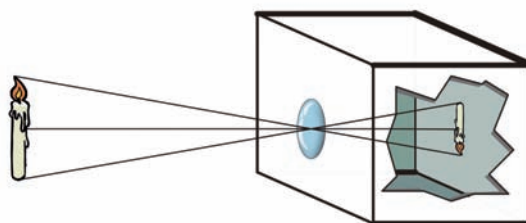
Así, vemos que una lente divergente forma imágenes de los objetos más alejados del foco. Estas imágenes son virtuales, derechas y de menor tamaño.

3. 8. La cámara oscura mejorada: la cámara fotográfica

APLICACIÓN EN EL AULA



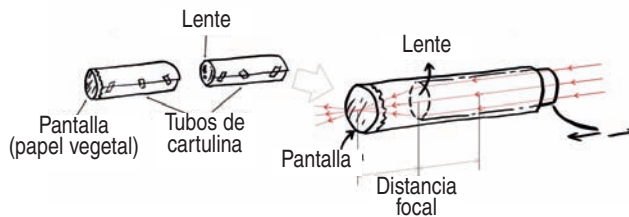
Una vez conocido el mecanismo de formación de imágenes por las lentes convergentes, podemos mejorar nuestra cámara oscura al sustituir la cartulina perforada por una lente (a la que llamaremos *objetivo*), como indica la figura.



Construir una cámara oscura de lente convergente requiere un poco de meditación previa. Como hemos visto en el apartado anterior, la imagen de un objeto que se encuentre muy alejado (en el infinito) se forma exactamente en el foco F' de la lente. Y si acercamos el objeto a la lente, la imagen se forma a una distancia mayor que la distancia focal. Este hecho marca una gran diferencia con la cámara oscura de perforación, en la que la distancia de ésta a la pantalla no tenía ninguna importancia.



El hecho de que la distancia de la imagen a la lente varíe al acercar o alejar el objeto nos obliga a montar el objetivo sobre un soporte que se pueda deslizar a lo largo del eje óptico del sistema, de manera que nos permita ajustar la distancia de la lente a la pantalla para obtener una imagen enfocada. Para ello se pueden emplear dos tubos de cartulina, uno fijo y otro que se deslice en su interior y sobre el que se monta la lente, como indica la figura, de tal modo que la distancia lente pantalla varíe entre un mínimo equivalente a la distancia focal y un máximo de aproximadamente el doble.



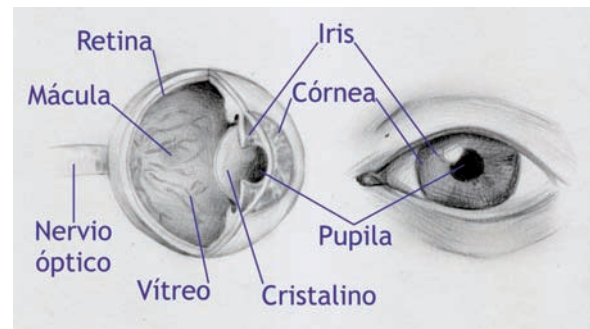
Sin duda, esta disposición de elementos recuerda la construcción de una cámara fotográfica elemental de las que se pueden ver en los museos, semejantes a lo que hemos representado en la figura y cuyo funcionamiento debe ser fácilmente comprensible para nuestros alumnos. La cámara fotográfica funcionaba exactamente igual que la que hemos construido. Una vez conseguida una imagen de buena definición, al ajustar la distancia de la lente a la pantalla de vidrio deslustrado, se cerraba el objetivo y se sustituía dicha pantalla por una emulsión fotográfica que se iluminaba durante unos segundos, al abrirse el objetivo durante ese tiempo. Se obtenía así el negativo que se llevaba al laboratorio para su revelado.



3. 9. Modelo de ojo humano

Una vez comprendido el funcionamiento de la cámara fotográfica, podemos mostrar a nuestros alumnos un diagrama del ojo de los mamíferos, ahora comprensible para ellos.

La parte óptica del ojo está constituida por la *cornea* (que es la pared transparente que forma la primera capa del ojo), una cavidad que contiene el *humor acuoso* y una lente de potencia variable que se denomina *cristalino*. Detrás está situada la pantalla sensible a la luz, donde se forma la imagen, que se llama *retina*. La cámara que separa el cristalino de la retina está ocupada por el *humor vítreo*, que da consistencia al ojo y mantiene la retina unida a la parte posterior del mismo. Además, la cantidad de luz que penetra en el ojo se regula por medio de un orificio de diámetro variable que forma la *pupila*.



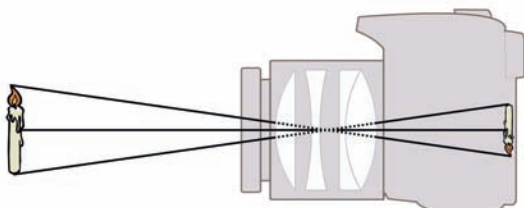
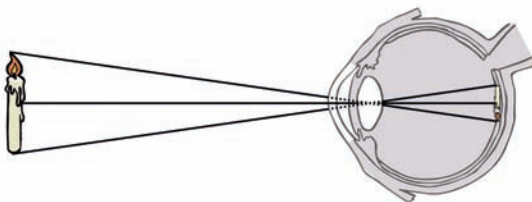
Es muy fácil explicar la formación de imágenes en el ojo. La diferencia más importante con la cámara reside en la naturaleza de la lente que hace funciones de objetivo: en tanto que en la cámara fotográfica la potencia de la lente es fija y su montura desplazable, en el ojo el foco es variable, con lo cual no es necesario desplazar la lente para enfocar objetos situados a distancias diferentes del observador.

La misma similitud se da entre cámara y ojo en cuanto a la apertura de la lente. De la misma manera que las

cámaras automáticas ajustan el diámetro del diafragma para admitir la cantidad de luz apropiada para impresionar la película, en el ojo se varía la dimensión de la pupila de manera que llegue a la retina solamente la cantidad de luz necesaria. Esta regulación no es voluntaria, como se puede comprobar iluminando directamente el ojo de un compañero con la luz de una linterna muy poco potente, como indica la figura. Es curioso que no sólo cambia el tamaño de la pupila iluminada, sino que lo hacen las dos a la vez.

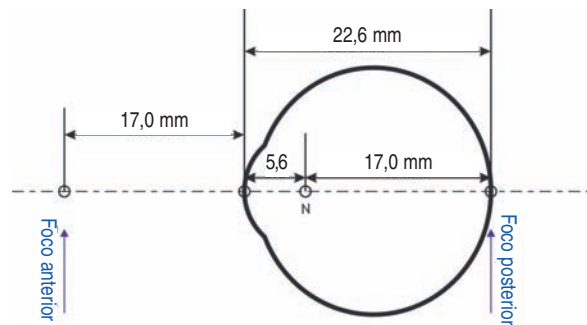


Llegados a este punto, debe quedar claro para nuestros alumnos el funcionamiento tanto del ojo como de la cámara fotográfica, sus similitudes y sus diferencias, como se observan en la figura.



El ojo como sistema óptico

La *potencia óptica* del ojo depende básicamente de tres componentes: *curvatura de la cornea* (que nosotros consideramos como curvatura de la cámara de humor acuoso), *longitud de la cámara de humor acuoso* y *potencia del cristalino* (único elemento variable del sistema). La potencia resultante debe estar en consonancia con la *distancia del centro óptico del sistema a la retina*, (que supondremos 22,6 milímetros). Esta simplificación del ojo real se llama ojo reducido y se muestra en la figura.



Para ver un objeto nítidamente, el sistema óptico del ojo debe formar una imagen del objeto exactamente sobre la retina y suprimir además la aberración cromática. Para ello, el ojo debe contener un sistema equivalente a una lente convergente de unas 45 dioptrías cuya potencia P es:

$$P = 1/22,6 \text{ mm.} = 1/0.0226 \text{ m} = 44.25 \text{ dioptrías.}$$

3. 10. Defectos ópticos del ojo

Los elementos más importantes que influyen en los defectos ópticos del ojo son: la *curvatura de la cornea* y la *potencia*, la *variabilidad* y la *transparencia del cristalino*.



La *curvatura de la cornea* es el elemento responsable de la parte más importante de la potencia óptica del ojo, correspondiéndole +43 dioptrías, pero presenta una geometría fija y por lo tanto no puede utilizarse para enfocar sobre la retina objetos que se encuentran a diferentes distancias.

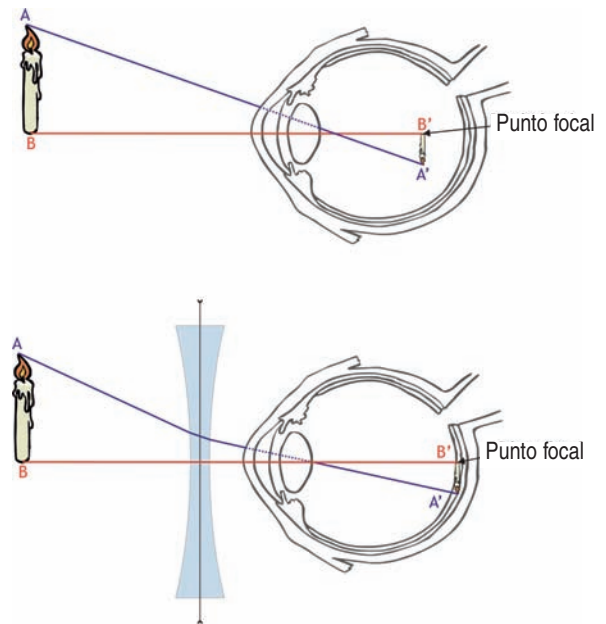
El *cristalino* constituye la segunda lente del ojo. Tiene sus dos caras convexas (por esto es convergente) y una potencia de unas +19 dioptrías. Si estuviese en el aire tendría casi el doble, pero al estar sumergido en líquidos (*humor acuoso* y *humor vítreo*) su potencia disminuye. Su importancia radica en que es el único elemento cuya distancia focal puede modificarse, por lo que es imprescindible para enfocar a diferentes distancias. La distancia focal de todo el sistema debe ser muy próxima a los 22,6 milímetros en nuestro modelo de ojo reducido.

A veces la potencia total, es decir, su distancia focal, no está en consonancia con la longitud del ojo y el sistema óptico no puede funcionar correctamente. Como un ejercicio útil para comprender el ojo como instrumento óptico, citaremos sus defectos más comunes.

Miopía

Se dice que un ojo es miope cuando la potencia del cristalino es excesiva para su longitud. En ese caso, la imagen se forma entre el cristalino y el fondo del ojo y, como consecuencia, en la retina aparece desenfocada. En consecuencia, el ojo sólo puede ver correctamente los objetos situados muy cerca del cristalino; por esta razón suele decirse que la persona que padece este defecto es “corta de vista”.

La solución consiste en situar delante del ojo una lente divergente, de manera que los rayos de luz que provengan de objetos situados en el infinito diverjan como si correspondiesen a objetos situados más cerca, en el rango de distancia en que el ojo miope puede enfocar.

