

Todo es según el color del cristal con que se mira

Juan José Serrano Pérez

Resumen: Se suele decir que “para gustos, los colores”. Este adagio pone de manifiesto, de forma metafórica, que al igual que nuestros gustos, el color está en nuestra mente. Esos colores, que han inspirado a artistas de toda índole, tienen su origen en la interpretación que hace nuestro cerebro de la energía luminosa que llega a nuestros ojos. A su vez, esa luz interacciona de una forma determinada con el objeto, según su composición química, y el color percibido también podría cambiar en diferentes condiciones de iluminación. Tras analizar todos estos factores, se pondrá de manifiesto que el color de las cosas no es tan simple como parece “a primera vista”.

Palabras clave: Color, espectroscopía, mecánica cuántica, interacción radiación-materia, fisiología.

Abstract: It is usually said in Spanish that “para gustos, colores” (in English: one man’s meat is another man’s poison). This adage highlights metaphorically that the perception of colours is in our mind. Such colours, which have inspired so many artists and have a great influence in our mood, have their roots in how the brain responds to the stimuli that are produced when incoming light reacts with the several types of photoreceptor cells in the eye. On the other hand, light interacts with a given object in a specific way which depends on its chemical composition, and the perceived colour may also change under different lighting conditions. After analysing all these variables, it would be clear that the colour of things is not as straightforward as it might appear “at first glance”.

Keywords: Colour, spectroscopy, quantum mechanics, interaction of radiation with matter, physiology.

INTRODUCCIÓN

El poeta Ramón de Campoamor escribió en su poema *Las dos linternas* (1846): “Y es que en el mundo traidor/nada hay verdad ni mentira;/todo es según el color/del cristal con que se mira”. Estos versos, en términos fisicoquímicos, ponen de manifiesto que el color de las cosas no es tan obvio como parece a simple vista, ya que depende de tres factores: de la radiación electromagnética puesta en juego, de la estructura microscópica del objeto, y de la interpretación por parte de nuestro cerebro. En la percepción del color tanto los factores fisiológicos como psicológicos desempeñan un papel importante, más allá de la física y la química.



J. J. Serrano Pérez

Generalitat Valenciana
Conselleria de Educació, Cultura y Deporte
IES Juan de Garay, c/Juan de Garay, 25, 46017 Valencia
C-e: serrano_juaper@gva.es/jjserpe@gmail.com

Recibido: 06/09/2019. Aceptado: 13/11/2019.

LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La luz presenta una naturaleza *dual* onda-partícula.^[1-7] se propaga por el espacio como una onda (experimentando fenómenos de reflexión, refracción, polarización, interferencia, difracción, etc.) e interacciona con la materia como un conjunto de partículas (efecto fotoeléctrico, efecto Compton).

Desde la perspectiva ondulatoria, la luz es una onda electromagnética^[1,8-12] que se puede caracterizar a partir de ciertas magnitudes, como la **longitud de onda** (λ), que es la distancia que separa dos puntos idénticos de la perturbación (verbigracia: dos máximos sucesivos, ver Figura 1), o la **frecuencia** (f), inversamente proporcional a la anterior, que es el número de veces que un determinado punto repite cierto estado de la perturbación por unidad de tiempo. Matemáticamente, se cumple que $f = c/\lambda$, siendo c la velocidad de la luz en el vacío.

El conjunto de los tipos de ondas electromagnéticas se denomina *espectro electromagnético*.^[10,13,14] Según el rango de energía considerado, las zonas del espectro reciben diferentes denominaciones, tal y como se aprecia en la Figura 1.

Por otro lado, desde la perspectiva corpuscular, la luz se comporta como si estuviera constituida por un conjunto de partículas denominadas *fonones*, de energía directamente proporcional a su frecuencia, tal y como concluyó Albert Einstein en 1905 para explicar el *efecto fotoeléctrico*, basándose en las ideas de la *mecánica cuántica* que había propuesto Max Planck en 1900. Según esta teoría,^[7,10,11,15]

