

Gabriela Grzib Schlosky
Pilar Quirós Expósito

DEPARTAMENTO DE PSICOLOGÍA BÁSICA II

LUZ COLOR Y EL OJO HUMANO

The logo of the Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) is a black square containing the white letters 'UNED' in a stylized, bold, sans-serif font.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

ÍNDICE

¿DE QUÉ SE TRATA Y POR QUÉ SE HA REALIZADO ESTE VÍDEO?	3
¿A QUIÉN VA DIRIGIDO?	4
OBJETIVOS QUE PRETENDE CUBRIR.....	4
COMENTARIOS AL CONTENIDO DEL VÍDEO	5
Introducción	5
La luz como estímulo visual.....	5
Luz y color	8
Los ojos receptores de la luz	9
El ojo como lente.....	9
La transducción de la energía luminosa en energía nerviosa	13
La visión del color	16
La teoría física del color	16
El procesamiento del color.....	18
El orden óptico	19
ORIENTACIONES DIDÁCTICAS	20
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	20
BIBLIOGRAFÍA BÁSICA.....	22

¿DE QUÉ SE TRATA Y POR QUÉ SE HA REALIZADO ESTE VÍDEO?

Los procesos de sensación y percepción tratan de explicar nuestra relación con el mundo. ¿De qué forma extraemos la información que es relevante?, ¿de qué forma la procesamos e interpretamos? En este vídeo nos centramos en el sentido de la visión, en sus aspectos elementales, sin llegar a exponer los modelos computacionales que intentan explicar de qué forma se genera el conocimiento en nuestra mente. El plano de análisis en el que nos situamos es mucho más elemental. Partimos de la premisa de que el sistema visual humano se ha desarrollado a lo largo de miles de años para extraer la información del mundo que nos rodea de forma óptima. En este sentido se considera que existe una estrecha relación entre los estímulos que surgen por la acción de la luz y el instrumento óptico que son nuestros ojos. Esta idea proporciona la base de la estructuración del vídeo. En lo que concierne al análisis de los estímulos visuales, se tratan los fenómenos físicos que son consecuencia del choque de la luz con la atmósfera y la superficie de la tierra. En segundo lugar se analiza la forma en que nuestros ojos captan esta luz, la procesan y transducen su energía en energía nerviosa y su conducción hasta el cerebro. En el análisis del proceso visual, limitado a estos aspectos básicos y elementales, después de efectuar un análisis con luz acromática se abordan específicamente los patrones de color debidos a fenómenos físicos y el procesamiento del color por la retina. Los aspectos psicológicos que se tratan son principalmente los fenómenos de contraste, la constancia del brillo y del color y el color inducido.

En este vídeo no nos hemos limitado a la mera exposición de hechos sino que intentamos profundizar en los procesos: Así los patrones de luz se explican desde la física. En la visión se ilustra la función del ojo como lente, estudiando el concepto de acomodación y se ilustra su funcionamiento. Se explica la retina como red neuronal que realiza un primer procesamiento del estímulo mediante la inhibición lateral. En cuanto al color se ilustra la mezcla aditiva y sustractiva y la forma en que surge el color gracias a los fenómenos físicos de reflexión, refracción, absorción y difusión, ilustrando dichos aspectos prácticamente mediante mezclas de luz, utilización de filtros y análisis de ejemplos concretos, como el color del cielo y de un prado en un día soleado. El procesamiento del color basado en la teoría tricromática y la teoría del proceso oponente se explica esquemáticamente y se demuestra apoyándose en el experimento psicofísico de cancelación del color de Hurvich y Jameson. Igualmente se define y diferencia los parámetros más usados en la medición de aspectos de la luz y del color: iluminación, luminancia, color, saturación y el brillo. Se pone especialmente énfasis en la explicación de la apreciación de bordes, contrastes de brillo y de color, así como en lo contrario, la constancia del brillo y del color. Dos ideas especialmente

importantes que se trata de transmitir son las siguientes: una primera que se refiere al hecho de que el sistema visual lo que procesa son aspectos relativos, no objetivos de las variables señaladas; y una segunda que intenta que el espectador comprenda que el color no es inherente a los objetos, sino una consecuencia de los fenómenos físicos de la luz y que estos fenómenos son los que nuestros ojos transforman en la sensación de color o dicho de forma llana, sin luz, no hay color.

La razón que nos ha movido a realizar este vídeo son las dificultades observadas en los alumnos al acercarse al estudio de los procesos de sensación y percepción. Por regla general, los aspectos que se han unido aquí: físicos, fisiológicos y psicológicos se estudian en asignaturas diferentes, a veces separadas en el tiempo. La física de la luz se suele dar por sabida desde el bachillerato, algunos aspectos referentes al ojo, suelen estudiarse en fisiología, y en temas de sensación y percepción se estudian umbrales, procesos de adaptación, sensibilidad, agudeza, efectos de contraste y constancia, y teorías y modelos computacionales explicativos que tratan de aprehender la manera en que surge el significado a partir de los procesos de sensación y percepción elementales. Este proceder es la razón por la que se pierde uno de los aspectos que nos parece esencial y fascinante, la sintonía que existe entre los procesos que realiza nuestro sistema visual en las primeras etapas de procesamiento y los estímulos del mundo que en gran medida son fruto de la acción de la luz.

¿A QUIÉN VA DIRIGIDO?

En principio este vídeo fue concebido para los alumnos que se inician en el estudio de la percepción, en las carreras de Psicología, Ciencias de la Educación y Filosofía. También puede ser de utilidad en los cursos de mayores de 25 años de introducción a la Psicología. Además puede tener también utilidad para personas interesadas en el estudio de los efectos de la luz y del color, como estudiantes de imagen y sonido, de fotografía, gráfica y pintura, puesto que el vídeo proporciona unos conocimientos básicos sobre los cuales pueden construirse conocimientos más específicos.

OBJETIVOS QUE PRETENDE CUBRIR

1. Proporcionar conocimientos básicos sobre la naturaleza de la luz.
2. Explicar y demostrar los fenómenos de reflexión, refracción, difusión y absorción de la luz y los efectos sobre su carácter como estímulo visual.
3. Proporcionar una definición de los principales parámetros de medida de la luz y del color.
4. Demostrar el funcionamiento del ojo como lente.
5. Explicar la estructura y el procesamiento de los estímulos en la retina.
6. Detallar el proceso de inhibición lateral y sus efectos perceptuales.
7. Ilustrar la teoría física de mezcla de color.
8. Esquematizar el procesamiento del color en la retina.
9. Señalar las vías de conducción de la “salida” del procesamiento de la retina hacia la corteza y la representación cortical.
10. Demostrar el alcance de la teoría oponente de codificación del color.
11. Experimentar el orden óptico y relacionado con la percepción.

COMENTARIOS AL CONTENIDO DEL VÍDEO.

Introducción

Gracias a nuestros sentidos sabemos que hay un mundo que nos rodea, lleno de objetos que parecen corresponder a una realidad física. La mayoría de nosotros vemos personas, animales, árboles, casas, coches, muebles, libros, etc. En nuestro quehacer diario nos fiamos de nuestras percepciones. Esta capacidad probablemente es el resultado de una adaptación al ambiente a lo largo de la filogénesis pero también durante la ontogénesis y tiene valor de supervivencia. El desarrollo de sistemas sensoriales especializados en captar determinadas energías es el resultado de la evolución. Los ojos han evolucionado para captar la luz que nuestro cerebro es capaz de interpretar de una forma significativa. Si nos proporcionan un golpe en un ojo, es frecuente que tengamos una sensación visual. La expresión “ver las estrellas” es un dicho que describe esta experiencia, no obstante nuestros ojos, aunque responden a estimulación mecánica como la señalada, no están diseñados para captar esta clase de energía, su función es la de recibir y procesar los estímulos luminosos.