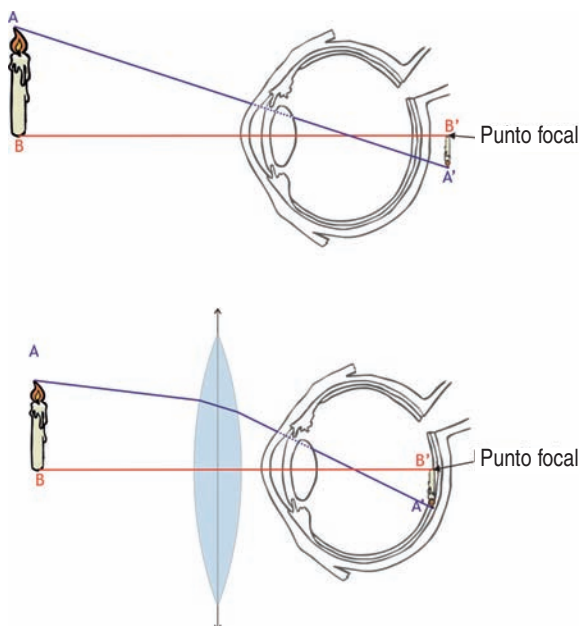


Hipermetropía

Cuando ocurre el defecto contrario, es decir, una potencia del cristalino demasiado baja, se dice que el ojo padece *hipermetropía*. La imagen de los objetos situados cerca se forma detrás de la retina, con lo cual el paciente la percibe desenfocada.

La solución a este problema se consigue interponiendo en el camino de la luz una lente convergente, como indica el esquema.

Las lentes correctivas se pueden montar en anteojos o situar en contacto con la córnea, como las lentillas. También se puede modificar la geometría de la cornea de manera que aumente o disminuya la potencia óptica del ojo por medio de cirugía, que se realiza normalmente utilizando un láser (LASIK).

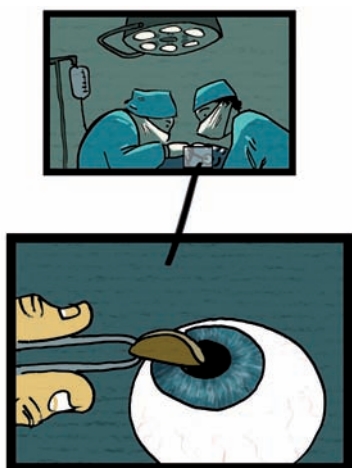


3. 11. La retina

Pasemos a describir brevemente la pantalla sobre la que se proyectan las imágenes, la retina. Ésta contiene una zona central, cercana al nervio óptico, llamada *fóvea* o *mácula lútea*, de gran agudeza visual y especialmente diseñada para ver los detalles finos, rodeada de una *zona periférica* de baja agudeza visual. La retina contiene células de varios tipos, capaces de detectar algunos colores, pero este punto lo trataremos más adelante.

Catarata

El último defecto del ojo que vamos a considerar se debe a la pérdida de transparencia del cristalino y recibe el nombre de *catarata*. Produce visión borrosa debido a la falta de luz y se corrige sustituyendo el cristalino por una lente transparente de potencia semejante. El mayor inconveniente es que la lente artificial no tiene la capacidad de acomodación propia del cristalino, por lo que el paciente necesita utilizar lentes correctoras diferentes para cada distancia de visión.



Capítulo

4

EL ENIGMA DE LOS
COLORES



4.1. La óptica en la época de Isaac Newton, Thomas Young y James Clerk Maxwell

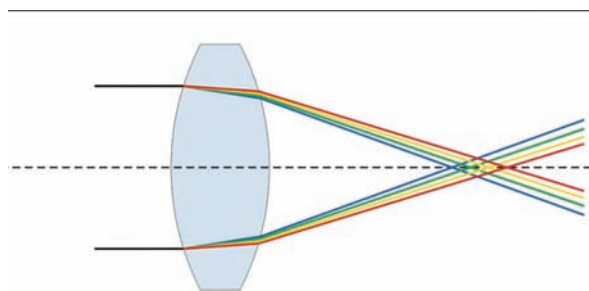
En este capítulo, dedicado a los colores, estudiaremos parte de la obra de Newton, nos encontraremos con Young (con su modelo simplificado de tres colores), y con la misteriosa fotografía en color, la primera realizada, que presentó Maxwell en 1861 en la Royal Institution. Recorreremos de una forma rápida el camino que comienza en el oscuro laboratorio de Newton en el Trinity College, a finales del siglo XVII, y que acaba, por el momento, en los monitores de ordenador, las pantallas de televisión, los cañones de vídeo y en los CCD de las cámaras digitales, presentes incluso en los teléfonos móviles que todos llevamos con nosotros. También entenderemos cómo el ojo humano percibe los colores.

4.2. El *experimentum crucis* de Newton

En 1673, Newton empieza a estudiar los colores. Pero antes de abordar este importante tema, conviene describir brevemente la revolución científica que acababa de producirse.

La nueva concepción del universo, con el Sol en el centro, había sido publicada en 1543 por un canónigo y astrónomo polaco llamado Nicolás Copérnico, bajo el título *De Revolutionibus Orbium Celestium* (*Sobre las revoluciones de los cuerpos celestes*). Lo acertado del modelo de Copérnico se había comprobado gracias a las observaciones realizadas por Galileo cuando empleó un instrumento nuevo: su telescopio. Así se descubrió que el Sol presentaba manchas fijas en su superficie por las que se podía verificar que giraba sobre su eje, que Júpiter tenía satélites, que Venus presentaba fases y la Luna tenía montañas. El nuevo modelo del universo conocido produjo un cambio tan profundo que la palabra *revolución*, que aparece en el título de la obra de Copérnico, ha quedado en todos los idiomas como indicación de una transformación importante en cualquier campo de la actividad humana.

Pero aquellos telescopios no permitían muchos aumentos, aparecían imágenes fantasmas de diferentes colores, imposibles de enfocar en el mismo plano. Es un fenómeno que se denomina la *aberración cromática* y se debe a que el mismo vidrio presenta índices de refracción diferentes para cada color de la luz. Por ello, los focos correspondientes se encuentran en puntos distintos y se forman imágenes en planos también distintos.



Además, la ciencia estrenaba lenguaje. Un lenguaje nuevo de extraordinarias posibilidades: el matemático. El mismo Galileo lo describió en su contestación a otro astrónomo:

“Farsi pensa que la ciencia es semejante a los libros de ficción, escritos por algún autor, como La Ilíada. Pero las cosas no son así. La ciencia está escrita en ese gran libro del universo, continuamente abierto ante nosotros para que lo observemos. Pero el libro no puede comprenderse sin que antes aprendamos el lenguaje en el que está compuesto. Está escrito en el lenguaje de las matemáticas y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible entender una sola de sus palabras. Sin ese lenguaje, navegamos en un oscuro laberinto”.

Galileo murió en 1642 en Florencia, cuando en España Velázquez era pintor de Felipe IV. En ese mismo año (aunque de un calendario diferente), en un pueblo del condado de Oxford nació Isaac Newton, llamado a terminar el trabajo comenzado por Galileo en la mecánica.



Su primer interés fue el estudio del universo, para lo que se necesitaban buenos telescopios. Pero las lentes, como hemos dicho, producían aberraciones cromáticas que limitaban su uso. En realidad, en aquella época los científicos pensaban que la luz blanca era pura y que cualquier vidrio la teñía, corrompía su pureza...

Este problema interesó a Newton por lo que decidió estudiar el fenómeno que se producía cuando un rayo de Sol atravesaba un adorno de los que pendían de una lámpara de cristal de roca. Es el fenómeno de la *descomposición de colores*, que viene maravillando a niños y adultos de todos los tiempos. Lo hemos elegido porque es uno de los temas más utilizados en todas las aulas del mundo, por la fascinación que el color siempre ha ejercido en los niños.



Además, constituye el ejemplo más conocido de preconcepto histórico que todavía perdura entre nosotros. Consiste en confundir los *colores luz* (los de la televisión o el cine) con los *colores pigmento* (los que utilizan las impresoras de colores) y nos da ocasión a deconstruirlo.

Newton realizó esta investigación en Inglaterra en la ciudad de Cambridge, edificada en torno a un puente sobre el río Cam, más exactamente en el Trinity College.



Cuando Newton inició su investigación, que nosotros vamos a reproducir, existía la creencia de que el blanco era un color, como el rojo o el verde. Y se seguía el modelo de Descartes, admitido por Hooke, que suponía que los colores estaban formados por una mezcla de luz y oscuridad.

Hooke era uno de los proponentes de esta teoría del color, y en su modelo la escala de color iba desde el rojo brillante, que era luz casi pura con la mínima adición de oscuridad, al azul, el último paso antes del negro, que era la extinción completa de la luz por la oscuridad.

Para comprobar el modelo de Hooke, que se puede resumir por la ecuación:

Color = luz + oscuridad

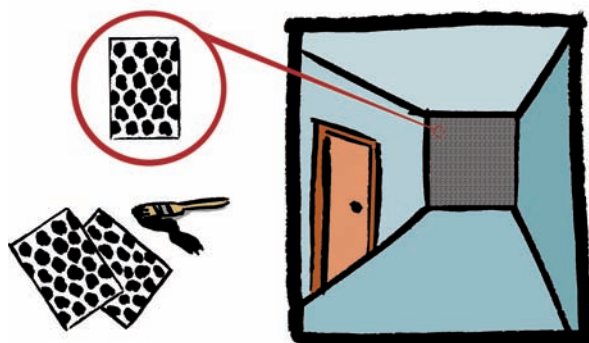
Newton realizó varios experimentos que se pueden llevar a cabo en el aula.

APLICACIÓN EN EL AULA



Tomó varias hojas de papel blanco y dibujó en ellas numerosas manchas negras de formas irregulares y de muy pequeño tamaño, distribuidas uniformemente. Después las fijó a una pared y se fue alejando, de manera que con la distancia se fundieran las partes blancas y negras (luz y oscuridad) de los folios hasta el punto de que produjeran una sola imagen. Eran una especie de tablero de ajedrez con cuadros blancos y negros. Si la hipótesis de Descartes, Hooke y Boyle era cierta, al alejarse se verían los papeles de diferentes colores, dependiendo del número de manchas que hubiese dibujado por unidad de superficie.

Pero no ocurrió así... A suficiente distancia los papeles aparecían todos grises.



No había duda: el modelo de Descartes era falso. Por esa razón Newton, como nosotros con nuestros alumnos, no tuvo más remedio que investigar él mismo la naturaleza de los colores realizando otro experimento crucial, que describimos a continuación.

4. 3. El experimento del prisma

Newton tenía 23 años cuando realizó el experimento que vamos a describir. En esta época existían lámparas de vidrio como las que hemos visto en los museos y palacios, y todo el mundo sabía que cuando la luz pasaba a través de sus lágrimas de vidrio emergía coloreada, como ocurría con los diamantes tallados y otras piedras utilizadas para adornarse. También existían prismas, que se empleaban como objetos curiosos por los colores que producían cuando los iluminaba el Sol.