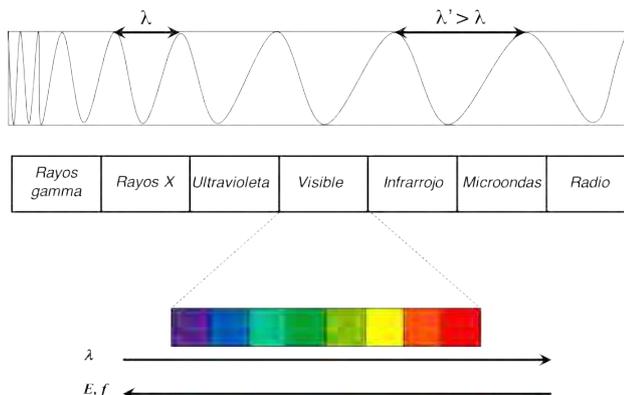


Figura 1. Se denomina *espectro electromagnético* a la distribución del conjunto de las ondas electromagnéticas según su longitud de onda λ , su frecuencia f o su energía E . La radiación visible es la única que detecta el ojo humano

la energía de cualquier sistema físico está *cuantizada*: aunque en el mundo cotidiano podemos suponer, por ejemplo, que la energía cinética de un coche puede adquirir cualquier valor posible, ya que puede avanzar a cualquier velocidad dentro de los límites que le impone su motor, esta aproximación no es válida en el mundo microscópico, ya que en realidad la energía es una magnitud discreta, como lo es el número de hojas de un árbol o el número de goles que puede marcar un jugador de fútbol (un delantero no puede marcar dos goles y medio: o marca dos o marca tres). La energía de cada cuanto de radiación es $E = h \cdot f$, siendo h la constante de Planck y f la frecuencia. Es decir, a mayor frecuencia, mayor energía de la radiación. En definitiva, “la energía asociada a una radiación electromagnética de una determinada frecuencia solamente puede tener valores que son múltiplos de un cuanto elemental que es proporcional a la frecuencia de la radiación” ($E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$).

La luz puede interactuar con un cuerpo de diferentes formas y experimentar, como consecuencia, diferentes fenómenos que pueden dar lugar al color que percibimos (v. Figura 2): reflexión, dispersión, transmisión, emisión...

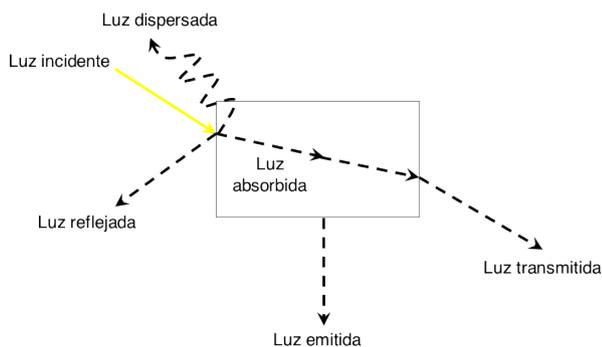


Figura 2. La luz puede interactuar con un cuerpo de diferentes formas (dependiendo de la estructura microscópica del material y del tipo de radiación incidente) y experimentar, como consecuencia, diferentes fenómenos que pueden dar lugar al color que percibimos

Por esta razón un determinado material se puede ver de un color determinado a la luz del día, pero bajo luz ultravioleta (UV) su color cambia, debido a la emisión de luz visible que experimentan sus moléculas tras ser excitadas precisamente con la luz correspondiente al ultravioleta, como ocurre con minerales como la calcita, la willemita o el ópalo.^[10] La luz emitida es casi siempre de menor energía (mayor longitud de onda) que la luz excitante. Toda emisión de luz^[4,10,11,13,14,16-19] por parte de un material que no se deba a un aumento de temperatura se denomina *luminiscencia*. Según la causa de la excitación distinguimos entre:

- Fotoluminiscencia: si una sustancia es excitada por luz y, seguidamente, emite luz.
- Electroluminiscencia: si el material emite luz cuando la electricidad pasa a su través.
- Quimioluminiscencia: en algunas reacciones químicas, parte de la energía que se libera lo hace en forma de luz, al formarse productos en estado excitado. Se llama *bioluminiscencia* si el proceso ocurre en un sistema biológico, como ocurre en el caso de las luciérnagas.

En cambio, se denomina *incandescencia* a la emisión de radiación térmica en el rango del visible,^[10,20-22] cosa que sólo ocurre a muy altas temperaturas, aproximadamente a partir de 800 K (unos 527°C), como le pasa a nuestro Sol o a las placas de una cocina, que entre 600 y 700°C están “al rojo” y brillan con una luz débilmente rojiza.