La luz como estímulo visual

La pretensión de entender el fenómeno de la luz ha ocupado a la humanidad desde sus inicios, a los filósofos y los científicos. En su libro: *Catching the Light*, A. Zajonc relata la observación de uno de los astronautas del Apollo, Rusty Schweikart, cuando éste realiza su paseo espacial. Como refiere, mirando hacia el vacío del espacio exterior, no permitiendo la intrusión en el campo visual de la nave y de otros instrumentos iluminados por el sol, lo que se percibe es la profundidad inmensa y oscura del espacio sembrado de los destellos de innumerables estrellas. La luz del sol, aunque omnipresente, no recae sobre nada y por ello nada puede verse. Sólo hay oscuridad, llena de luz no visible del sol. Sin un objeto que pueda ser iluminado, sólo se ve oscuridad. La luz es siempre invisible, sólo vemos las cosas, los objetos, no la luz.

Físicamente la luz puede describirse como una onda o como una partícula. En sentido estricto, la luz es parte del espectro electromagnético y comprende un rango aproximado entre 400 y 700 nm y cuando la luz es muy intensa incluso entre 380 - 780 nm.

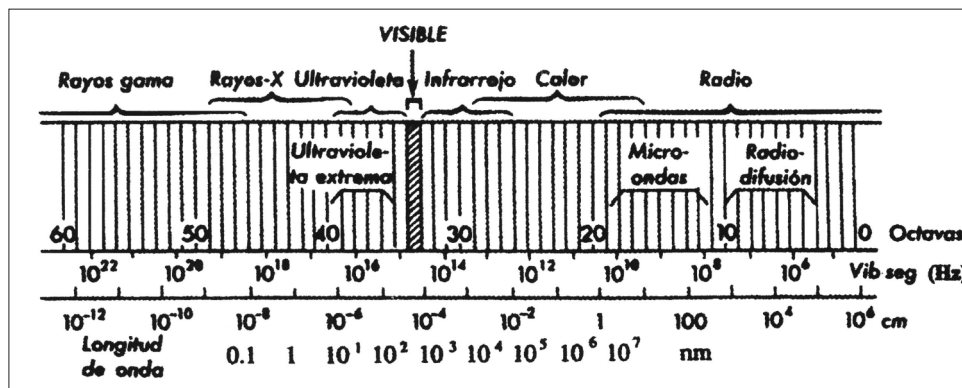


Figura 1. Cuadro completo de longitudes de onda y frecuencias del espectro electromagnético

En este rango de frecuencias, las ondas electromagnéticas son visibles al ojo humano. La luz blanca, en especial la luz del sol, contiene todas las longitudes de onda es, por tanto, una mezcla de ondas. Newton fue el primero en demostrar que a cada longitud de onda se asocia un determinado color. Colocando un prisma de forma que caían sobre el mismo los rayos que penetraban por una apertura pequeña en la persiana de su ventana y se reflejaban en la pared de enfrente, observó que se formaba una franja, que se denomina **dispersión**, de 7 colores. Para describir la dispersión de colores obtenidos, Newton acuñó la palabra **espectro**.

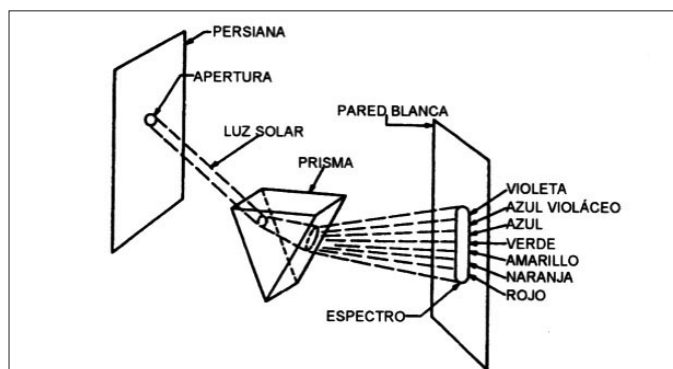


Figura 2. La producción del espectro por Newton

Newton señaló expresamente que había muchos más colores que los siete referidos. De hecho existen innumerables combinaciones de colores y, en consecuencia, de matices diferentes. Asimismo, mediante una nueva combinación de los colores espectrales utilizando un segundo prisma, Newton volvió a obtener luz blanca. Luego, la luz blanca es una mezcla de las diferentes longitudes de onda entre 400 y 700 nm.

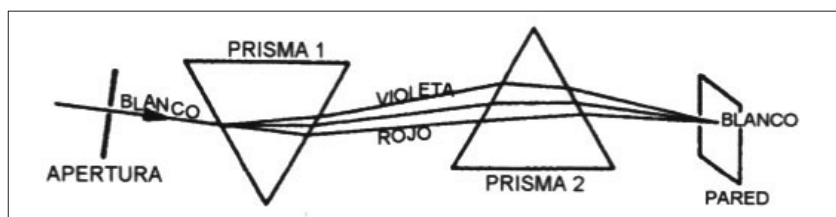


Figura 3. Recombinación del espectro en luz blanca mediante un segundo prisma según Newton

La partícula más pequeña de luz de color espectralmente pura se denomina fotón. Un fotón puede comportarse de dos formas muy diferentes: por una parte puede moverse a la velocidad de la luz en el vacío llevando una determinada cantidad de energía; por otra parte, puede comportarse como onda que se propaga en el espacio con una longitud de onda determinada. Ambos aspectos son diferentes manifestaciones de una misma realidad. En el estudio de la percepción, la luz hay que considerarla tanto como partícula que como onda.

Como unidades de medida de la luz se usan bien unidades de longitudes de onda, como el nanómetro, bien de frecuencia en unidades de Hz (Hertzios) o bien unidades de energía, como el electronvoltio (eV).

Tabla 1. Resumen de unidades de medida de la luz según longitud de onda, frecuencia y energía en eV

Color	Longitud de onda * λ (nm)	Frecuencia V (Hz)	Energía (eV)
Rojo (límite)**	700	$4,28 \times 10^{14}$	1,77
Rojo	650	$4,61 \times 10^{14}$	1,91
Naranja	600	$5,00 \times 10^{14}$	2,07
Amarillo	580	$5,17 \times 10^{14}$	2,14
Verde (amarillento)	550	$5,45 \times 10^{14}$	2,25
Cian	500	$6,00 \times 10^{14}$	2,48
Azul	450	$6,66 \times 10^{14}$	2,76
Violeta (límite)**	400	$7,50 \times 10^{14}$	

* Valores típicos

** Los límites dependen del observador y de la adaptación del ojo y pueden, según las condiciones, variar de 380-780 nm.

En un medio homogéneo, la luz viaja en línea recta. El camino de la luz se corresponde con el llamado “rayo” en óptica geométrica. Generalmente no miramos directamente a las fuentes de luz, sino que la luz que percibimos es la que reflejan los objetos de nuestro entorno. En el mundo real, las fuentes que reflejan luz no lo hacen de manera uniforme; por el contrario la emisión de luz varía en función de los ángulos de incidencia y del grado de reflectancia de los objetos, es decir, si el rayo es reflejado totalmente en una sola dirección o en más de una y si además es o no absorbido total o parcialmente.

Si en un transcurso de un rayo pasa de un medio a otro, por ej. si pasa de la atmósfera a un medio transparente puede traspasar ese medio, puede ser reflejado, absorbido o refractado total o parcialmente. Si la luz encuentra un medio no completamente transparente puede sufrir una difusión. Este es uno de los fenómenos que explican el hecho de ver el cielo color azul claro los días soleados.