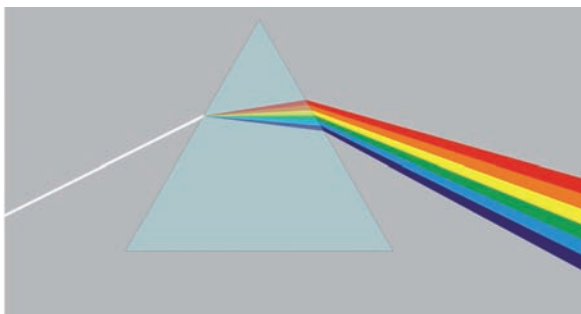
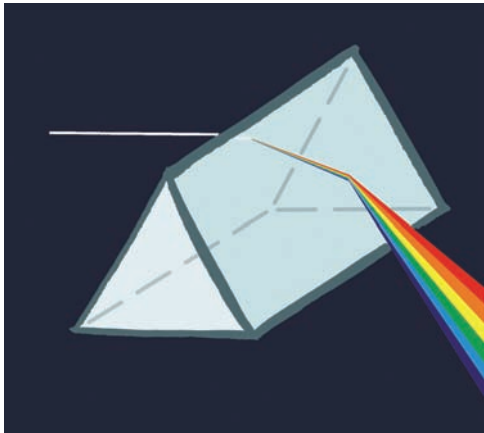
Newton se acercó a Oxford un día de feria y compró algunos prismas de grandes dimensiones. Como él mismo describe en su *Óptica*, publicada en 1704:

“[...] en el año 1665 compré varios prismas de vidrio para experimentar con ellos los fenómenos de los colores”.



Una vez en su aposento realizó un experimento que podemos repetir en el aula. Cerró la cortina de su habitación, recortó en la cortina negra, que cubría la ventana, una rendija que dejase penetrar un rayo de Sol de la mañana y lo dirigió al vértice de uno de sus prismas. Ante sus ojos se produjo el fenómeno de la *dispersión de la luz blanca* que produce un *espectro* de diversos colores.

El rayo de Sol se veía perfectamente al reflejarse, a lo largo de toda su trayectoria, en las pequeñas partículas de polvo que llenaban la habitación.



Para estar seguro de que el prisma no coloreaba la luz, colocó el segundo prisma sobre cada uno de los colores del espectro producido por el primer prisma y observó que los colores ni se deformaban ni se dispersaban.

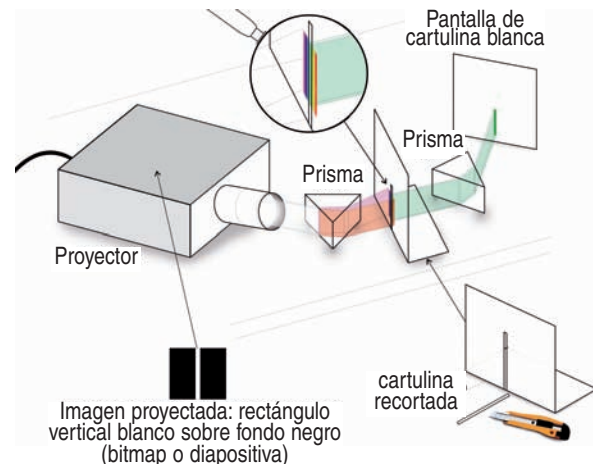
El prisma no producía los colores. La luz que incidía en el prisma con un color determinado emergía con ese mismo color. Los colores del espectro eran colores puros. Cada rayo de luz de un color determinado sale del prisma exactamente del mismo color.

“Los experimentos son una de las maravillas de la ciencia: son reproducciones de un fenómeno natural que podemos llevar a cabo en el laboratorio o en el aula tantas veces como queramos”.

APLICACIÓN EN EL AULA



Nosotros podemos repetir este experimento utilizando un proyector de diapositivas que reproduzca la rendija de luz del Sol según se indica en la siguiente ilustración.

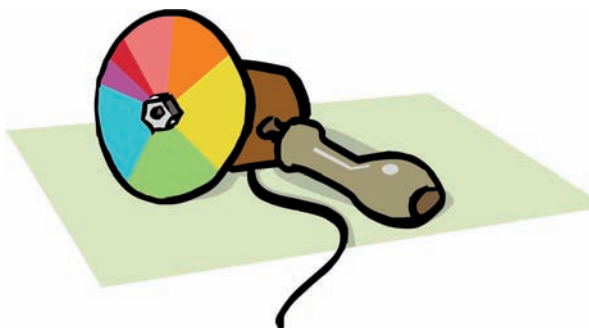


Si aislamos un color, por ejemplo el verde, y se deja que pase por una ranura hecha en una tarjeta de visita y que incida sobre un segundo prisma, podemos comprobar que a la salida del mismo sólo se observa el color verde que ha entrado.



La rueda de Newton

Para demostrar que la *luz blanca no era pura, sino muy al contrario* una mezcla de todos los colores visibles, fabricó una rueda, como la de la figura, donde dibujó los colores del arco iris. Al girarla se fundían los colores en su retina y se producía la sensación de luz blanca. No había duda: la suma de los colores del espectro reproducía la luz blanca.



Conclusión

La *luz blanca no es una luz pura sino que se compone de muchos colores*. La imagen de estos colores producida por un prisma se llama *espectro de la luz*.

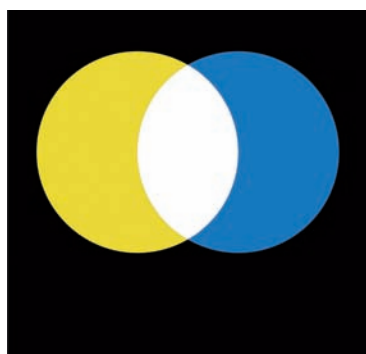
Esta nueva interpretación molestó bastante a los que creían que el blanco simbolizaba la pureza, porque era justamente lo contrario, significaba la mezcla. Pero Newton había demostrado que la luz blanca no sólo no es pura sino que *no existe*. *Es sólo una sensación que nos produce la adición de los colores del arco iris*. Pero este experimento no convenció a todo el mundo. Los preconceptos son muy difíciles de deconstruir, como dijo mucho más tarde Derrida.

En 1672, Newton fue elegido miembro de la Royal Society, tras haber regalado a esa institución uno de sus magníficos telescopios reflectores. Newton presentó sus resultados sobre la descomposición de colores a la Society en 1674 y ese mismo año publicó su primer artículo científico sobre la luz y el color en *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Fue su primera comunicación. Era joven (tenía 32 años) y no esperaba reacciones adversas por parte de nadie, ya que todos sus argumentos estaban apoyados sólidamente en resultados experimentales (famoso principio que él enunció diciendo *hipótesis non finjo*). Pero no fue así. Tanto Huygens como Hooke se apresuraron a atacar los resultados de la dispersión del color por un prisma.

Newton podía esperar una reacción negativa por parte de Huygens, pero no de un compañero de la Royal Society, como era Hooke. Las relaciones entre ambos se deterioraron aún más cuando, en 1675, Hooke afirmó que Newton había robado algunos de los resultados de su Óptica y que lo que era bueno en la obra de Newton no era original y lo que era original era erróneo. Como resultado de esta desagradable experiencia, nuestro investigador se encerró en sí mismo y se alejó



de la Royal Society (que asociaba con Hooke), aunque ambos habían hecho las paces con un intercambio de cartas corteses. Así, retrasó la publicación de una relación completa de sus investigaciones ópticas hasta después de la muerte de Hooke, en 1703. Su *Óptica*, como hemos dicho, apareció en 1704.



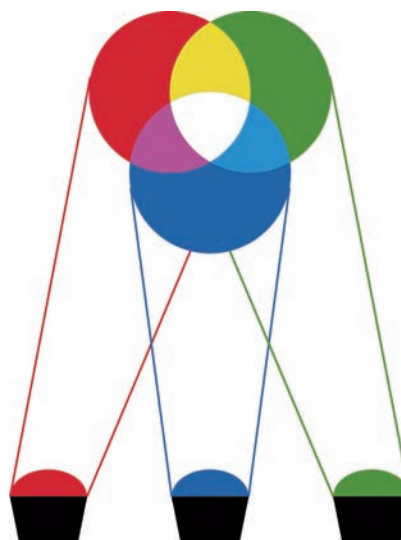
Lo que Hooke y Huygens aportaron como prueba de la inexactitud de los resultados de Newton era también un resultado experimental: la suma de la luz amarilla con la luz azul producía luz blanca, lo que evidenciaba que el blanco no es la suma de todos los colores del espectro.

Este experimento es fácil de reproducir en un aula de infantil sin más que utilizar dos cañones de vídeo, cada uno de los cuales proyecta una diapositiva de *power point* de estos colores. Y el resultado es realmente curioso. ¿Cómo puede ser que la luz blanca esté compuesta por todos los colores del espectro si se puede, al mismo tiempo, obtenerla sumando tan solo dos de ellos? Este enigma tardó más de cien años en resolverse, pero nosotros lo descubriremos antes de llegar al final del libro.

4. 4. La composición aditiva de los colores

Empecemos por estudiar la composición aditiva, superposición o suma de colores. Los científicos de la época estudiaron este problema, aislando cada una de las franjas del espectro de la luz blanca y dirigiéndolas a una pantalla por medio de espejos, de manera que se

pudiese estudiar el efecto de su superposición o suma. Vamos a presentar los resultados más conocidos y fáciles de obtener. Para ello utilizaremos tres proyectores de diapositivas o tres cañones de vídeo con tres colores a los que llamaremos fundamentales o primarios: *rojo*, *verde* y *azul*. La suma de estos tres colores produce blanco, un resultado obtenido por el físico inglés Young hacia 1810, mucho después de la muerte de Newton, Hooke y Huygens. Queremos señalar que la importancia de este resultado reside en que hasta entonces era necesario sumar todos los colores del espectro para conseguir el blanco, en tanto que Young lo conseguía



con sólo tres colores puros. ¿Cuál es el misterio?

Lo primero que se nos ocurre es componer los colores *primarios* de dos en dos. Así obtenemos nuevos colores que, como se forman a partir de los primarios, se llaman *secundarios*.

Vamos a seguir los consejos de Galileo y escribir estos resultados con la ayuda de las matemáticas. Las ecuaciones correspondientes a estas composiciones son:

- Rojo + Verde = Amarillo.



- Rojo + Azul = Magenta.



- Verde + Azul = Cian



Rescapitulando:

1. Los colores fundamentales o primarios son el rojo, el verde y el azul, cuya suma produce el blanco.
2. Los colores secundarios son lo que se obtienen sumando dos fundamentales.



3. Se llaman *colores complementarios* los que se obtienen componiendo un primario y un secundario, y producen el blanco.



Como recordaremos, Hooke y Huygens dijeron a Newton que existían parejas de colores que al sumarse producían al blanco. Ahora sabemos que se referían a las parejas de complementarios (un primario y un secundario).

Para entender estas relaciones escribamos las ecuaciones correspondientes a las parejas complementarias.