COLOR Y LUZ

Isaac Newton empezó a interesarse por los fenómenos ópticos hacia 1664. En 1704 se publicó su obra *Opticks*, en la que exponía sus ideas sobre la naturaleza de la luz.^[2-4] Su genial intuición fue considerar que la luz no era homogénea, como se admitía hasta entonces, sino compuesta por tantos “rayos” coloreados como ángulos de refracción diferentes hubiera. Así, hacia 1666 llevó a cabo sus famosos experimentos,^[2,23,24] demostrando que al incidir un rayo de luz sobre un prisma obtenía una imagen de forma oblonga, con los colores dispuestos en bandas horizontales, con el color azul y el rojo en los extremos. Como el índice de refracción depende de la longitud de onda, y cada color se caracteriza por una longitud de onda diferente, cada uno experimentará su refracción particular en distinto ángulo (v. Figura 3). De este modo, como el índice de refracción es mayor para el violeta y el azul, y menor para el rojo, los colores que más se desvían son los dos primeros, los de longitud de onda más corta. Esto se debe a que cada color viaja a distinta velocidad dentro del prisma, siendo el rojo el que menos cambia su velocidad. De esta manera, al atravesar el prisma y sufrir una segunda refracción en su otra cara, los colores aparecen claramente divididos, obteniéndose el *espectro visible*. Posteriormente, a través de un segundo

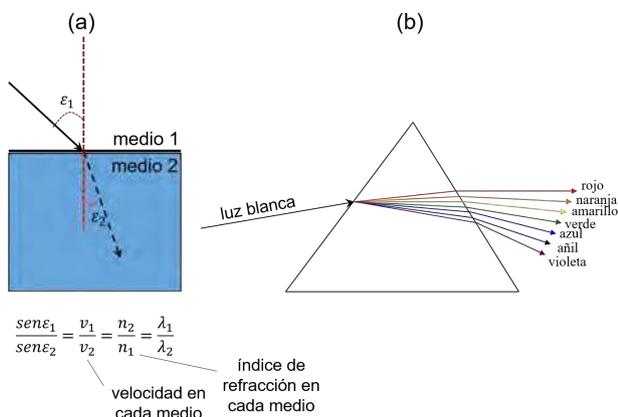


Figura 3. a) Refracción. b) Un haz de luz blanca que incide sobre un prisma de vidrio se dispersa en sus colores componentes

prisma, los colores se vuelven a agrupar en la luz blanca original. A partir de Newton se abolió la diferencia entre color y luz, puesto que la luz contenía todos los colores.

La formación del arcoíris^[1,10,25-27] tiene una explicación similar, y en este caso el fenómeno se debe a la dispersión cromática de la luz solar por reflexión y refracción en el interior de cada gota de agua (actuando como un diminuto prisma) suspendida en la atmósfera.

LA MATERIA

El estudio de la interacción entre la radiación y la materia es una de las aplicaciones más importantes de la mecánica cuántica. Los fenómenos derivados de dicha interacción dependen del tipo de radiación empleada, pero principalmente de la estructura microscópica de la sustancia. Así, la interacción de la luz con una molécula puede provocar cambios en su estructura electrónica,^[1,13,14,16,28-30] lo cual puede provocar que la molécula pase de su *estado fundamental*, el más estable, a un *estado excitado* de mayor energía, tal y como se representa en la Figura 4. Básicamente, lo que ocurre es que un fotón luminoso interacciona con un electrón de la molécula, y este electrón se excita pasando a un estado de energía superior. La molécula en estado excitado tenderá a relajarse y regresar al estado fundamental (el electrón volverá a ocupar su lugar original), y puede hacerlo, entre otras vías, emitiendo luz, cuyo color, en caso de emitir en el rango del visible, dependerá de la separación entre los estados permitidos de energía.

En otras palabras, los diferentes estados permitidos de energía determinan las propiedades físicas y químicas de las sustancias, incluyendo su color. De hecho, las causas del color son muy diversas,^[28,31] pero todas ellas tienen el mismo origen: la interacción de los fotones de la luz con los electrones de la materia. Según la naturaleza del compuesto podemos analizar los posibles tránsitos electrónicos en un átomo o en una molécula. Como excepción, en el caso del color azul del agua entran en juego, en cambio, las vibraciones moleculares.^[28,32]

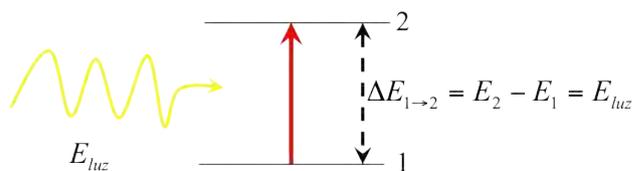


Figura 4. Cuando incide radiación electromagnética de la energía adecuada, correspondiente a la diferencia de energía entre dos estados, la molécula absorbe la radiación y se excita pasando del estado 1 (estado fundamental) al estado 2 (uno de los posibles estados excitados)

Asimismo, como el color de una sustancia depende de su estructura microscópica, no poseerá el mismo color una sustancia que una mezcla. Por ejemplo, los colores de la esmeralda, el rubí y el zafiro se deben a la presencia de impurezas metálicas (cromo en los dos primeros casos y titanio en el tercero), sin las cuales serían tan transparentes como el diamante.^[1,26] Por este motivo muchos pigmentos que se utilizan para fabricar pinturas son compuestos que contienen metales de transición.