Cuadro resumen

La luz que percibimos es luz reflejada: la cantidad de luz que refleja un objeto es la reflectancia. La reflectancia se define como la proporción de luz reflejada con respecto a la incidente. Depende de:

- *Características de la superficie.*
 - Igualdad o desigualdad de la superficie:
 - Superficie de espejo: reflexión perfecta
 - Superficie desigual: reflexión con diferentes ángulos.
 - Color de la superficie:
 - Color blanco: reflexión total
 - Color negro: reflexión ausente, absorción total
 - Otros colores: reflexión diferencial de algunas longitudes de onda y absorción de otras. La adición de las ondas reflejadas da lugar a un color determinado.
- *Características del medio de propagación:*
 - Medios traslúcidos:
 - Refracción de la luz. Desviación de la trayectoria original debido al cambio de velocidad de la luz al penetrar en el medio traslúcido.
 - Medio no totalmente traslúcido:
 - Difusión: fenómeno que ocurre porque los fotones se adhieren a las partículas del aire y posteriormente son cedidos en todas las direcciones. La velocidad de propagación de estas partículas varía según la longitud de onda con la que se propagaría normalmente.

La luz ilumina las superficies, la cantidad de iluminación depende de la intensidad de la fuente luminosa dividida por la distancia al cuadrado de la fuente de iluminación a la superficie. Esta corrección en función de la distancia es necesaria porque, a medida que la superficie está más alejada de la fuente, se capturan menos rayos de fotones, debido a que el ángulo sólido formado por los rayos es menor¹. Específicamente el número de haces de fotones (definidos como el tamaño del ángulo sólido que forma la superficie con respecto a la fuente de luz) varía inversamente con el cuadrado de la distancia de la superficie radiante a la fuente de la luz. La iluminación nos indica la cantidad de luz que cae sobre una superficie. La mayoría de las veces, en percepción lo que percibimos es la luz que refleja una superficie. La cantidad de luz que alcanza a nuestros ojos, procedente de una superficie que refleja luz, depende de la reflectancia de la misma. La reflectancia se obtiene calculando la razón entre la luz incidente sobre una superficie y la luz reflejada por la misma. Generalmente se expresa mediante porcentajes. Un ejemplo de una superficie con reflectancia del 100 % es decir perfecta, sería un espejo.

La luz de una superficie reflectante que alcanza los ojos del observador es la luminancia. La luminancia es igual a la iluminación multiplicada por la reflectancia. La luminancia es la misma independientemente de la distancia del observador con respecto al objeto que refleja la luz. Es

¹ Ángulo sólido es la superficie tridimensional del cono de una esfera de luz a una distancia de 1m de su origen.

obvio que la luz que alcanza a los ojos mirando una fuente de luz directamente y la que procede de un espejo que la refleja al 100 % es la misma, es decir, en este caso, la iluminación y la luminancia tienen el mismo valor.

Lo que percibe el observador es el brillo del objeto que, a su vez, depende de tres aspectos: a) de la luminancia del objeto; b) de las condiciones de adaptación del ojo y e) de la(s) superficie(s) adyacentes al objeto, de los llamados efectos de contraste. El brillo se mide con métodos psicofísicos. La luminancia objetiva tiene influencia sobre el brillo, sin embargo, el sistema visual procesa aspectos relativos, que dependen de la iluminación de la figura y del fondo, no luminancias aisladas de valores absolutos.

Tabla 2. Niveles de luz típicos en el ambiente normal (escala de luminancia en nit)

Superficie del sol al mediodía	10 ¹⁰	
	10 ⁹	Dañino
	10 ⁸	
Bombilla eléctrica	10 ⁷	
	10 ⁶	
	10 ⁵	
Papel blanco a la luz del sol	10 ⁴	visión fotópica
	10 ³	
	10 ²	
	10 ¹	
Lectura cómoda	10	
	1	Visión fotópica y escotópica conjunta
Papel blanco a la luz de la luna	10 ⁻¹	
	10 ⁻²	
Papel blanco a la luz de las estrellas	10 ⁻³	
	10 ⁻⁴	Visión escotópica
	10 ⁻⁵	
Umbral absoluto	10 ⁻⁶	

La unidad de medida de luminancia en el Sistema Internacional es el nit (del latín nitro = brillo, fulgor). Un nit es igual a la luminancia de una bujía/m². Como muestra la tabla, el rango de luminancia al que responde el sistema visual tiene una amplitud de trece órdenes de magnitud. La respuesta se divide en un rango fotópico (visión diurna), desde uno a 10 millones (10⁷) de nit, y un rango escotópico (visión nocturna) que iniciándose aproximadamente en "1" (10⁰) nit llega hasta el umbral absoluto 0,000001 (10⁻⁶) nit. Dado este amplísimo rango de sensibilidad, no es práctica la utilización de los valores reales de luminancia o intensidad de la luz en los gráficos, por lo que se utiliza una transformación logarítmica. En esta escala decir que la sensibilidad disminuye en una unidad logarítmica significa que se necesitará 10 veces la intensidad para obtener el mismo efecto en el sistema visual.

Luz y color

Cuando la luz cae sobre un objeto no sólo percibimos la luminancia del mismo sino también su color. Como hemos visto al hablar del experimento de descomposición espectral de la luz de Newton, la luz blanca se compone de diferentes longitudes de onda, cada una correspondiente a un color. Como Newton observó Correctamente, una luz espectral únicamente puede ser más o menos reflejada de la superficie de un objeto; si la reflexión es uniforme la luz permanecerá cualitativamente sin cambio. De modo que al caer luz blanca sobre la superficie de un objeto, si la luz reflejada contiene aproximadamente la misma proporción de todas las longitudes de onda que la componen, el objeto se percibirá blanco, gris o negro. dependiendo de la cantidad de luz que se

refleja no-selectivamente. La reflexión selectiva de las diferentes longitudes de onda generalmente hace que percibamos un determinado color. Por ejemplo, si las longitudes de onda larga se reflejan en mayor medida que las cortas, dependiendo de la composición y la cantidad de reflexión, percibiremos una superficie u objeto de color amarillo, rojo, naranja o marrón.

La característica más importante del color es el matiz o lona, que depende de la(s) longitud(es) de onda que refleja un objeto. Se trata de un aspecto cualitativo de carácter descriptivo. La luminancia del color es una magnitud física y corresponde a su energía fotométrica. El color además tiene siempre saturación y brillo. La saturación indica la cantidad de luz blanca que contiene. Cuanto menor es la cantidad de luz blanca que se mezcla con un color más saturado es éste. Por ej., el rojo es más saturado que el rosa. El brillo es una magnitud sensorial psicológica. La luminancia objetiva y el brillo tienen una alta correlación, aunque el brillo además depende de determinados factores: como la adaptación de los ojos a la cantidad de luz y el contraste con las superficies adyacentes a un objeto.

Los ojos receptores de la luz

Nuestros ojos son las estructuras sensibles que captan la información que resulta de la reflexión diferencial de la luz. Son el resultado de una adaptación progresiva a lo largo de la evolución, a las demandas del medio y a nuestro modo de vida. La función del ojo es doble: por una parte opera como lente y por otra transduce los estímulos luminosos en estímulos neuronales. Como hemos dicho, la luz consiste en pequeñas partículas, llamadas fotones, que tienen una determinada energía y que pueden comportarse como partículas o como ondas. Hablando de la óptica del ojo haremos referencia a la teoría de ondas, en cambio, cuando se trate de explicar la absorción de la luz por los pigmentos de los fotorreceptores será necesario referirnos a la teoría de partículas de la luz.

El ojo como lente

Un requisito para poder ver un objeto es discernir su existencia. Para poder reconocer un objeto es necesario extraer la información relevante al mismo del complejo patrón de rayos luminosos que existe en el mundo real.

El primer paso en el proceso de visión es la formación de una imagen del objeto sobre la retina. Los medios refractivos del ojo funcionan como una lente convergente, es decir, todos los rayos luminosos que alcanzan el ojo desde una dirección del espacio convergen en un punto. En la fig.4 se ha representado la refracción de la luz por una lente convergente.