- 1ª Ecuación de Hooke:
 - **Amarillo + Azul = Blanco**
 - Si sustituimos el **Amarillo** por **Rojo + Verde** se obtiene la ecuación de Young:

$$\text{Rojo} + \text{Verde} + \text{Azul} = \text{Blanco}$$

- 2ª Ecuación de Hooke:
 - **Magenta + Verde = Blanco**
 - Si sustituimos el **Magenta** por **Rojo + Azul** obtenemos también la ecuación de Young:

$$\text{Rojo} + \text{Azul} + \text{Verde} = \text{Blanco}$$

Finalmente, si utilizamos la 3ª ecuación de Hooke:

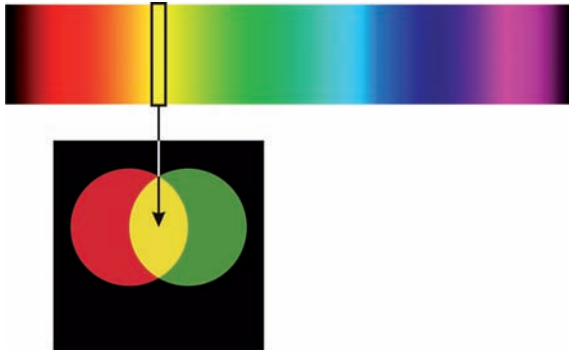
- **Cian + Rojo = Blanco**
- Si sustituimos el **Cian** por **Verde + Azul** volvemos a obtener la misma ecuación de Young:

$$\text{Verde} + \text{Azul} + \text{Rojo} = \text{Blanco}$$

La ecuación final en los tres casos es la ecuación de Young: *el blanco es la suma de los tres colores fundamentales.*



Pero esto no resolvía el problema planteado por Hooke y Huygens: la equivalencia del amarillo de Newton (puro) con el amarillo formado por el rojo y el verde, ambos amarillos indistinguibles para nuestro ojo. Había que seguir investigando.



4. 5. El modelo de Young

Más de cien años después de la comparecencia de Newton ante la Royal Society, Young inventó un modelo que podía explicar la extraña álgebra de los colores. Pero para ello tuvo que reinterpretar el experimento de una manera diferente que a continuación explicamos.

En pocas ocasiones se percibe tan claramente la necesidad de cambiar un preconcepto existente como en el caso de la visión de colores por el ser humano. En este caso se trataba de la creencia de que el color que el ojo ve corresponde a las características objetivas de la luz que realmente entra en él (la longitud de onda del modelo de Huygens o el color del corpúsculo de Newton, que ahora llamamos fotón). Y, al menos en el caso de los colores, esto no es cierto. Vemos colores diferentes a los de la radiación que entra en el ojo, compuesta por fotones de distintas frecuencias, es decir, de distintos colores. Es el fundamento de la moderna tecnología de la fotografía en color, la televisión, los monitores de los ordenadores y la fotografía digital. Un fotón rojo y un fotón verde que entran simultáneamente producen una sensación igual que la producida por un

fotón amarillo. Y eso es lo que reflejan las ecuaciones que hemos presentado.

El concepto nuevo que Young introduce es el de sensación fisiológica del color, que es distinta del color real de los rayos (u ondas o partículas) que entran en el ojo.

Simplemente con este nuevo concepto de sensación fisiológica de color, la interpretación de la composición de los colores es nueva y diferente: los colores del espectro que salen del prisma de Newton son colores puros, como se demuestra con el segundo prisma.

Cuando los siete colores penetran simultáneamente en nuestro ojo producen la sensación del blanco.

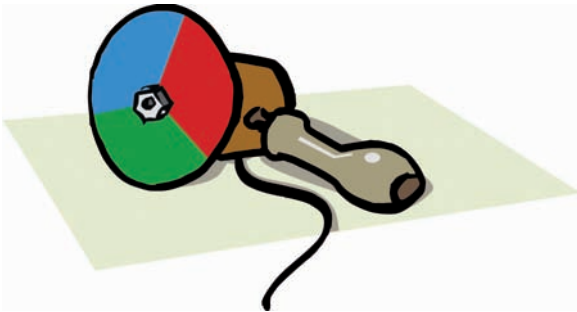
Pero una luz de color rojo que se ve simultáneamente a una luz de color azul produce la misma sensación que la luz magenta pura del espectro. Es lo que ocurre en la composición de los colores producidos por los cañones de un vídeo. Y una luz de color verde que se ve simultáneamente a una luz de color azul produce la misma sensación que la luz cian pura del espectro. Y una luz de color rojo que se ve simultáneamente a una luz de color verde produce la misma sensación que la luz amarilla pura del espectro.

Esto constituye un enigma que debemos esclarecer.

APLICACIÓN EN EL AULA



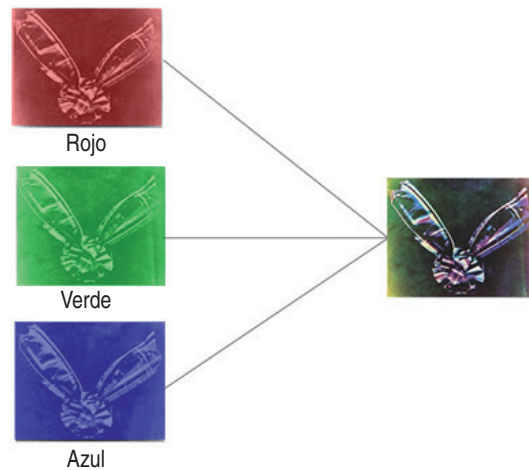
A la luz de esta interpretación podemos construir una rueda de Newton, pero con tan sólo tres colores, rojo, verde y azul, que al girar producirán la sensación de luz blanca. La rueda de los tres colores cobra un sentido nuevo.



4. 6. El experimento de Maxwell

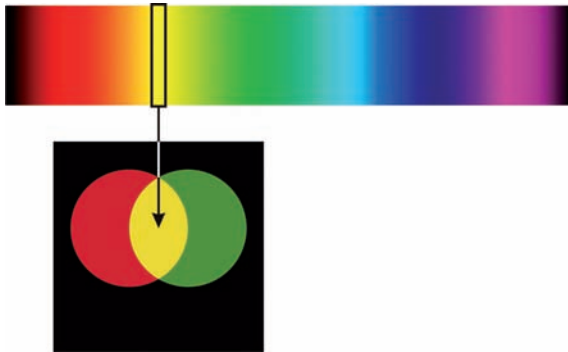


Como ya sabemos, hacia 1810 Young demostró que los tres colores rojo, azul y verde bastaban para obtener todos los demás colores que el ojo humano es capaz de percibir. Esta idea llevó a Maxwell a la sospecha (hoy confirmada) de que el ojo solamente es sensible a tres colores y que todos los matices que podemos distinguir resultan de la mezcla de esos tres colores. También concluyó que era posible realizar una foto en color si se fotografiaba una misma escena tres veces a través de tres filtros de colores distintos (como en las fotos del ejemplo), para después proyectarlas sobre la misma pantalla. El experimento fue un éxito y en 1861 Maxwell mostró la primera fotografía en color de la historia: un tejido de falda escocesa.

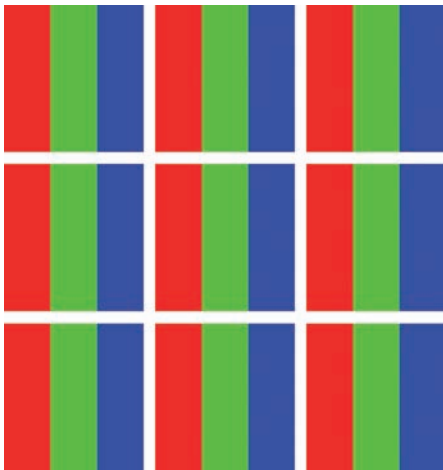


Como consecuencia, quedó claro que no todos los colores tienen que ser puros. Se puede producir un amarillo igual al del arco iris al mezclar el rojo y el verde, por ejemplo. Pero el amarillo del espectro es un color puro y *el que se obtiene mezclando los dos colores primarios no es amarillo, aunque nos produce la misma sensación que el amarillo puro*. Sin embargo, nosotros no podemos distinguirlos con nuestros ojos. Por lo tanto, se pensó en utilizar esta propiedad para engañar al ojo construyendo monitores y proyectores que sólo utilizan los tres colores.





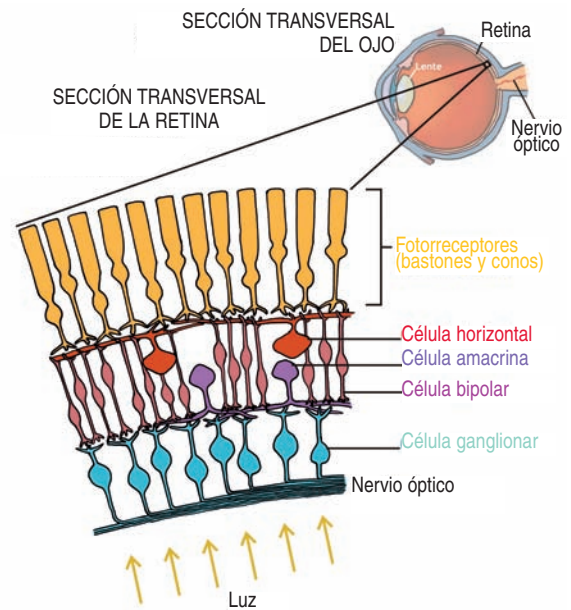
Tanto en los monitores como en *los cañones de vídeo* los tres emisores de luces rojo, verde y azul se dice que forman un *pixel*. Es muy fácil observar los tres elementos de los pixeles en un monitor de ordenador con una lupa o microscopio de mano de cinco a veinte aumentos.



4. 7. Fisiología de la visión

Es importante conocer que la solución de este enigma de los colores no es de naturaleza física, sino que tiene una base puramente fisiológica, por la forma en la que se perciben los colores en la retina.

A continuación se describe brevemente la composición y funcionamiento de la retina.



Fotorreceptores. Son de dos tipos: *conos* y *bastones*.

Células horizontales.

Células bipolares.

Células amacrinas (o células de Cajal).

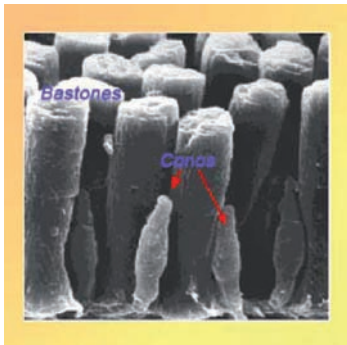
Células ganglionares. Son las terminaciones (*axones*) del nervio óptico.

Las células horizontales conectan los fotorreceptores entre sí y también con las células bipolares. Las células bipolares, finalmente conectan los fotorreceptores con las terminaciones ganglionares del nervio óptico.

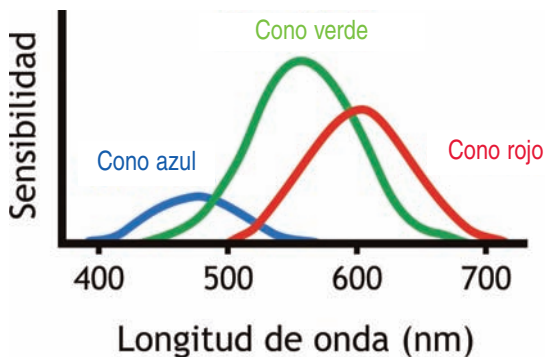
Especial mención merecen *los conos* y *bastones*. Los conos son sensibles a los colores y se activan solamente con alta intensidad luminosa, están situados en la fovea y dan lugar a la visión en color con gran agudeza. Los bastones son ciegos al color, se excitan con baja luminosidad y están situados en la zona periférica. Son responsables de la visión nocturna en color gris. Cuando se pone el Sol, por ejemplo, los conos se desactivan y la visión pasa a ser controlada por los bastones.