Otro ejemplo es el caso de la célebre *copa de Licurgo*,^[33-35] fabricada en Roma hacia el siglo IV y que presenta diferentes coloraciones cuando se ilumina desde el exterior (a la luz diurna, la copa muestra tonos verdosos) o desde el interior (al colocar una pequeña fuente de luz dentro de la copa, esta muestra tonos rojos). Esta propiedad se debe a la presencia de diminutas nanopartículas de oro y de plata. Los efectos de las nanopartículas sobre la coloración también fueron aprovechados en la Edad Media por los célebres ceramistas de Manises mediante la adición de pequeñas cantidades de cobre y plata a las pinturas.^[36,37] A la luz de estos fenómenos (¡nunca mejor dicho!), los versos de Campoamor trascienden claramente lo metafórico.

Asimismo, también existen colorantes orgánicos, cuya estructura molecular es clave en su color. De este modo, los pigmentos y tintes suelen ser compuestos orgánicos conjugados (con enlaces carbono-carbono simples y dobles alternados). Cada nuevo doble enlace conjugado en un sistema incrementa la longitud de onda de la luz que se absorbe.^[38] Es decir, a mayor conjugación, mayor es la longitud de onda máxima de absorción: con unos pocos dobles enlaces conjugados un compuesto puede absorber en el UV y, si este número aumenta, la absorción tendrá lugar en el visible.

ABSORCIÓN SELECTIVA

Cuando un haz de rayos luminosos paralelos se refleja en una superficie lisa, como un espejo, todos los rayos salen en la misma dirección (*reflexión especular*). Sin embargo, la mayoría de las superficies son rugosas y, como resultado, la luz se refleja prácticamente en todas las direcciones (*reflexión difusa*).^[11,12,39] Puesto que la reflexión difusa envía la luz en todas direcciones, podemos ver los objetos iluminados desde cualquier dirección. La mayoría de los objetos reflejan algunas longitudes de onda de la luz más

que otras, y esa es una de las razones de los colores que percibimos.

Así, cuando un material iluminado con luz blanca presenta un determinado color, es porque ha absorbido todas las demás radiaciones, salvo la correspondiente a ese color, que o bien es reflejada (si el material es opaco) o es transmitida (si es transparente) hasta emerger por el lado opuesto. A este proceso se le denomina *absorción selectiva*. Así, *el color observado, reflejado o transmitido, es el complementario del color absorbido*. Cuando la absorción del espectro visible es total, el objeto aparece de color negro; si rechaza todas las radiaciones, reflejándolas, es de color blanco.

De este modo, las zanahorias y las hojas rojas en otoño son de color naranja porque contienen caroteno, una molécula que absorbe en la zona azul del espectro visible, reflejándose la luz que resulta de la absorción de las “frecuencias azules”. Tenemos otro ejemplo con el oro y el cobre, los únicos metales que no exhiben ese característico color metálico porque absorben luz azul y violeta, quedando el amarillo. Del mismo modo, una disolución de un colorante alimentario rojo tiene este color porque el colorante absorbe luz cian (azul-verdoso) y transmite rojo. Asimismo, si mezclamos un pigmento rojo con uno amarillo lo veremos naranja porque en esa mezcla se absorben todos los colores excepto el rojo y el amarillo, cuya combinación da como resultado el color naranja.

Tabla 1. Zona visible del espectro electromagnético

λ de luz absorbida (nm)	Color de la luz absorbida	Color visible
400-420	Violeta	Verde-amarillento
420-450	Violeta-azulado	Amarillo
450-490	Azul	Naranja
490-510	Azul-verdoso	Rojo
510-545	Verde	Púrpura
545-580	Verde-amarillento	Violeta
580-630	Naranja	Azul
630-720	Rojo	Azul-verdoso

Sin embargo, no solo la absorción de luz determina el color de las cosas. El color azul del cielo tiene su origen en la *dispersión o esparcimiento* de la luz.^[1,8,20,24-26,39-42] Ya hemos visto que si un fotón de la energía adecuada (correspondiente a la diferencia de energía entre dos estados permitidos por las reglas de la mecánica cuántica) interacciona con una molécula, esta se excita y pasa a un estado excitado. Pero si un fotón interacciona con una molécula y su energía no es suficiente para producir la excitación, entonces la molécula permanece en su estado fundamental, y el fotón se dispersa. Como el fotón incidente y el fotón dispersado tienen la misma energía, se

dice que la dispersión es *elástica*, lo que se conoce como *dispersión Rayleigh*.^[1,9,10,26,40] Si la longitud de onda de la luz incidente (luz solar) es grande comparada con el tamaño de la molécula (como ocurre con las moléculas que constituyen los gases de la atmósfera), la intensidad de la luz dispersada es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia. Por tanto, la intensidad dispersada correspondiente al azul y al violeta es considerablemente mayor que la del rojo (porque la luz roja, al ser de mayor longitud de onda, tiene menor energía y, por ende, menor frecuencia), y por eso vemos el cielo de color azul (y si no lo vemos violeta es porque la sensibilidad del ojo al violeta es mucho menor que al azul). De no haber atmósfera, veríamos el cielo de color negro.