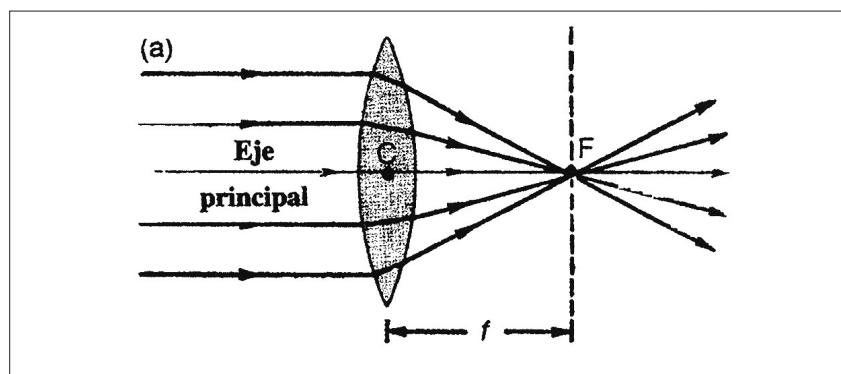


Figura 4. Lente convergente

El eje principal de la lente es la línea recta que pasa por el centro de la misma. El foco principal F está situado sobre el eje principal. Para una lente convergente, el foco F se define como el punto donde se reúnen los rayos luminosos paralelos al eje. Por simetría, cada lente tiene dos focos

principales, uno a cada lado de la lente y a la misma distancia del centro de la misma. La distancia desde el punto focal al centro de la lente se llama distancia focal, por ello:

$$CF = \text{distancia focal} = f.$$

El plano perpendicular al eje que pasa por cada foco principal se llama plano focal. Los rayos luminosos paralelos que entran en la lente desde otra dirección que la indicada en la Fig.4, vendrán a converger en un foco en algún punto del plano focal. Este punto puede localizarse fácilmente si se tiene en cuenta que el haz central no cambia de dirección. Cuando mayor sea la curvatura de una lente, menor será su distancia focal, porque a mayor curvatura mayor será la desviación de los rayos que atraviesan los bordes de la lente. Cuando se coloca un objeto a un lado de la lente convergente, más allá del foco principal, se forma una imagen real en el lado opuesto de la lente que es invertida de anibalabajo y derecha izquierda. Esto se muestra en la fig.5

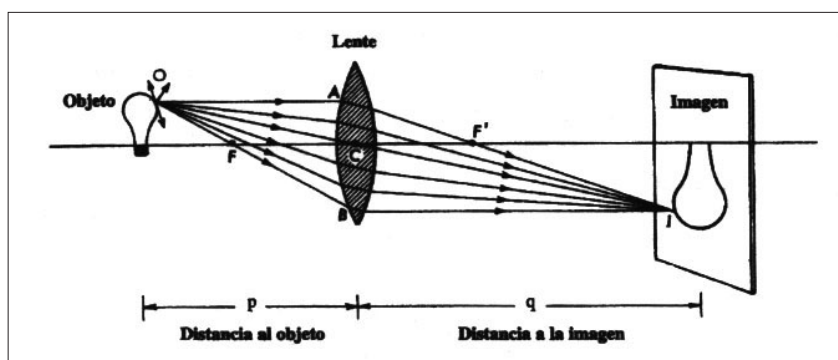


Figura 5. Diagrama de rayos y formación de una imagen real por medio de una lente convergente

Mediante el uso de la fórmula de las lentes se puede determinar la posición de una imagen, conocidas la posición del objeto y la distancia focal.

$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$ donde, según fig. 5, p es la distancia desde el centro de la lente al objeto, q la distancia del centro de la lente a la imagen y f la distancia focal. Si f se mide en metros, $\frac{1}{f}$ tiene unidades de dioptrías (D). La potencia de la lente tiene unidades de dioptrías.

A medida que el objeto se acerca al punto focal de la lente, la imagen es más grande, aunque también se aleja más del plano focal y será más borrosa. A medida que el objeto se separa de la lente, la imagen se forma más cerca del plano focal pudiendo adelantarse a éste. En este caso, la imagen será de dimensiones más pequeñas y también será borrosa. En la cámara fotográfica, a medida que la distancia del objeto varía, la imagen se mantiene enfocada sobre la película cambiando la distancia entre la lente y la película, variando la apertura del diafragma, o ambas cosas a la vez. Veremos seguidamente cómo se resuelve este problema en el ojo de los vertebrados, en especial, en el ojo humano.

En el ojo humano hay cuatro superficies refractantes que conjuntamente producen el efecto de una lente convergente: la córnea, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo. La potencia de refracción de cada superficie está determinada tanto por su curvatura, como por la diferencia entre los índices de refracción (IR) de los medios situados a uno y otro lado. Bruce & Green (1992) indican un IR de 1,376 para la córnea del ojo humano. Esto significa que la córnea tiene una considerable potencia y, consecuentemente, sólo requiere un cristalino relativamente plano para la acomodación visual. Medida en dioptrías, la superficie frontal de la córnea proporciona 49 de las 59 dioptrías totales del ojo humano. El cristalino aporta pues en torno a 10 D de potencia óptica. Por esta razón, la separación de la retina del cristalino relajado, es decir, la distancia focal, es $1159 = 0,017 \text{ m} = 17 \text{ mm}$.

Si tanto la lente como la distancia de la lente a la retina permanecen constantes, sólo los objetos situados a una determinada distancia del ojo formarán una imagen sobre la retina. Esta dis-

tancia no es fija sino que se trata de un intervalo de distancias, dentro del cual los objetos quedan enfocados. Esto es lo que se entiende por **profundidad de campo**. En el ojo humano, la profundidad de campo varía aproximadamente de seis metros hasta el infinito.

Explicación de la profundidad de campo

La profundidad de campo se explica por el hecho que la retina tiene cierto grosor. Si se supone un grosor de 0,05 mm, aplicando la fórmula de la lente, podemos demostrar que este estrecho margen de grosor explica el intervalo de enfoque óptimo que varía desde 6 m al infinito.

Recordando que

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (m) \text{ Sabemos que } f = 17 \text{ mm,}$$

suponiendo dos valores de q: q = 17 mm y q = 17,05 mm resulta:

$$\text{para } q = 17 \text{ mm} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{17} = \frac{1}{17} \quad p = \infty$$

$$\text{para } q = 17,05 \text{ mm} \quad \frac{1}{p} = \frac{1}{17} - \frac{1}{17,05} = \frac{0,05}{289,85} = 5797 \text{ mm}^{-1}$$

$$p \approx 5,8 \text{ m}$$

Para enfocar objetos a una distancia menor de seis metros, el ojo humano se vale de la **acomodación**.

La solución que ha adoptado la evolución para enfocar objetos localizados a una distancia menor de seis metros para la especie humana es el cambio de curvatura del cristalino, hecho que es posible gracias a los músculos ciliares. El engrosamiento de una lente cambia su potencia. En el ojo humano, la potencia puede ajustarse en una extensión de hasta quince dioptrías. Con la edad, estos mecanismos de ajuste disminuyen, lo que se conoce como vista cansada.

El proceso de acomodación

El ojo humano tiene la particularidad de que puede variar la distancia focal gracias al proceso de acomodación.

Cuando miramos un objeto alejado a una distancia de más de seis metros, los rayos luminosos procedentes de este punto llegan de forma casi paralela al ojo. En el ojo humano normal, la córnea proporciona la mayor parte de refracción, el cristalino mantiene una forma plana y los rayos confluyen en un único punto sobre la retina.