Observemos, para terminar, un hecho sorprendente: la retina humana, como la de muchos mamíferos, presenta un error de diseño evidente que puede verse claramente en la figura. La luz penetra por la parte del nervio óptico y tiene que atravesar varias capas antes de llegar a los fotorreceptores. Lo lógico sería al contrario, como ocurre, por ejemplo en el ojo del calamar.

En la figura siguiente puede verse más claramente que los fotorreceptores, como ya se ha dicho, están compuestos de dos tipos de células, unas en forma de bastones y otras en forma de conos.



Recordemos que los bastones son los responsables de nuestra visión en blanco y negro, tal como vemos por la noche, con poca luz. Los conos, en cambio, son los responsables del color en el ojo y pueden ser de tres tipos, según el pigmento que contengan. Unos son sensibles al rojo, otros al verde y los restantes al azul.



La figura anterior presenta tres curvas que muestran la sensibilidad de los tres tipos de conos en función de la longitud de onda. Para cada longitud de onda la ordenada de las tres curvas da la sensibilidad al correspondiente color. De esta manera el ojo compone los colores y los percibe.

Realmente sólo vemos esos tres colores, pero *¿por qué razón somos sensibles solamente a esos tres colores?* La razón está en que la superficie del Sol se encuentra a unos 5.700 K y a esa temperatura una parte importante de la energía radiada lo hace en la zona del espectro que va de 400 nanómetros (azul) a 700 nanómetros (rojo). Por esa razón, la evolución ha conducido al desarrollo de unos receptores que cubren esa área de radiación.



Capítulo

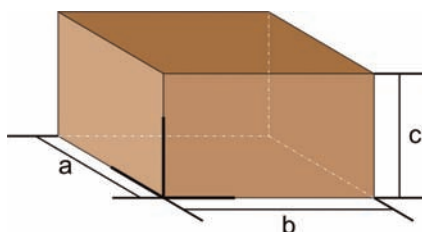
5

SIMULACIÓN DE LA
PROFUNDIDAD:
LA PERSPECTIVA
LINEAL



5.1. Codificación de la distancia

Éste es un buen momento para introducir el concepto de *dimensión*. Podemos explicar a nuestros alumnos que los objetos del mundo real ocupan un espacio que podemos definir por su altura, anchura y profundidad, es decir, tres medidas de longitud que corresponden a tres direcciones perpendiculares. Cada una de estas medidas corresponde a lo que llamamos una *dimensión*, concepto que los alumnos deben adquirir.



Pero la imagen que se forma en la retina de una escena del mundo real, como la que se forma en la cámara oscura, es plana y sólo tiene dos dimensiones, ancho y alto. Lo mismo ocurre con las fotografías o las pinturas que realizan los artistas sobre sus lienzos. Estas imágenes corresponden a una representación de las tres dimensiones sobre una superficie de dos, lo que nos deja sin la información correspondiente a la profundidad o a la distancia a la que se encuentra un objeto.

Esta información sobre la distancia a la que se encuentran las cosas es fundamental para movernos y muy importante para la supervivencia de los animales cazadores o de sus presas. Para que nuestros alumnos se den cuenta de ello, podemos explicarles otras formas de apreciar el espacio que se han desarrollado en la naturaleza como, por ejemplo, la que utilizan los murciélagos, basada en la misma técnica que el Sonar.

El murciélago emite un sonido de una frecuencia determinada y recibe las ondas reflejadas por los objetos, tanto inmóviles como en movimiento. El animal deter-

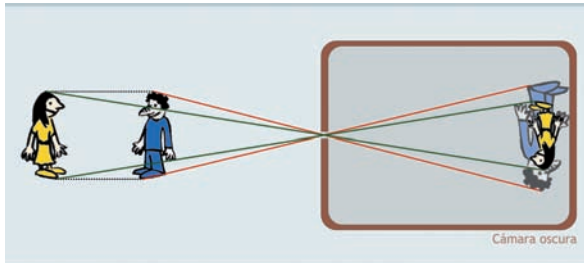
mina la distancia a partir del tiempo que tarda una onda sonora en llegar a un objeto y volver a su oído. Si la onda reflejada procede de un objeto fijo, la frecuencia del sonido que recibe nuestro murciélago es la misma que ha emitido, pero si el objeto se mueve la frecuencia cambia (por efecto Doppler), lo que proporciona así una apreciación de la distancia y de la velocidad con la que se mueven las posibles presas.



En nuestro caso, el ojo aprecia la distancia codificándola como una disminución del tamaño de la imagen, tanto más acusada cuanto más alejado se encuentre el objeto. Ese fenómeno se entiende si se representa la marcha de rayos en una cámara oscura, para dos objetos del mismo tamaño situados a distancias distintas, como se observa en el ejercicio siguiente.

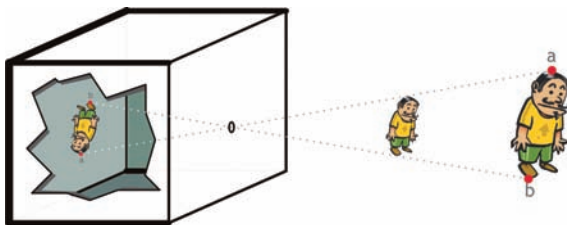
APLICACIÓN EN EL AULA





Como puede verse fácilmente, si la distancia se aumenta al doble o al triple, el tamaño se reduce a la mitad o a la tercera parte. Esta relación entre distancia y tamaño de la imagen se dice que es *una relación lineal*, que el cerebro utiliza para llevar a cabo una apreciación de la distancia a la que se encuentra el objeto.

La reconstrucción de las tres dimensiones a partir de la imagen de la retina es un proceso de ingeniería inversa, que consiste en determinar cómo podría ser el objeto que ha producido la imagen que se quiere interpretar. Este proceso se comprende fácilmente si se analiza la figura siguiente, en la que vemos dos posibles interpretaciones de la imagen en la retina. Puede corresponder a una persona de estatura media situada a una distancia de unos cuatro metros, o a una con la mitad de altura situada a dos metros.



Es fácil ver que los procesos de ingeniería inversa no tienen una solución única. Para calcular la distancia a la que se encuentra la persona de la figura tenemos que utilizar el dato de su estatura, que no podemos extraer de la imagen sino de nuestra experiencia previa. Por eso es fácil engañar al ojo con una imagen 2D bien construida, como la de las pinturas realistas, las fotografías, el cine o las imágenes de televisión (producidas en una pantalla plana) que nos producen una sensación de profundidad parecida a la del espacio de tres dimensiones que representan.

5.2. Un ejercicio de competencias pedagógicas: cómo engañar al ojo

Ahora que sabemos cómo funciona el ojo, podemos inventar algún procedimiento para engañarlo. En una superficie (que tiene dos dimensiones) se dibujan determinadas imágenes de manera que el ojo las perciba con las mismas proporciones que si fuesen de tres dimensiones.

Hay dos caminos para abordar este problema: el primer procedimiento consiste en interponer, entre el objeto que queremos representar en dos dimensiones y el observador, un cristal plano y transparente, sobre cuya superficie se dibuja lo que percibimos de dicho objeto. Este método no requiere conocer el funcionamiento del ojo.

El segundo camino consiste en relacionar las imágenes bidimensionales que se forman en la retina con los objetos tridimensionales que las producen. Esta relación da lugar al problema de representar la tercera dimensión (profundidad), origen de la *perspectiva*, que se puede estudiar con la cámara oscura, ya sea con o sin lente.

El paso de tres dimensiones espaciales a dos es, pues, el objeto de la perspectiva y se realiza aplicando las

leyes de la geometría euclidiana a la proyección en una cámara oscura.

En primer lugar, explicaremos algunas ideas preliminares que nos van a ser útiles para entenderla.

Punto de fuga

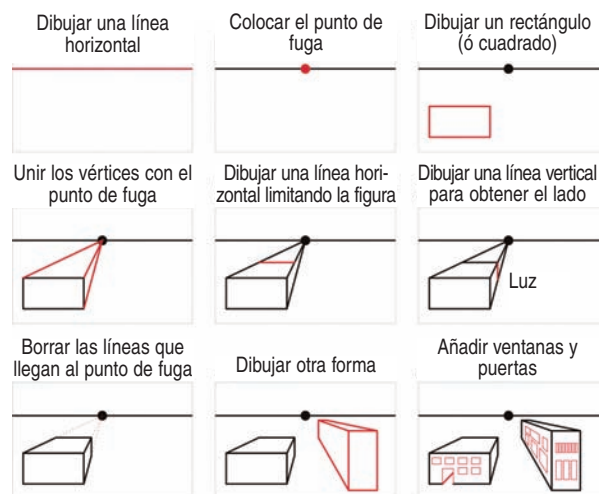
En la geometría euclidiana se supone que las paralelas se encuentran en el infinito. Sin embargo cuando miramos un objeto que se aleja, por ejemplo los dos raíles del tren de la figura, nos da la impresión de que las paralelas se van aproximando y terminan por converger en un punto dentro del espacio que dominamos con nuestra vista. A este punto de convergencia se le llama *punto de fuga* y la línea horizontal que pasa por este punto se llama *línea del horizonte*. El punto de fuga es, por tanto, la representación del punto del infinito euclidiano sobre nuestro campo de visión.



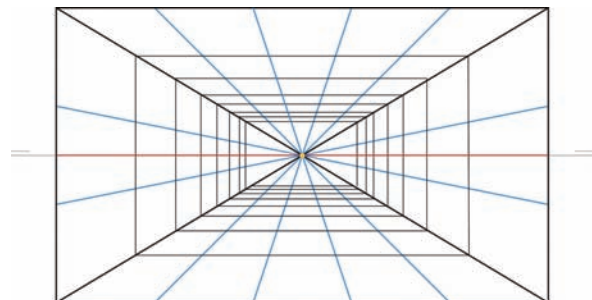
APLICACIÓN EN EL AULA



En las figuras siguientes se indica la forma en la que los alumnos pueden representar cuerpos de tres dimensiones sobre la superficie de un papel, siguiendo las reglas de la perspectiva que acabamos de descubrir.



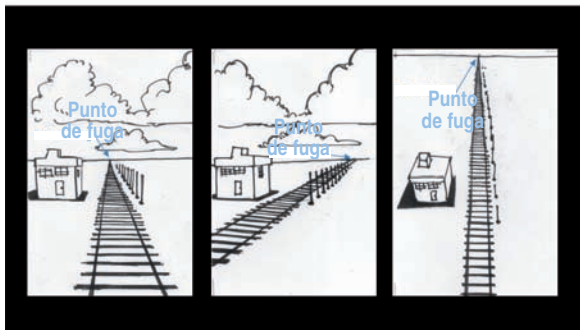
La manera más sencilla de representación consiste en realizar el dibujo en torno a un solo punto de fuga, y se denomina *perspectiva lineal*.



Sin embargo, hay que tener en cuenta que existen tantos puntos de fuga como direcciones de rectas en el espacio, por lo que la perspectiva fue evolucionando con el tiempo.