Análogamente, el color rojo de los amaneceres y atardeceres se debe a que, en esos momentos, cuando el Sol está bajo, los rayos solares nos llegan tras un largo camino a través de la atmósfera después de haber sufrido mucha dispersión, y al haberse dispersado más la luz azul que la roja, esta última es capaz de atravesar más distancia (la luz azul “se queda por el camino”, al ir rebotando los “fotones azules” por la atmósfera). Por el contrario, cuando las partículas dispersoras son mayores que la longitud de onda, como ocurre con las aglomeraciones de gotitas de agua que forman las nubes, la dispersión es de tipo acromático, ya que afecta a todos los colores por igual, y por eso las nubes son blancas.

ADICIÓN Y SUSTRACCIÓN DE COLORES

La radiación reflejada o transmitida por un objeto es captada por nuestros ojos e interpretada en el cerebro como distintos colores. Cuando sobre una pantalla se proyectan diferentes haces de luces, vemos que cada haz aporta sus características propias, es una mezcla aditiva, y la conjunción de los colores primarios, rojo, verde y azul, da blanco. En cambio, al combinar pigmentos o filtros coloreados, la mezcla es sustractiva, porque cada color actúa como un filtro que sustrae a la luz una parte de sus radiaciones, y la superposición de los tres colores primarios da lugar al negro (en realidad, más bien a un gris oscuro).

En el caso de luces se produce una *mezcla aditiva*.^[9,23,26,28,31] En este caso, la tríada rojo (R) - verde (V) - azul (A), conocida también como RGB (*Red, Green, Blue*) se considera idealmente como el conjunto de *colores primarios* de la luz, ya que, con ella, se puede representar una gama muy amplia de colores visibles; la adición de los tres en iguales intensidades resulta en grises claros, que tienden idealmente al blanco ($V + A + R = B$). Los *colores secundarios* son los que se producen por combinación de dos colores primarios, y son amarillo ($AM = R + V$), cian ($C = V + A$) y magenta ($M = A + R$). Cada color secundario es un color complementario de uno de los colores primarios: el cian (C) es el color complementario del rojo (R); el magenta (M) del verde (V); y el amarillo (AM) del azul (A). Cuando se mezclan un color primario y su color complementario, el resultado es *luz blanca*.

Sin embargo, si bien la mezcla de luces es aditiva, la mezcla de pigmentos (por ejemplo, sobre un papel) es sustractiva, y por eso no tenemos cartuchos de R, V y A en nuestras impresoras. En la mezcla sustractiva de color,^[9,28,31,43] algunas de las longitudes de onda de la luz blanca son eliminadas por absorción, y la luz reflejada (por ejemplo, desde una superficie pintada o un tejido coloreado) o la luz transmitida (como se ve a través de un cristal o de una disolución) es coloreada. Esta síntesis sustractiva es la que tiene lugar al imprimir documentos en color, y los tres colores primarios son la tríada cian (C) - magenta (M) - amarillo (AM), a los que se une el color negro, lo que se conoce como modelo CMYK (*Cyan, Magenta, Yellow, black*). En este caso, los colores secundarios son verde ($V = C + A$), azul ($A = M + C$) y rojo ($R = M + A$). Si un material absorbe los tres colores primarios, no queda prácticamente luz para ser reflejada o transmitida y el material se muestra *negro* o casi negro ($C + M + A = N$). El negro generado por la mezcla de colores primarios sustractivos no es tan profundo como el color negro puro (uno que absorbe todo el espectro visible). Por ello, al sistema CMY original se le añade el cartucho negro en las impresoras, lo cual genera un mejor contraste.

El color que vemos en una pantalla de ordenador difiere del mismo color obtenido a través de una impresora, precisamente porque los modelos RGB y CMY(K) son distintos.

PERCEPCIÓN DEL COLOR

Decir que el color es energía electromagnética comprendida dentro del espectro visible es correcto desde un punto de vista físico, pero desde un punto bioquímico, fisiológico y psicológico esta definición es demasiado simple.