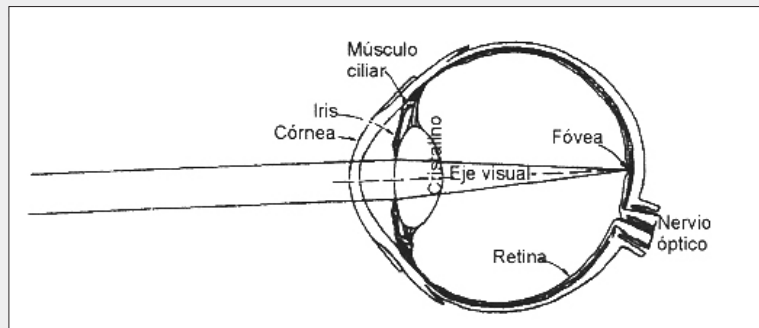


Figura 6a. Formación de una imagen retiniana estando el objeto cercano

Al acercar el objeto al ojo, los rayos dejan de ser paralelos. En consecuencia, el punto teórico en el que se focalizará la imagen, si el cristalino se mantiene plano, se desplaza a una posición que queda por detrás de la retina.

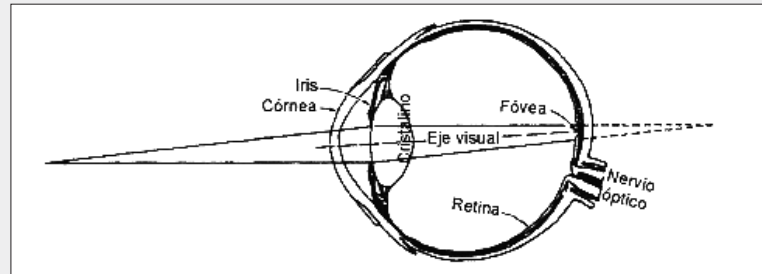


Figura 6b. Formación de una imagen retiniana estando el objeto cercano sin que haya acomodación

En este caso, la refracción que proporciona la córnea ya no es suficiente para enfocar el objeto. Gracias al proceso de acomodación, en el que la contracción de los músculos ciliares disminuye la tensión del cristalino, la curvatura del cristalino aumenta, haciéndose más convergente, por lo que el plano focal se traslada hacia adelante. De esta manera se consigue que también en distancias cortas la imagen caiga sobre la retina.

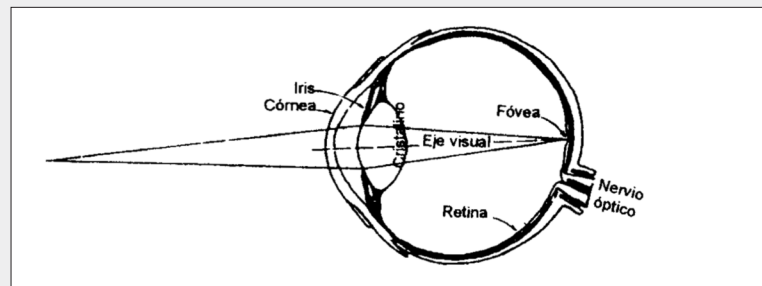


Figura 6c. Formación de una imagen retiniana estando el objeto cercano cuando hay acomodación

La visibilidad de un objeto varía con la distancia respecto al observador, pero también con su tamaño. Se pueden detectar objetos muy pequeños cuando se encuentren próximos a los ojos del observador. Por otra parte, un objeto muy grande puede no ser detectado si está a una gran distancia. El ángulo visual de un objeto se define como el ángulo entre dos rayos que provienen de cada uno de los extremos del objeto y que se cruzan en el plano del cristalino. En la fig. 7 se ha representado el ángulo visual de un objeto de 2 cm, situado a una distancia del ojo de 25 cm.

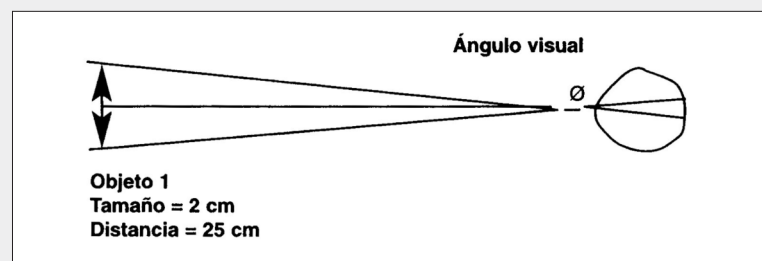


Figura 7. Diagrama para ilustrar el cálculo del ángulo visual

Tenga en cuenta que en la fig. 7 se han representado sólo los rayos que pasan por el centro del cristalino. Como se ilustra en la fig. 5, de hecho cada punto del objeto manda un haz de rayos de luz que son refractados, formando cada haz su correspondiente imagen. En el cálculo del ángulo visual, se utilizan los rayos que proceden de los límites del objeto y pasan por el centro de la lente.

El ángulo visual se especifica en grados (°), minutos (') y segundos (") de arco. En medidas angulares $1^\circ = 60'$; $1' = 60''$.

El ángulo visual está relacionado con el tamaño de la imagen proyectada sobre la retina. Basándonos en el ejemplo representado en la fig. 7, demos-tremos la forma de calcular el ángulo visual Φ y el tamaño de la imagen retiniana del objeto T.

El ángulo visual se calcula según la fórmula:

$$\text{tag} \left(\frac{\Phi}{2} \right) = \frac{T}{2p}$$

donde $\text{tag} \left(\frac{\Phi}{2} \right)$ representa la tangente trigonométrica para la mitad del ángulo visual, T es el tamaño del objeto, medido transversalmente al eje visual y p la distancia del centro del ojo al objeto. Simplificando:

$$\text{tag} \Phi = \frac{2T}{2p} = \frac{T}{p} \text{ para ángulos visuales pequeños.}$$

Según el ejemplo, dado que la distancia del objeto es de 25 cm y el tamaño 2 cm, entonces:

$$\text{tag} \Phi = \frac{2 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} = 0,08 = 4^\circ 36'$$

Por tanto, en el caso de nuestro ejemplo, el ángulo visual $\Phi = 4^\circ 36'$

Por otra parte, sabiendo que en este caso, el tamaño del objeto es $T = 2 \text{ cm}$ y la distancia de dicho objeto al ojo es $p = 25 \text{ cm}$, y conociendo el hecho de que en el ojo humano normal la distancia de la lente al fondo de la retina es aproximadamente 17 mm, o lo que es lo mismo que $q = 17 \text{ mm}$, podemos calcular el tamaño de la imagen retiniana T' . Dado que $\Phi = \Phi'$, siendo Φ' el ángulo visual de la imagen de la retina, podemos escribir:

$$\frac{T}{p} = \frac{T'}{p'}, \text{ luego } \frac{20 \text{ mm}}{250 \text{ mm}} = \frac{T'}{17 \text{ mm}}$$

$$T' = \frac{17 \cdot 20}{250} \text{ mm}, T' = 1,36 \text{ mm}$$

La imagen sobre la retina de un objeto de 2 cm de alto a 25 cm de distancia es de 1,36 mm. El ángulo visual es $4^\circ 36'$.

La transducción de la energía luminosa en energía nerviosa

La córnea y el cristalino proporcionan las dioptrías necesarias para formar la imagen de los objetos del mundo sobre la retina, que es una membrana de un grosor aproximado de medio milímetro que reviste el fondo del ojo. El plan básico de la retina es simple, en ella hay cinco tipos de células: tres tipos están especializados en la transmisión de los impulsos neuronales hacia niveles superiores del Sistema Nervioso Central y otros dos están encargados de establecer interconexiones entre otras células de la retina. Las células transmisoras son los fotorreceptores, las células bipolares y ganglionares. Las células que interconectan a las transmisoras entre sí son las células horizontales que establecen conexiones en las sinapsis entre los fotorreceptores y células bipolares. Un segundo entramado de enlaces horizontales tiene lugar gracias a las células amacrinas, que relacionan las células ganglionares entre sí.