Punto de mira o punto de vista

Es el punto desde el que se observa un objeto. Como se ve en el dibujo, un cambio en el punto de mira con el que observamos el mismo paisaje modifica el punto de fuga y, por lo tanto, la escena que percibe el ojo.



En pintura, cada cuadro está pensado y realizado por el pintor para ser observado desde un lugar determinado. El cuadro de Velázquez (1599-1660) del príncipe Baltasar Carlos es un ejemplo característico.

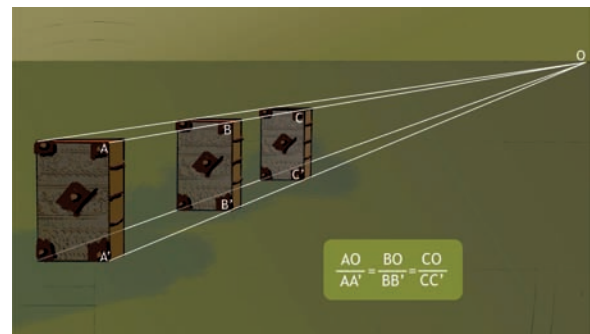
Este cuadro estaba destinado a ocupar el vano situado sobre el dintel de una puerta del palacio del Buen Retiro y a eso se debe el punto de vista que utiliza Velázquez. Visto desde abajo, el caballo parece saltar sobre el espectador, pero si se observa desde el frente la perspectiva no es la adecuada y nos aparece como un animal demasiado tripudo.



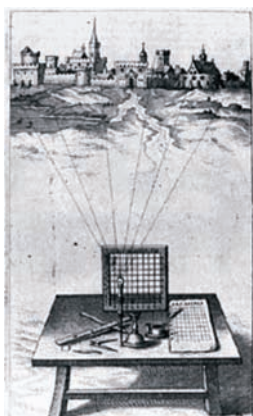
Mantenimiento de proporciones

Cuando miramos un objeto que se aleja nos da la impresión de que su tamaño disminuye. Hay una proporcionalidad entre el tamaño del objeto y la distancia a la que es observado. Esta proporcionalidad, que ya fue enunciada por el filósofo griego Tales de Mileto (640-546 a. C.), debe ser tenida en cuenta cuidadosamente para entender cualquier representación de la realidad.

La figura siguiente es un buen ejemplo de mantenimiento de las proporciones, reflejado en la constancia del cociente entre la altura del objeto y su distancia al punto de fuga.



Este principio inspiró las técnicas que se usaron en la pintura renacentista. Su principal valedor fue Brunelleschi, una de cuyas técnicas favoritas consistía en utilizar dos retículos (sistemas de coordenadas), uno delante de la escena que se va a pintar y otro sobre el lienzo. En cada cuadrito pintaba lo que veía y, al mantener la proporcionalidad, conseguía una gran exactitud en la reproducción.



5. 3. La perspectiva en la pintura

Uno de los aspectos principales de la composición pictórica es la distribución de los elementos en el espacio, para su visión comprensiva por el espectador. El espacio es el marco en el que el pintor sitúa los personajes y los objetos del tema que desarrolla, y para esto lo estructura de formas diversas. Como la pintura se realiza sobre un lienzo (dos dimensiones), la representación de la profundidad es una fuerza que ha contribuido al desarrollo artístico a lo largo de los siglos. La pintura que observamos en un cuadro no es la simple transposición de la realidad tal como nosotros la vemos con nuestros ojos. Éstos nos proporcionan una visión binocular (tres dimensiones), en cambio la imagen representada en un cuadro se parece más a lo que vería Polifemo con su único ojo.

Para crear la ilusión de profundidad se han utilizado diversos procedimientos entre los que destacamos la *perspectiva lineal*, la *perspectiva menguante* y la *perspectiva de color*.

Perspectiva lineal

Como ya hemos visto, la perspectiva lineal es un sistema pictórico cuyo objetivo es crear la sensación de profundidad engañando al ojo para que "vea" un espacio tridimensional, donde sólo existe una superficie plana bidimensional. El concepto más importante para la comprensión de la perspectiva lineal es el punto de fuga.

La perspectiva lineal es la forma en que los animales dotados de ojos simples perciben el espacio.



Perspectiva menguante

A medida que aumenta la distancia, no sólo disminuye el tamaño sino también la nitidez, los contornos se van haciendo borrosos y desdibujados, al igual que ocurre en la realidad. Esta técnica consiste en difuminar los contornos, prescindir de la línea negra que contiene las figuras y lograr así una atmósfera vaporosa y sugerente. Con el *sfumato gradual* (más cuanto más lejos) de la *Gioconda* de Leonardo Da Vinci, se logra una gran sensación de realismo, los objetos se ven más borrosos cuanto mayor es la distancia entre ellos y el observador.

Perspectiva de color

Cuanto más lejos aparece representado un objeto, más tenues son sus colores. Existe también en el mundo real un desvaimiento de los tonos hacia el extremo violeta del espectro al aumentar la lejanía (desde lejos vemos las montañas azules).

Ambas perspectivas surgen entre los siglos XV y XVI superpuestas a la perspectiva lineal y las define Leonardo Da Vinci en su *Tratado de la pintura*.

5. 4. Antecedentes históricos

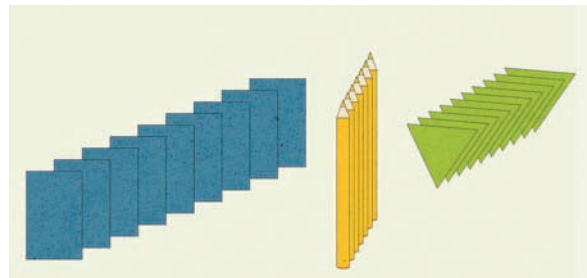
Aunque no han sobrevivido pinturas griegas, parece haber un sentido intuitivo de profundidad en la disposición de los personajes en el escenario del teatro.

Lo mismo ocurre en algunos murales de las ruinas romanas de Pompeya (probablemente copias de pinturas griegas).

La pintura prerrenacentista

Antes del Renacimiento, los artistas se interesaban más por el contenido y simbolismo de su trabajo que por una buena plasmación de la realidad. El tamaño de cada elemento de la imagen estaba más relacionado con su importancia que con su situación en el espacio.

No obstante, a finales del gótico algunos pintores empezaron a utilizar diversos trucos con los que intentaban dar sensación de profundidad. Estos trucos, que ya presagiaban el futuro desarrollo de la perspectiva, consisten fundamentalmente en jugar con la opacidad de los objetos (los que están delante tapan a los de atrás) y el tamaño relativo de los mismos (disminuye con la distancia).



Un pintor prerrenacentista típico fue Cimabue, fuertemente influenciado por la pintura bizantina, del que presentamos una de sus obras. El centro del cuadro está presidido por la imagen de la Virgen, de gran tamaño, como corresponde a su importancia. Sin embargo, en la distribución de los demás elementos en el espacio del cuadro se aprecia el truco de la opacidad de los objetos.



Los dos trucos, tamaño relativo y opacidad, pueden verse en la tabla de Sassetta, *El encuentro de San Antonio y San Pablo* (1440).



5. 5. La pintura renacentista

Los orígenes: Giotto di Bondone (1267?-1337)

Llamado el padre de la pintura renacentista, auténtico adelantado de dicha pintura, fue un notable pintor, escultor y arquitecto italiano del Trecento. Se le considera el primer artista de los muchos que contribuyeron a la creación del Renacimiento y uno de los primeros en sacudirse las limitaciones del arte y los conceptos medievales. Si bien se limitó fundamentalmente a pintar temas religiosos, fue capaz de dotarlos de una apariencia terrenal y fuerza vital al incorporar elementos de la perspectiva lineal y el claro oscuro.

Analicemos algunas de las características más sobresalientes de su pintura en algunos de sus cuadros.



En esta Madonna entronizada se puede observar cómo Giotto se va apartando de las pautas bizantinas. Las figuras son menos planas que en la Madonna de Cimabue, hay alguna modelización en las figuras y vestimentas y en las formas arquitectónicas también se observa algo de profundidad sugerido por el uso de la perspectiva, aunque la posición del punto de fuga del escalón inferior está invertida.



Giotto se adelantó en más de un siglo a algunas de las normas de Brunelleschi, del que trataremos más adelante. Esto se evidencia en el cuadro *Jesús ante Caifás*, en el que se observa un punto de fuga inconsistente en el techo, así como una perspectiva paralela sin punto de fuga en la plataforma de Caifás. Se trata, sin duda, de un trabajo de investigación muy importante.



Del Quattrocento al Renacimiento tardío

El Renacimiento toma su nombre del nuevo interés en las ideas y estilos clásicos que surgió y creció a lo largo de los siglos del gótico, acompañado de un florecimiento económico que precipitó el final de la Edad Media.

Con el Renacimiento, el hombre adquiere una posición predominante y pasa a ser el centro de la escena. Los artistas se toman en serio la representación precisa de la realidad y utilizan técnicas cada vez más precisas.

• Filippo Brunelleschi (1377-1446)

Este arquitecto florentino consiguió un sistema de perspectiva enfocado y completo con una disminución regular y matemática hacia un punto de fuga fijo y basado

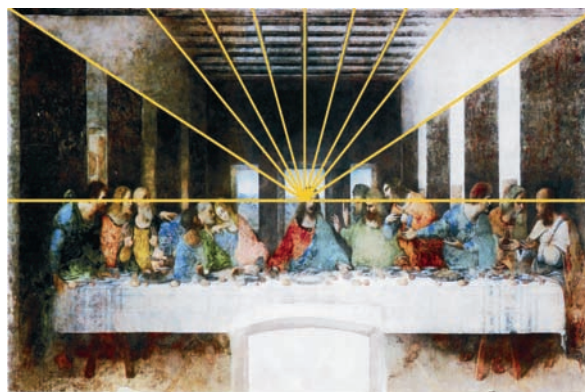
en las leyes de la óptica. Fue pródigo en grandes demostraciones públicas que estimulaban a los artistas de la época.

Todos sus estudios fueron recogidos por su colaborador, el veneciano Leon Battista Alberti, en su *Manual de Pintura* (1436), en el que definía la perspectiva como una concepción del espacio derivada de la geometría euclidiana.

• Leonardo Da Vinci (1452-1519)

Fue otro de los teóricos de la perspectiva convergente, arquitecto, escultor, inventor e ingeniero, es el hombre del Renacimiento por excelencia. Está ampliamente considerado como uno de los más grandes pintores de todos los tiempos y quizá la persona con más y más variados talentos de la historia. En su *Tratado de la pintura* expone: “La perspectiva no es otra cosa que la visión de un objeto a través de una lámina transparente, en cuya superficie se dibujan todas las cosas que se encuentran detrás”.