En última instancia, lo que denominamos “color” es un atributo psicológico de la luz. La relación entre luz y visión ya fue estudiada por los pensadores griegos,^[1,44] pero hubo que esperar hasta el siglo XI para que Alhacén formulara una teoría científicamente útil del problema. Actualmente, sabemos que la *percepción visual* se genera en nuestro cerebro al interpretar las señales nerviosas que le envían los fotorreceptores^[1,9,20,24,31,39,45] de la retina del ojo (conos y bastones), que realizan una transducción de luz en voltaje. Por un lado, los *conos* son los responsables de la visión de los colores (visión cromática). Por otro, los *bastones* son responsables de la visión en condiciones de baja luminosidad, aunque se saturan en condiciones de mucha luz y no detectan los colores. La sensación luminosa que percibimos puede cambiar según las condiciones del medio:^[1,9,26] se ha establecido que la máxima sensibilidad espectral del ojo humano en condiciones diurnas (visión *fotópica*) tiene lugar a una longitud de onda de 555 nm (amarillo-verdoso, zona en la que son más sensibles los conos), mientras que en condiciones nocturnas (visión *escotópica*) el pico se desplaza a 507 nm (azul-verdoso, donde son más sensibles los bastones). Este desplazamiento se conoce como *efecto Purkinje*.^[9,26]

Estas células fotorreceptoras son sensibles a la luz porque contienen moléculas de unos fotopigmentos denominados *opsinas*, de naturaleza proteica, que son capaces de absorber la luz en el espectro visible y producir cambios químicos que se traducen en señales nerviosas. En definitiva, el color se debe a la existencia de *procesos fotoquímicos* en la retina,^[20,24,31,45] algo que analizaron en el siglo XIX los fisiólogos Franz Böll y Wilhelm Kühne, trabajo que culminaría ya en el siglo XX George Wald, que fue galardonado con el premio Nobel en 1967 por sus trabajos sobre los fotopigmentos.

La molécula fotorreceptora de los bastones es la rodopsina, que absorbe luz de forma muy eficiente en torno a los 500 nm, que coincide de forma muy adecuada con la radiación solar. El color de la rodopsina y su respuesta a la luz depende de la presencia del *cromóforo* (parte de la molécula responsable de la absorción), que en este caso es el 11-cis-retinal (molécula adherida a las opsinas),^[20] que no por casualidad es un polieno con enlaces simples y dobles alternados. La absorción de luz induce una isomerización del 11-cis-retinal, lo cual es clave en el proceso de la visión.

Por otro lado, existen tres tipos diferentes de conos, y cada uno de ellos es sensible de forma selectiva a la luz de una longitud de onda determinada: verde, roja y azul. Esta sensibilidad específica se debe a la presencia de tres opsinas diferentes, que también utilizan el 11-cis-retinal como cromóforo: eritropsina (sensible al rojo), cloropsina (sensible al verde) y cianopsina (sensible al azul). Estas opsinas cambian de forma cuando interaccionan con la luz a la que son sensibles, lo cual es registrado por el nervio óptico y es traducido por nuestro cerebro como color. Cuando percibimos la luz solar como blanca, reflejada sobre una superficie, se están estimulando los tres tipos de receptores a la vez. Y cuando un objeto refleja ondas azules y rojas, nuestro ojo no percibe el color verde, sino que recrea un color magenta o púrpura (v. Tabla 1), resultado de la mezcla que hace el cerebro tras el estímulo de esas longitudes de onda.

Por otro lado, cuando el sistema de conos y bastones de una persona no es el correcto se pueden producir problemas en la percepción del color,^[9,24,31,46,47] lo que comúnmente se denomina *ceguera al color* o *daltonismo*. Así, la ceguera dicromática, uno de los diferentes tipos de daltonismo, proviene de la ausencia de uno de los tres pigmentos de los conos.

La visión del color se puede reducir a leyes matemáticas que fueron formuladas en 1853 por Hermann Grassmann.^[46] De las tres leyes de Grassmann del color, la que más nos interesa es la primera, que indica que el ojo humano normal solo percibe tres atributos de la luz: brillo, saturación y matiz^[9,46] (fijémonos en que también existen tres clases de pigmentos en los conos). Es decir, *dos imágenes tienen el mismo color si tienen el mismo matiz, brillo y saturación*. El matiz es el atributo que distingue un color de otro. El brillo depende de la intensidad del haz luminoso, y la saturación se refiere a la pureza del matiz (verbigracia: al superponer un haz blanco y un haz rojo, el resultado será una imagen rosa, y al aumentar la cantidad relativa de luz blanca, disminuye la saturación). Como cada color tiene solo tres atributos, se puede igualar un color de muestra

mezclando en cantidades apropiadas tres colores *primarios*. En el caso más simple, podemos decir que el color de una muestra se especifica por las intensidades X , Y , Z de los colores primarios necesarios para igualar su color.^[9,46]