Los fotorreceptores se dividen en conos y bastones. La transformación de la energía luminosa en energía nerviosa es un proceso químico. Los fotorreceptores contienen fotopigmentos. En el ojo humano existen cuatro tipos de fotopigmentos, uno para los bastones y tres para los conos. No obstante el proceso de transducción ocurre de la misma manera en todos los casos. En el momento que un fotón entra en contacto con el fotopigmento de un receptor, el fotopigmento se divide en las moléculas que lo constituyen. El fotopigmento más estudiado es el correspondiente a los

bastones, la rodopsina. Su nombre proviene del color rosa (rhodon en griego) en estado intacto. Se compone de una molécula derivada de la vitamina A y de otra que es una proteína. En el momento en que el fotopigmento se divide, por la acción de la luz, en las dos moléculas de las que se compone, el color rosa se pierde, se dice que se decolora. Después de que un fotopigmento se ha dividido a causa de la luz y se ha decolorado, la energía procedente del metabolismo hace que las dos moléculas se vuelvan a recombinar. El fotopigmento puede ahora ser decolorado de nuevo mediante la acción de la luz.

Gracias a la existencia de dos tipos de fotorreceptores, conos y bastones, el ojo humano tiene tanto una alta agudeza, gracias a los conos, así como una alta sensibilidad, gracias a los bastones. Ambos tipos de fotorreceptores están conectados con **células bipolares**, denominadas así, porque tienen dos polos. Un polo se extiende hacia el receptor y el otro hace sinapsis con una **célula ganglionar**. En el momento en que cae luz sobre un fotorreceptor, la división del fotopigmento pone en marcha reacciones químicas que hacen que éste envíe un mensaje a la célula bipolar con la que forma sinapsis. A su vez las células ganglionares envían sus axones al **punto ciego**, que es el lugar del fondo del ojo, donde convergen todos los axones formando el nervio óptico. Durante esta transmisión de impulsos debido a la acción de las células horizontales y amacrinas, ocurre un primer procesamiento de la información ya que, debido a esta estructura de la retina, existe una considerable interacción entre áreas vecinas de la misma, lo que permite mecanismos complejos como la inhibición lateral que tratamos exhaustivamente en el vídeo. La célula ganglionar es la única célula de la retina que genera un verdadero potencial de acción.

Inhibición lateral y contraste de brillo

Por contraste se entiende el fenómeno de que la apariencia de los objetos depende de los objetos que lo rodean. El contraste de brillo se refiere al hecho de que el brillo de una superficie va a ser, en parte, función de la intensidad del fondo sobre el cual se sitúa. Un ejemplo de contraste de brillo se ilustra en la fig. 8



Figura 8. Ejemplo de contraste de brillo

En esta figura todos los cuadros del interior tienen la misma luminancia objetiva, sin embargo, a medida que el fondo se hace más claro, el cuadro del interior se percibe como más oscuro. Este fenómeno demuestra que el sistema visual lo que procesa no son valores de luminancia objetivos sino relativos. Cornsweet (1970) señala que el contraste de brillo implica el fenómeno de inhibición lateral. El brillo de cualquier punto de una región del campo visual depende de la distribución de las intensidades en dicha región que comprende dicho punto y también algo del área que le rodea. Los efectos de la excitación según la intensidad de puntos adyacentes dan lugar a una interacción entre los mismos, y el correlato fisiológico del brillo de cualquier punto es función de dicha interacción, con otras palabras, de la inhibición lateral.

Un fenómeno relacionado, que igualmente muestra lo que acabamos de decir, es la constancia de brillo, que se refiere al hecho de que independientemente de la iluminación y, con ello de la luminancia de los objetos de una escena, si hay un cambio gradual de iluminación que comprende la figura y el fondo, las relaciones de contraste se siguen percibiendo de la misma forma bajo diferente iluminación. Una vez más, lo que prueba esto es que el sistema visual lo que procesa no son intensidades de luminancia objetivas, sino relativas.

El millón de fibras aproximado del nervio óptico están separadas anatómicamente en función del lado de la retina en que tienen su origen en cada ojo.

Es útil imaginar que cada retina se divide verticalmente en dos partes pasando por la fóvea: todas las células ganglionares conectadas con el lado temporal de la retina suben a la estación de relevo de los núcleos geniculares al mismo lado del cerebro en el que se encuentra el ojo. Todos los impulsos procedentes de células ganglionares que proceden de receptores situados en la parte

nasal de la retina viajarán en fibras que cruzan el quiasma óptico de forma que se proyectan en el núcleo geniculado situado en el lado contralateral.

En el recorrido de los impulsos hacia la corteza, el núcleo geniculado lateral tiene una función de estación de relevo, situado entre la retina y la corteza visual primaria o corteza estriada. La estructura de cada núcleo geniculado refleja el origen de las señales del lado del campo visual correspondiente. Los métodos de tinción histológica muestran un patrón de seis capas celulares a los que se intercalan capas fibrosas.

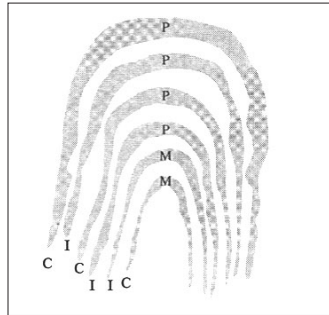


Figura 9. Corte esquemático del núcleo geniculado lateral, que sirve de estación de relevo entre el ojo la corteza visual P (parvocelular), M (magnocelular), C (contralateral) e I (ipsilateral)

Se conoce que las células de la capa superior del núcleo geniculado de un lado reciben sus entradas de la parte nasal de la retina del ojo en el lado contralateral, mientras que las células de la segunda capa reciben sus entradas de la parte temporal de la retina del ojo situado en el mismo lado que el núcleo geniculado (ipsilateral). Este patrón contralateral / ipsilateral se repite en las capas tres y cuatro, pero curiosamente no en las capas cinco y seis donde ocurre lo contrario, siendo la capa cinco una representación ipsilateral (I) y la seis contralateral (C). Además las células en las capas cinco y seis son mayores que las que se encuentran en las capas una a cuatro, por ello las primeras se denominan magno células (M) y las segundas parvo células (P).

En cuanto a las proyecciones corticales, un área muy importante es la corteza visual, región que se denomina también corteza estriada o V 1. Inicialmente se pensó que ésta era la única área implicada en la visión. Actualmente se sabe que las áreas de asociación o la corteza preestriada tienen también un importante papel. Esta región de la corteza, que está separada de V1 por otra llamada V2, se ha dividido a su vez en áreas con funciones especializadas, denominadas V3, V3A, V4 y V5. La situación de estas áreas en el macaco se representa en la fig. 10.

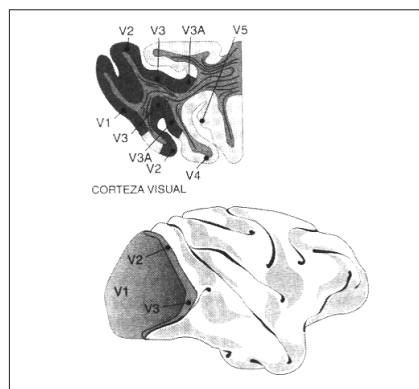


Figura 10. Corte transversal de la corteza del macaco, en el que se observan las áreas V1, V2, V3, V3A, V4 y V5

Las áreas V3 y V3A tienen relevancia en el procesamiento de la forma, la V5 está especializada en la percepción del movimiento y el área V4 parece estar implicada en la percepción del color. Es importante tener en cuenta que las señales que llegan a las áreas especializadas lo hacen a través

del área VI. El área V2 tiene una función de conexión entre VI y las áreas especializadas. En palabras de Zeki (1992, cfr. Fernández Trespalacios, 1993), las áreas VI y V2 actúan a modo de estafeta de Correos encaminando las diferentes señales procedentes de los núcleos geniculados a las áreas apropiadas. De los sistemas parvo y magnocelular, el parvocelular parece implicado en la percepción del color y los detalles de las superficies, el área relevante parece ser la V4. El sistema magnocelular, por otra parte, parece implicado en el procesamiento de la forma y la sensibilidad al contraste, procesamiento que parece ocurrir en las áreas V3 y V3A y en el procesamiento del movimiento en el área V5.