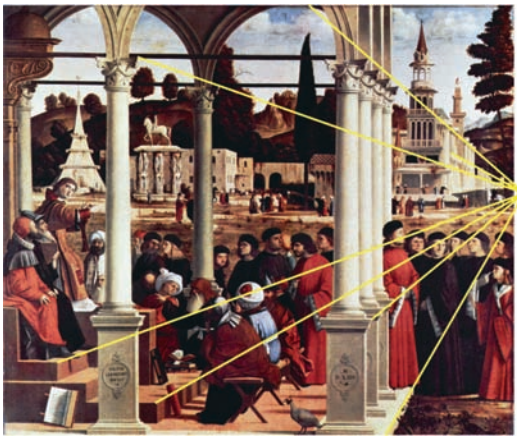
En su *Sagrada Cena*, cuyo punto de fuga está situado en la cabeza de Jesús para resaltarlo, se evidencia el efecto de la perspectiva. Leonardo utilizó también otros trucos, como la *perspectiva de color* y la *perspectiva del aire* así como el *claroscuro*, para relajar los requerimientos estrictos de la perspectiva lineal.



• **Vittore Carpaccio** (1460/1466-1525/1526)

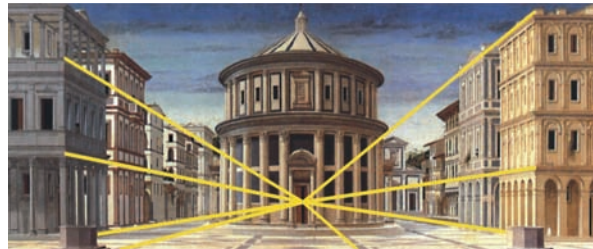
A veces el punto de fuga no está en el centro del cuadro. Se quiere romper un poco la simetría central.

Un buen ejemplo es *La Disputa de San Esteban* por Carpaccio (1514). Este cuadro tiene un solo punto de fuga, situado fuera del borde derecho del lienzo, en el que convergen una serie de líneas perpendiculares al lienzo. Esta técnica, a veces usada, produce efectos sorprendentes. Sin embargo, los pintores eran conscientes de que un desplazamiento desmesurado del punto de fuga daba lugar a distorsiones, de hecho tenían la norma de que el punto de fuga no debía desplazarse más allá de los límites del caballete.



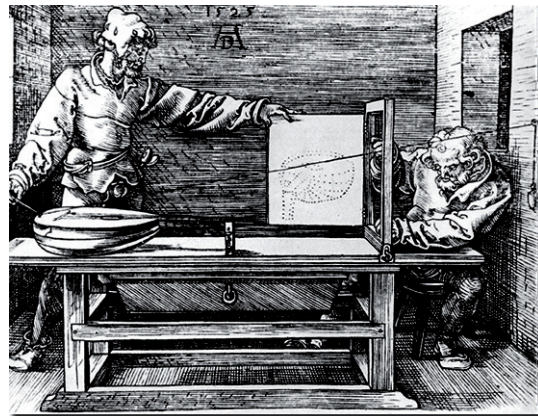
• **Piero della Francesca** (1416-1492)

A este pintor, interesado por la construcción matemática del espacio (*perspectiva geométrica*), se atribuye la *Ciudad ideal* (1470), cuyo punto de fuga está en la columnata central. Grandes ventanales dejan que la vista penetre hasta el fondo del cuadro, aumentando así la sensación de profundidad. Este truco había sido usado ya por Brunellescci, medio siglo antes, en su Baptisterio de Florencia



• **Alberto Durero** (1471-1528)

Algo después y al norte de los Alpes, destaca el alemán Alberto Durero pintor, escultor sobre madera y piedra, y matemático, que tenía un interés especial por los utensilios de dibujo y concibió una serie de ilustraciones para demostrar cómo se usan tales instrumentos. Dejó constancia tanto escrita como grafica de sus conocimientos e investigaciones en el campo de la perspectiva.



Éste es uno de los grabados en el que muestra sus métodos de perspectiva práctica. El artista dibuja las líneas más sobresalientes del modelo y luego transfiere dicho dibujo a un panel debidamente preparado, guardando adecuadamente las proporciones.



5. 6. El ocaso de la física y de la perspectiva clásica

En el siglo XX, tras 600 años de trucos de perspectiva lineal, la pintura vuelve a la superficie plana.

La época a caballo entre los siglos XIX y XX presagia los profundos cambios que muy pronto van a producirse en nuestros valores culturales. La ciencia y el arte no son ajenos a ello sino, más bien al contrario, fueron precursores de estos cambios.

En la ciencia, y particularmente en la física, la irrupción del mundo subatómico (electrones, fotones, etc.) puso de manifiesto un comportamiento muy alejado del que estábamos acostumbrados en la física clásica e imposible de comprender si nos basábamos en nuestras apreciaciones sensoriales. El proceso terminó en los años veinte con la aparición de la *mecánica cuántica*, que desarrolló métodos específicos para tratar sistemas microscópicos, como el citado mundo subatómico, que no podía ser explicado adecuadamente por la física clásica.

En el arte y en particular en la pintura, las cosas también cambiaron. Ya no se trataba de representar el mundo como lo vemos con nuestros ojos sino como lo apreciamos intelectualmente, con sus connotaciones culturales. Esto supone el fin de la perspectiva clásica y la aparición de los diversos movimientos o "ismos" (cubismo, fovismo, etc.) que caracterizaron el siglo XX.

De acuerdo con el post estructuralismo, el arte deja de ser una representación de la naturaleza y se convierte en una interpretación de la realidad con connotaciones culturales y convirtiéndose en acción.

No se representan el mundo como se ve, sino como realmente es de acuerdo con la visión del artista, y el punto de fuga no es ya necesario.

Pablo Ruiz Picasso (1881-1973)

Pintor y escultor malagueño, es el principal exponente del cubismo que se caracteriza precisamente porque toda imagen se proyecta en un único plano que conserva sus dimensiones, sin que lo más distante aparezca más pequeño, porque realmente no lo es, y sin que desaparezca lo que no se ve al estar detrás, porque realmente existe.



Dora Maar vista por Picasso

Picasso, influenciado por el arte africano, basa su perspectiva en la multiplicidad de puntos de vista en un mismo cuadro, figura u objeto. Así, en los retratos de Dora Maar podemos apreciar cómo se emplean varios puntos de vista para resolver el retrato: un perfil de una nariz que mira a la derecha y un perfil de ojo que mira a la izquierda, un rostro que parece pintado de frente, con la nariz vista desde el suelo y la oreja vista desde el lateral derecho. Pero, por inverosímil que parezca, en la obra se reconoce a la modelo.

Capítulo

6

ILUSIONES ÓPTICAS:
LA SENSACIÓN DE
MOVIMIENTO Y EL CINE



6.1. La sensación de movimiento

Tanto el cine como la televisión se basan en la percepción sucesiva de imágenes fijas. ¿Por qué tenemos sensación de movimiento?

El movimiento de las imágenes es una ilusión provocada por tres factores:

- *La persistencia de imágenes en la retina.*
- *El fenómeno phi.*
- *La frecuencia crítica de fluctuación.*

Los dos primeros factores están relacionados con la fisiología del ojo y del cerebro respectivamente. El tercero es externo y se refiere al dispositivo productor de imágenes.

Persistencia de imágenes en la retina

Cuando un impulso luminoso *estimula el ojo*, la impresión no desaparece inmediatamente sino que persiste en la retina algo menos de 0,1 segundo. Este fenómeno lo comprobamos al mirar un foco de luz e inmediatamente cerrar los ojos. La sensación de brillo permanece durante un instante porque todavía sigue impresionada la retina.

El fenómeno phi

Cuando dos imágenes casi idénticas se proyectan sucesivamente con un intervalo de tiempo muy corto, tenemos la sensación de estar frente a un objeto que se desplaza de una posición a otra. Éste es un ejemplo del *efecto phi*, que consiste en que *el cerebro crea una sensación* de movimiento aunque reciba solamente pequeños fragmentos del mismo. Es decir, rellena los huecos entre ellos y crea la ilusión de un continuo a partir de la simple serie de imágenes estáticas del movimiento.

Mientras la persistencia retiniana produce una *superposición* de imágenes, el efecto phi *reconstruye* los tramos entre las imágenes al sumar las correspondientes unidades (impresiones) una detrás de otra. De esta manera se genera la sensación de movimiento.

La frecuencia crítica de fluctuación

Se llama así a la frecuencia mínima de parpadeo que tiene que tener una *fuentes de luz fluctuante* para producir sensación de luz continua en nuestros ojos.

La persistencia retiniana y el efecto phi conjuntamente imponen una condición a cualquier fuente luminosa que produzca imágenes o impulsos. Su frecuencia de fluctuación tiene que tener un valor mínimo (crítico) para que apreciemos la luz emitida como continua. Esta frecuencia es de 20 destellos por segundo. Una frecuencia inferior produce parpadeo por lo que en el cine se proyectan 24 imágenes por segundo y en televisión 25.

6. 2. Los juguetes ópticos

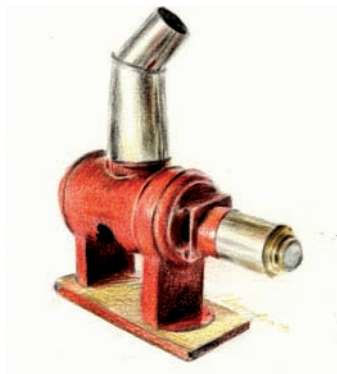
Aunque parece que ya los egipcios y los romanos utilizaron algún tipo de juguete óptico, es en el siglo XVII cuando en Europa se desarrollan los primeros modelos de linternas mágicas al mismo tiempo que otros aparatos ópticos dotados de lentes y espejos.

La linterna mágica

Considerada precursora del cinematógrafo, fue inventada por el jesuita alemán Athanase Kircher en 1645. Proyectaba imágenes de transparencias sobre una pantalla, utilizando una lente y una fuente de luz que podía ser una vela o una lámpara de gas. El científico holandés Christiaan Huygens desarrolló varias linternas mágicas, la primera de las cuales se dató en 1659. Parece que su padre le pedía este tipo instrumentos para impresionar a sus amigos.



El científico inglés Robert Hooke, por su parte, describió en 1668 una linterna mágica en la que se usaba luz del Sol o de una vela. A principios del siglo XIX, los “linternistas” iban por los pueblos con su linterna a la espalda y hacían representaciones públicas para ganarse la vida.



Taumatropo

Una serie de juguetes ópticos que reproducían la sensación de movimiento fueron muy populares en el siglo XIX. El primero que se desarrolló fue el taumatropo (maravilla que gira) inventado por el físico John Paris en Inglaterra, en 1824, con el objeto de demostrar la persistencia de la imagen en la retina. Consiste en un disco con dos imágenes complementarias en ambos lados y un trozo de cuerda a cada lado del disco. Ambas imágenes se unen al estirar la cuerda entre los dedos al hacer girar el disco y cambiar de cara rápidamente.