Sin embargo, en la percepción del color también influyen otros factores, como el *lenguaje*: existen lenguas en las que no se diferencian algunos de los colores, como por ejemplo azul y verde, o naranja y amarillo.^[24] Por tanto, se podría decir que hay un sesgo cultural en la percepción del color. También se ha demostrado que nuestra percepción puede depender de nuestra *memoria*,^[20,24] así, un plátano nos puede parecer igual de amarillo bajo la luz solar o bajo la luz de una lámpara, aunque las longitudes de onda sean muy diferentes en cada caso, porque nosotros recordamos que el plátano es amarillo. Dicho de otro modo, luces con diferente espectro (diferente intensidad relativa de la luz frente a la longitud de onda) pueden ser percibidas por el ojo como si fueran del mismo color. De hecho, la mayor parte de la luz que percibimos está formada por más de una longitud de onda.^[46] Así, el análisis espectral de la luz reflejada en un libro azul mostraría que contiene todas las longitudes de onda, aunque habrá mayor intensidad de luz procedente del extremo azul del espectro, y por eso identificamos el libro como “azul”. Asimismo, también influye el *contexto*: sin un contexto adecuado, personas diferentes percibirán un mismo color en una fotografía de forma distinta, porque sus cerebros tenderán a “verlo” con luz de mañana o luz de tarde (según el momento del día en que la persona vea la foto). Esto fue lo que pasó con el famoso debate^[24] a través de las redes sociales sobre el color de un vestido en 2015 (https://verne.elpais.com/verne/2015/02/27/articulo/1425025733_797891.html) que para algunos era blanco y dorado, y para otros negro y azul.

CONCLUSIONES

En la percepción del color de un objeto determinado intervienen tres factores: el tipo de luz, la composición química del objeto y el observador, que interpreta una determinada composición espectral en términos de color, y en dicha interpretación puede haber efectos tanto fisiológicos como psicológicos.

Teniendo en cuenta estos factores, y habiendo visto algunos de los muchos y variados fenómenos que pueden contribuir al color de las cosas, parece claro que la típica pregunta “¿de qué color es?” es mucho más complicada de responder de lo que parece a primera vista.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barbero, S.; Dorronsoro, C.; Gonzalo, J. *La Luz: Ciencia y Tecnología*; CSIC y Los Libros de la Catarata: Madrid, 2015.
- [2] Sánchez Ron, J. M. *El Jardín de Newton: La Ciencia a Través de Su Historia*; Editorial Crítica: Barcelona, 2009.

- [3] Udías Vallina, A. *Historia de La Física. De Arquímedes a Einstein.*; Editorial Síntesis: Madrid, 2004.
- [4] Gamow, G. *Biografía de La Física*; Alianza Editorial: Madrid, 1980.
- [5] Serrano Pérez, J. J. La Ciencia de La Luz: En La Frontera Entre La Física y La Química. *Rev. Española Física* **2013**, *27* (3), 35-42.
- [6] Marhuenda, P. G. *La Naturaleza de La Luz: Breve Historia Bibliográfica*; Publicacions de la Universitat de València: Valencia, 2018.
- [7] De León, M.; Timón, Á. *Las matemáticas de la luz*; Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y Los libros de la Catarata: Madrid, 2017.
- [8] Socorro Leránoz, A. B. *Destellos de Luz*; Universidad Pública de Navarra: Pamplona, 2015.
- [9] Catalá, J. *Física*; Fundación García Muñoz: Madrid, 1988.
- [10] Tipler, P. A. *Física Para La Ciencia y La Tecnología*, 4.ª edición; Editorial Reverté: Barcelona, 2001; vols. I y II.
- [11] Rex, A. F.; Wolfson, R. *Fundamentos de Física*; Pearson: Madrid, 2011.
- [12] Serway, R. A.; Jewett, J. W. *Física Para Ciencias e Ingeniería*, 7.ª edición; CENGAGE Learning: México DF, 2009.
- [13] Requena, A.; Zúñiga, J. *Espectroscopía*; Editorial Pearson Prentice-Hall: Madrid, 2004.
- [14] Levine, I. N. *Espectroscopia Molecular*; Editorial AC: Madrid, 1980.
- [15] Miret Artés, S. *Mecánica cuántica*; Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y Los libros de la Catarata: Madrid, 2015.
- [16] Atkins, P. W. *Química Física*, 6.ª edición; Editorial Omega: Barcelona, 1999.
- [17] Skoog, D. A.; Holler, F. J.; Nieman, T. A. *Principios de Análisis Instrumental*, 5.ª edición; Editorial McGraw-Hill: Madrid, 2000.
- [18] Harris, D. C. *Análisis Químico Cuantitativo*; Grupo Editorial Iberoamérica: México DF, 1992.
- [19] Levine, I. N. *Fisicoquímica*, 5.ª edición; Editorial McGraw-Hill: Madrid, 2004; Vol. I y II.
- [20] Martínez-Bordiu, M.; Oliart, S.; Hernando, A. El Color: Estética y Ciencia. *Rev. Española Física* **2019**, *33* (3), 23-30.
- [21] Fidalgo, J. A.; Fernández, M. R. *Física General*, 8.ª edición; Editorial Everest: León, 2000.
- [22] Conkling, J. A. *Pirotecnia. Investig. Cienc.* **2002**, *Temas 27 El Color*, 48-55.
- [23] Roque, G. Color y Luz. *Investig. Cienc.* **2002**, *Temas 27 E*, 4-7.
- [24] Martínez Ron, A. *El Ojo Desnudo*; Editorial Crítica: Barcelona, 2016.
- [25] Lewin, W.; Goldstein, W. *Por Amor a La Física*; Debolsillo: Barcelona, 2012.
- [26] Frova, A. *Por Qué Sucede Lo Que Sucede*; Alianza Editorial: Madrid, 1999.
- [27] Moysés Nussenzeig, H. Teoría Del Arco Iris. *Investig. y Cienc. Temas 6 La Cienc. la luz* **2001**, *6*, 2-14.
- [28] Nassau, K. Las Causas Del Color. *Investig. y Cienc. Temas 27 El Color* **2002**, *27*, 8-25.
- [29] Chang, R.; Goldsby, K. A. *Química*, 12.ª edición; McGraw-Hill: Madrid, 2017.
- [30] Casabó, J. *Estructura Atómica y Enlace Químico*; Editorial Reverté: Barcelona, 1996.