Por tanto, en lo que concierne a nuestro sistema perceptivo, no sólo las señales procedentes de los diferentes órganos sensoriales se transmiten de forma separada en el sistema nervioso central sino que, dentro de cada modalidad perceptiva, parecen existir canales paralelos que son específicos para determinados aspectos de la información procesada por una modalidad determinada y esta diferenciación se mantiene a nivel de las representaciones y el procesamiento cortical. Según Fernández Trespalacios (1997), el sistema magnocelular es el más antiguo en la evolución filogenética, ya que el parvocelular sólo aparece en los primates y los hombres. El sistema magnocelular ha permitido a los animales moverse dentro de sus nichos ecológicos, conseguir los alimentos y protegerse contra los predadores. El sistema parvocelular ha añadido la habilidad de poder percibir los detalles finos, las texturas de las superficies y los colores de los objetos. El que, con la evolución, un sistema se haya añadido al otro explica que a veces las funciones sean redundantes. Así, tanto el sistema magnocelular como el parvocelular suministran información sobre la orientación y ambos se complementan para la percepción del mundo que nos rodea.

La visión del color

El campo de estudio del color es complejo y abarca muchos aspectos. El color es una parte esencial de la experiencia perceptual del mundo que nos rodea. El color no sólo influye en nuestra habilidad de diferenciar entre los objetos sino que afecta a nuestro humor, a nuestros sentimientos, e influye en nuestras preferencias y en nuestra experiencia estética. Existen más palabras para describir el color y las experiencias relacionadas con el color y las experiencias relacionadas con el color que de ninguna otra dimensión de la visión, o de percepciones y experiencias que proceden de otros sentidos. En el vídeo, abordamos en primer lugar las dimensiones de la luz y las características de los objetos que son un requisito para la percepción del color. Seguidamente entramos en el tema de los procesos fisiológicos que subyacen a la percepción del color. El último punto se dedica a algunos fenómenos psicológicos de la percepción del color.

La teoría física del color

Al hablar de la luz como estímulo visual, heAl hablar de la luz como estímulo visual, hemos señalado la propiedad ondulatoria de la luz y la composición de la luz blanca (solar) de diferentes longitudes de onda que, mediante el análisis espectral, pueden observarse como colores. Asimismo hemos visto que este fenómeno puede invertirse interponiendo otro prisma. Los diferentes colores espectrales se suman y se vuelve a obtener luz blanca. La realización de mezcla de luces de diferente longitud de onda da lugar a una experiencia que sólo ocurre en el sistema visual: lo que percibimos es un nuevo color. En otros sistemas sensoriales, por ej. en el sistema auditivo, cuando se mezclan tonos lo que percibimos es un acorde, una mezcla de sonidos, no un único sonido nuevo. Es relativamente fácil separar las diferentes frecuencias que componen un acorde, en cambio, en lo que concierne el color, no somos capaces de percibir sus componentes.

Si el espectro de colores se divide en tres partes iguales, se obtiene lo que se ha llamado los tres **colores aditivos primarios**: verde, rojo y azul violáceo. Si se mezclan estos colores dos a dos en la misma proporción se obtiene los colores llamados **primarios sustractivos** que son los siguientes: el amarillo, resultado de la mezcla de luz roja y verde: el cian, resultado de la mezcla de azul violáceo y verde y el magenta, resultado de la mezcla de luz roja con luz azul violáceo.

El triángulo de los colores

La forma más simple de describir los colores es el triángulo de los colores. Dicho triángulo se representa en la fig. 11.



Figura 11. Diagrama del triángulo de los colores

Como se observa, los colores primarios aditivo: rojo, verde y azul están situados en los vértices del triángulo. Los colores sustractivos primarios: amarillo, magenta y cian en los lados. La suma de cualquiera de dos colores situados en los vértices da como resultado el color sustractivo primario situado entre los mismos. La suma de los tres colores aditivos primarios situados en los vértices da lugar al blanco, la suma de los tres colores sustractivos primarios situados sobre los lados da lugar al negro. La relación de un color situado en un vértice con el correspondiente en el lado opuesto es de complementariedad. Se dice que dos **colores** son **complementarios** si al sumarse dan lugar al blanco. Por ej. el magenta y el verde son complementarios porque al sumarse contienen todas las ondas del espectro. Asimismo son complementarios el rojo y el cian y el azul y el amarillo.

La mezcla de luz se llama **método aditivo** porque se suman longitudes de onda. Lo contrario al método aditivo es el **método sustractivo**. Este es el método más familiar que se usa al mezclar pigmentos para producir diversas pinturas de color. La mezcla de cualquiera de los primarios sustractivos: magenta, cian y amarillo, producirá los primarios aditivos. Tomemos como ejemplo una superficie pintada con una mezcla de cian y amarillo, al caer la luz blanca sobre los granos de pigmentos, estos actúan como pedazos de vidrio. Los rayos azul y violeta pasan a través de los granos del pigmento y son absorbidos. Después de muchas reflexiones y refracciones, sólo el verde y algo de amarillo se reflejan desde la superficie: lo que se percibe es un verde con un cierto grado de amarillo o verde claro. En el vídeo, la mezcla sustractiva se muestra mediante la utilización de filtros que absorben diferentes longitudes de onda del espectro de la luz blanca.

La diferencia fundamental entre los métodos aditivos y sustractivos de mezcla de colores es precisamente la sugerida por los nombres: en el método aditivo, el color resultante es la suma de los componentes espectrales usados para obtenerlo; en el método sustractivo, es la diferencia entre los dos. La adición produce siempre un color más brillante, mientras que la sustracción da lugar a un color más oscuro. La mezcla aditiva de los tres colores primarios: azul, rojo y verde da lugar al blanco, la mezcla sustractiva de los tres primarios: magenta, amarillo y cian da lugar al negro.

Nuestra experiencia es que, si cambiamos el color de una superficie pintándola, el color que inicialmente estaba en la pintura ahora ha pasado al objeto. Resulta difícil librarse de esta impresión. Además sabemos que si rascamos la pintura debajo puede aparecer otro color. Por ejemplo, tomemos un lápiz rojo, debajo de la pintura exterior aparece el color de la madera y, en el interior, el color rojo. Además, en la mina del lápiz, el rojo no sólo es exterior sino que se encuentra también en el interior de la misma. La teoría física del color lo que nos dice es que la creencia común, de que el color es inherente a la superficie de los objetos, no es correcta. Los colores se perciben úni-

camente si hay luz, en una habitación totalmente a oscuras no se percibirán. Por tanto, el color que vemos depende de las propiedades de las superficies de los objetos, que se manifiestan cuando están expuestos a la luz y de la forma en que esta luz es reflejada hacia nuestros ojos.

El procesamiento del color

En 1802, Thomas Young, físico y médico británico, observó que el sistema visual humano puede sintetizar cualquier color de un conjunto de tres colores de diferentes longitudes de onda, lo que le llevó a proponer la teoría tricromática de visión de color. Young pensó que el ojo tiene que contener tres tipos de receptores, cada uno sensible a diferentes longitudes de onda. Más tarde, Helmholtz obtuvo las primeras curvas de sensibilidad a diferentes longitudes de onda. Sólo recientemente se ha podido demostrar que en la retina humana existen conos que contienen tres tipos de fotopigmentos, cada uno de los cuales es preferentemente sensible a luz de onda corta, onda media u onda larga, situándose la máxima sensibilidad aproximadamente en 420, 530 y 560 nm.