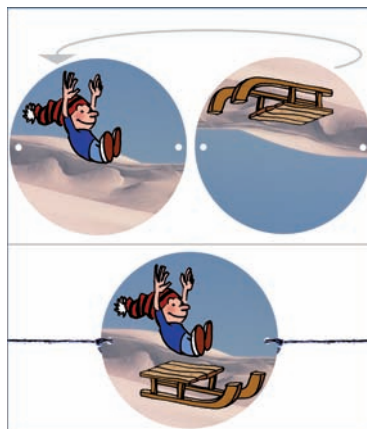
APLICACIÓN EN EL AULA

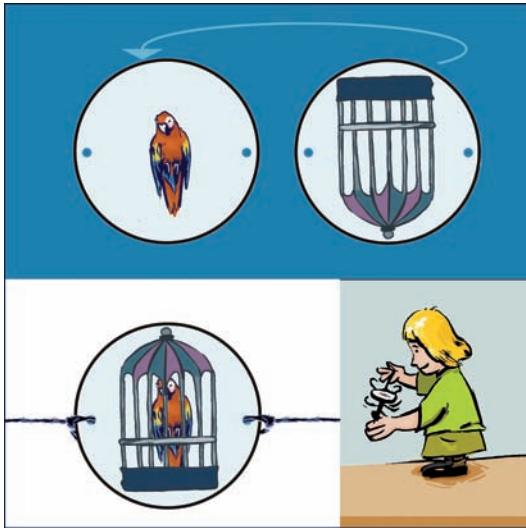


Es muy sencillo fabricar juguetes ópticos en el aula para que nuestros alumnos se den cuenta de las características del ojo humano que hacen posible el cinematógrafo y la televisión (analógica o digital).

Comenzaremos con un taumatropo, el más sencillo de todos. Para ello se dibujan las dos escenas cuyas imágenes se quiere fundir en la retina, se recortan y se pegan una en el revés de la otra. Se suele hacer girar el conjunto por medio de una cuerda, una goma elástica o un palillo de madera.

Las ilustraciones siguientes muestran el anverso y reverso de algunos taumatropos. El primero muestra un niño deslizándose en un trineo y el segundo reproduce al más famoso de ellos, el del pájaro en su jaula.



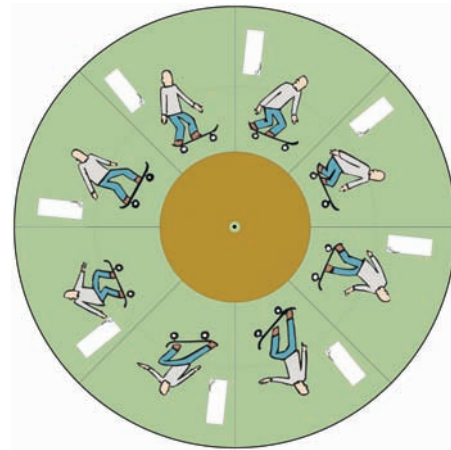


Si se montan convenientemente en las dos caras de una cartulina, al hacerlas girar rápidamente ambas imágenes se fundirán en nuestro cerebro darán la sensación de ser una sola imagen.



Fenantiscopio o estroboscopio

En 1832 Simón Ritter von Stamfer, en Austria, construye el *estroboscopio* y simultáneamente Joseph Antoine Plateau, en Bélgica, inventó un juguete idéntico al que llamo *fenantiscopio*. Éstos fueron los primeros instrumentos capaces de crear la impresión de una imagen que se movía de forma continua y periódica. La sensación de movimiento se consigue por medio de nueve imágenes, en vez de sólo las dos que emplea el taumatropo. El funcionamiento es muy sencillo y se entiende sin más que estudiar la ilustración, a partir de la cual se puede construir uno de estos aparatos mediante una fotocopia.



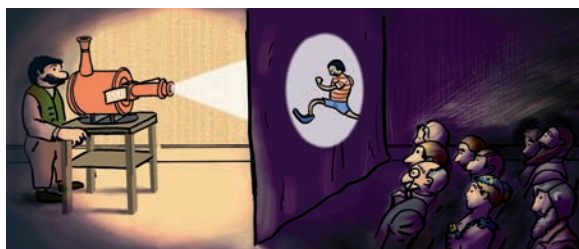
Una mejora del estroboscopio es el *zootropo*, también muy fácil de construir empleando las figuras de un estroboscopio.



6. 3. Historia del cine

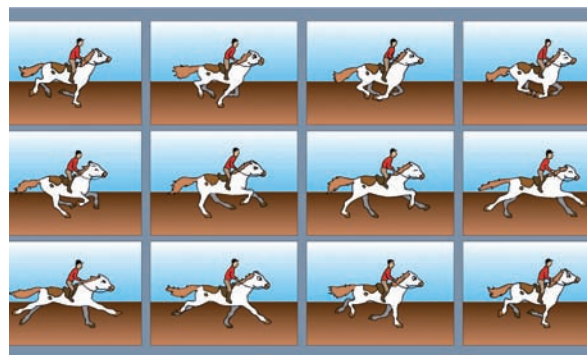
A continuación, resumimos el camino recorrido desde la aparición de los juguetes que hemos descrito hasta el origen del primer cine comercial, de enorme influencia en nuestra sociedad.

En el siglo XVIII, como hemos dicho, hicieron furor los espectáculos basados en la linterna mágica. Se llevaban a cabo espectáculos con siluetas realizadas con distintos materiales cuyas sombras se proyectaban sobre papeles o telas blancas.



En el siglo XIX, tanto en Estados Unidos como en Europa, se animaban imágenes dibujadas a mano como forma de diversión, empleando dispositivos que se hicieron populares en salones llenos de público. Concretamente, se descubrió que si dieciséis imágenes de un movimiento que transcurre en un segundo se hacen pasar sucesivamente también en un segundo, la persistencia de la visión las une y hace que se vean como una sola imagen en movimiento. Nosotros hemos realizado este experimento situando las imágenes sucesivas en las esquinas de las páginas del libro, de manera que al pasarlas rápidamente produzcan la sensación de movimiento a que nos referimos.

En aquellos mismos años, William Henry Fox Talbot en el Reino Unido y Louis Daguerre en Francia trabajaban en un nuevo descubrimiento que posibilitaría el desarrollo del cinematógrafo: la fotografía, que registra la realidad física. En 1839, Daguerre consiguió fijar una imagen sobre una placa. Sin este invento previo, no existiría el cine. Hacia 1852, las fotografías comenzaron a sustituir a los dibujos en los artilugios para ver imágenes animadas y en 1877 el fotógrafo anglo estadounidense Muybridge empleó una batería de 24 cámaras para grabar el ciclo de movimientos del galope de un caballo.



A finales del XIX, Tomas Alva Edison, inventor de la lámpara incandescente y el fonógrafo, estuvo muy cerca de inventar también el cine, al crear el kinetoscopio, una caja de madera en cuyo interior se podía contemplar una secuencia de fotografías, pero sólo permitía una función muy limitada.

En Francia, a pesar de no contar con la gran infraestructura industrial de Edison, los hermanos Louis y Auguste Lumière inventaron el cinematógrafo, que era al tiempo una cámara de rodaje (que utilizaba un mecanismo intermitente delante del obturador con el que lograban parar la película) y un proyector de imágenes fotográficas. Es el primer aparato que se puede calificar auténticamente de cinematógrafo. Los hermanos Lumière produjeron inicialmente una serie de cortometrajes de género documental, con gran éxito, en los que se mostraban diversos elementos en movimiento: obreros que salían de una fábrica, olas que rompían en la orilla del mar y un jardinero que regaba el césped.

El 28 de diciembre de 1895, el público, convocado en el Gran Café del Boulevard de los Capuchinos en París, vio cómo se abalanzaba sobre él una locomotora a vapor. Así nació la primera emoción cinematográfica de la historia. Los Lumière organizaron la puesta de largo de su invento con cierto escepticismo, pero el éxito de taquilla fue inmediato. Su regular recaudación de 2.000 francos al día garantizó la supervivencia del experimento. Pronto las películas se comenzaron a comercializar a escala internacional.



En sus principios el cine era mudo. Tras muchos intentos fallidos para hacer cine sonoro (por las grandes dificultades para sincronizar sonido e imagen), en los años veinte se consigue incorporar a la película una banda sonora. Las primeras películas fueron *D. Juan* y el *Cantor de Jazz*. Otro de los aspectos técnicos que también marcó un gran cambio en el cine fue la aparición del cine en color.



Epílogo

LA ÓPTICA EN EL
SIGLO VEINTE Y LA
NATURALEZA DE LA
LUZ



7.1. Antecedentes históricos

La cuestión de la naturaleza de la luz, ondulatoria o corpuscular, ha sido objeto de un intenso debate científico a lo largo de los últimos siglos.

Aunque los filósofos de la antigüedad clásica y de la época medieval ya especularon sobre esta cuestión, no se desarrollaron modelos coherentes que trataran de explicar dicha naturaleza, hasta finales del siglo XVII.

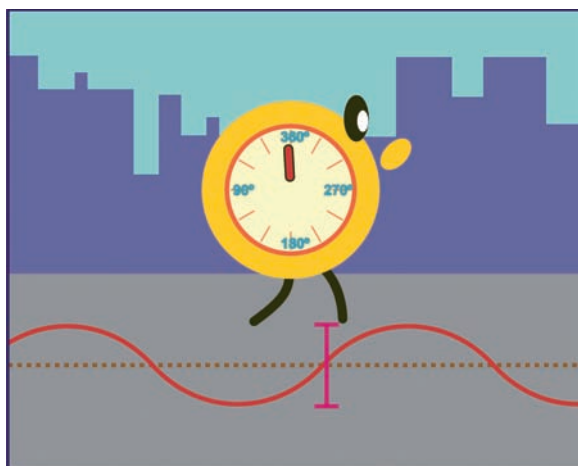
Durante el siglo XVIII, predominó el modelo corpuscular (Newton fue su principal valedor). En el siglo XIX, fue reemplazado por el modelo ondulatorio inicialmente propuesto por Huygens y desarrollado posteriormente por Fresnel.

La teoría cuántica es la actualmente aceptada. La formularon Einstein y De Broglie a principios del siglo XX. Según esta teoría la luz está constituida por fotones, que son partículas de naturaleza a la vez corpuscular y ondulatoria con energía proporcional a su frecuencia.

7.2. La dualidad partícula-onda y el fotón de Feynman

La teoría cuántica afirma que la luz está formada por fotones, paquetes de energía que tienen la naturaleza de partículas, pero con una frecuencia asociada que le confiere la naturaleza de una onda. Por tanto, el fotón es, a la vez, partícula y onda.

Richard Feynman (1918-1988) propuso un modelo de fotón en el que una partícula es portadora de una especie de reloj (que señala la fase), como se esquematiza en la figura. Mientras que la partícula se comporta como una bola de billar, el reloj mide su fase (frecuencia multiplicada por el tiempo), una magnitud ondulatoria. Cuanto mayor es la frecuencia, más rápidamente gira la manecilla del reloj.



En una esquina del libro se han situado las figuras en posiciones sucesivas que, al pasar rápidamente, producen la sensación de movimiento del fotón. La manecilla que indica la fase recorre los 360° de una circunferencia en el mismo tiempo en el que el fotón recorre una longitud de onda. La velocidad a la que se desplaza el fotón es la velocidad de la luz en el medio por el que se propaga. En el vacío, es de unos 300.000 kilómetros por segundo.

Ahora se puede describir por qué la luz se refleja en las micelas de los coloides, pero no en las moléculas de una disolución. Cuando la longitud de la onda asociada al fotón, es del tamaño de una partícula (caso de las micelas), el fotón impacta con ella reflejándose, pero cuando el tamaño de la partícula es mucho más pequeño que la longitud de onda (caso de las moléculas), el fotón pasa sin interaccionar con ellas (es como si no las viera).

Pero todo esto pertenece a un modelo distinto de luz, que esperamos sea objeto de una próxima obra.