- [31] García Bello, D. *Todo Es Cuestión de Química*; Paidós: Barcelona, 2016.
- [32] Braun, C. L.; Smirnov, S. N. Why Is Water Blue? *J. Chem. Educ.* **1993**, *70* (8), 612.
- [33] Miranda, R. Efectos de Tamaño Cuántico y Su Importancia Para La Reactividad y Estabilidad de Nanoestructuras. *Rev. madri+d (Nanociencia y nanotecnología II)* **2006**, *35* (marzo-abril).
- [34] Oliva, J. M. Copa de Licurgo: Cuando Ciencia y Arte Se Dan La Mano Para Hacer Historia. *MoleQla Rev. Ciencias la Univ. Pablo Olavide* **2013**, *11*.
- [35] Freestone, I.; Meeks, N.; Sax, M.; Higgitt, C. The Lycurgus Cup – A Roman Nanotechnology. *Gold Bull.* **2007**, *40* (4), 270-277.
- [36] Serena Domingo, P. A. *La nanotecnología*; Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y Los libros de la Catarata: Madrid, 2010.
- [37] García, J. V. *Las moléculas: cuando la luz te ayuda a vibrar*; Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y Los libros de la Catarata: Madrid, 2014.
- [38] Clayden, J.; Greeves, N.; Warren, S.; Wothers, P. *Organic Chemistry*; Oxford University Press: Nueva York, 2001.
- [39] Calle, D. *¿Cuánto Pesan Las Nubes? Y Otras Sencillas Preguntas y Sus Respuestas Científicas.*; Plaza & Janés, Ed.; Barcelona, 2018.
- [40] Walker, J. Difusión Óptica. *Investig. y Cienc. Temas 27 El Color* **2002**, *27*, 26-29.
- [41] Bohren, C. F.; Fraser, A. B. Colors of the Sky. *Phys. Teach.* **1985**, *23* (5), 267-272.
- [42] Young, A. T. Rayleigh Scattering. *Phys. Today* **1982**, *35* (1), 42-48.
- [43] Roque, G. Color y Luz. *Investig. y Cienc. Temas 27 El Color* **2015**, *27*, 4-7.
- [44] Barbero, S. *Cómo funcionan nuestras gafas*; Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y Los libros de la Catarata: Madrid, 2014.
- [45] Stryer, L.; Berg, J. M.; Tymoczko, J. L. *Bioquímica*, 5.ª edición; Editorial Reverté: Barcelona, 2003.
- [46] Cromer, A. H. *Física Para Las Ciencias de La Vida*, 2.ª edición; Editorial Reverté: Barcelona, 1981.
- [47] Mulet, J. M. *¿Qué Es La Vida Saludable?*; Ediciones Destino (Editorial Planeta): Barcelona, 2019.