A finales del siglo XX, el fisiólogo Ewald Hering desarrolló un punto de vista sobre la visión del color basado principalmente en la apreciación subjetiva. Según este investigador, la teoría tricromática es insuficiente para explicar la visión de color. Uno de los aspectos que intrigó a Hering era el hecho de que no existe un verde rojizo ni un azul amarillento. Hering especuló que el sistema visual, dependiendo de las longitudes de onda, generaba señales que se oponen. Concretamente supuso que tenían que existir dos tipos de fotorreceptores: un tipo que correspondería al rojo / verde y otro que respondería al amarillo / azul.

Actualmente se conoce que la teoría tricromática describe lo que ocurre en los fotorreceptores, mientras que la teoría oponente describe el procesamiento en las células ganglionares y que, además de los procesos oponentes rojo /verde y amarillo / azul, está siempre implicado el blanco / negro, específicamente implicado en el brillo y la saturación. Estos aspectos se ilustran de forma esquemática en el vídeo.

Contraste simultáneo de color

En relación con la visión del color existe igualmente un fenómeno de contraste y en el mismo, al igual que en el contraste de brillo, interviene el proceso de inhibición lateral. Para demostrar este fenómeno no se cambia la luminancia del fondo, como en el caso de la demostración con luz acromática, sino la longitud de onda. Por ej., un disco gris sobre un fondo rojo se percibe de un tono verde azulado. Esto se debe a que los conos sensibles a la luz de onda larga que son estimulados por el fondo inhiben los conos de onda larga que procesan el área central y, consecuentemente, la actividad de los conos responsables del procesamiento de ondas largas en esta área será menor que la de los conos de longitudes de onda media y corta. Por la misma razón, si se cambia el fondo sobre el cual se sitúa el disco gris a verde, éste último tomará un tono rojizo.

Por tanto, el fondo hace que ocurra una inhibición lateral en el área gris central, al igual que ocurre en el caso del contraste de brillo, lo que pasa es que, en este caso, la inhibición se limita a un tipo de conos determinado. Esto es exactamente lo que se esperaría desde el sistema de codificación oponente. Lo que sugiere este sistema es que los impulsos generados por los fotorreceptores no se transmiten de forma independiente a la corteza sino que pueden inhibirse de forma recíproca. Por ello, siempre que se sobrepone el gris sobre un fondo de color lo que se percibe será el color de aquella longitud de onda, o mezcla de longitudes de onda, que mezclados con el color del fondo darían lugar al blanco. Como muestran los ejemplos del vídeo, el fenómeno de inhibición e inducción del color complementario depende además de la proporción de tamaño entre el estímulo y el fondo.

Como hemos indicado al hablar del contraste de brillo, el brillo percibido no varía al cambiar la iluminación si este cambio afecta por igual a la figura y el fondo, lo que se conoce como constancia de brillo. Un fenómeno análogo es la constancia de color, el color de una determinada superficie no cambiará, incluso si las longitudes de onda que iluminan dicha superficie cambian. Al igual que en la constancia de brillo, el aspecto importante es que el cambio en iluminación afecta tanto a la superficie en cuestión como al fondo sobre el cual se sitúa. De nuevo estamos ante el hecho de que el sistema visual lo que procesa son aspectos relativos y no magnitudes objetivas.

Como demostración de la apariencia de los colores utilizando diferentes mezclas, en el vídeo se explica los resultados del experimento de cancelación del color de Hurvich y Jameson, siguiendo los supuestos del proceso oponente. De acuerdo con este proceso, si a un sujeto le mostramos una luz con una onda corta determinada, siendo ésta percibida como azul, y añadimos gradualmente luz amarilla, también de una determinada longitud de onda, llegará un momento en que el sujeto percibirá luz acromática. Esto sería el punto 0 en el sistema oponente azul / amarillo. La cantidad de luz amarilla, con una longitud de onda específica, que fue añadida a la luz azul, con otra longitud de onda determinada, nos proporcionará una medida de la respuesta relativa del azul en el sistema azul / amarillo, para esta longitud de onda de azul. Este proceso puede repetirse para todos los valores del espectro, tanto para azul / amarillo como para rojo / verde. Los resultados se explican paso a paso en el vídeo.

El orden óptico

Las características físicas y las leyes físicas de la luz determinan lo perceptible. La tierra está iluminada por la luz solar. En cualquier punto en el que fijemos la vista, la luz converge desde todas las direcciones y podemos imaginar dicho punto rodeado de una esfera dividida en diminutos ángulos que reflejan luz. La intensidad de la luz, y la mezcla de longitudes de onda reflejadas en este punto imaginario de mira, difieren de un ángulo de reflexión a otro. El patrón de luz que refleja cada punto que percibimos dará lugar al orden óptico.

Una primera consecuencia es la percepción del horizonte. La intensidad y los ángulos de reflexión son diferentes en la atmósfera y en la superficie terrestre o marítima. La superficie terrestre no es lisa sino accidentada, por tanto los ángulos de reflexión dependerán de estos accidentes. Este hecho nos proporcionará información sobre la textura de la superficie. Además, según sean las superficies, éstas absorberán y reflejarán diferencialmente la luz, lo que dará lugar a diferentes colores. Por ej., el mar absorberá parte del espectro y reflejará principalmente luz de longitudes de onda corta, en consecuencia lo veremos de color azul. La tierra, en cambio, absorberá otras longitudes de onda. Según sea esta absorción puede tener tonos ocres, verdes, o también azules como las montañas distantes. En todo caso, el color dependerá de la luz que llegue a las superficies. de la hora del día y si el día es claro, nublado o si hay niebla. Si añadimos objetos a este ambiente, tenemos un orden óptico con un patrón espacial más complejo, que se compone de segmentos que reflejan diferentes ondas espectrales con intensidades medias diferentes, dando lugar a la tridimensionalidad. Al nivel de detalles, el orden óptico informa sobre la textura de las superficies.

A esto se añade que vivimos en un mundo que no es estático, sino en el que existe el movimiento. Cualquier movimiento está especificado por un cambio en el orden óptico. Algunos movimientos de la naturaleza son lentos, por ej., los cambios de luz a lo largo del día y de la noche. Durante el día, según la hora, cambia el ángulo de incidencia y con ello la reflexión de la luz, así como los componentes espectrales de la luz que llegan a la tierra. Los hombres y animales que conviven con nosotros producen fluctuaciones pasajeras en el orden óptico. Se produce un orden espacio - temporal del orden óptico que contiene información sobre la velocidad y forma del movimiento involucrado.

Por tanto, debido a sus características físicas, la luz al incidir sobre nuestro mundo proporciona información acerca de la estructura del ambiente y de los sucesos que ocurren en el mismo. La velocidad de la luz asegura que los sucesos del ambiente se presentan de forma instantánea en el orden óptico.

Los ojos son los órganos que extraen la información del orden óptico. En este vídeo hemos analizado la forma en que se forma la imagen sobre la retina de qué manera se transforma la energía luminosa en energía nerviosa y el procesamiento de la misma. La retina constituye la red neuronal más simple y mejor estudiada en la actualidad. Es el lugar donde se extrae la información sobre el color y ocurre el proceso de inhibición lateral que explica aspectos como la constancia y el contraste de brillo y color. Los ojos son la primera instancia que procesan los patrones de luz. La imagen retiniana simple se complementará con aspectos como la visión estereoscópica (no tratada en

este vídeo). Todo ello será representado en la corteza, procesándose por canales paralelos que son específicos para los diferentes aspectos de la información, manteniéndose esta diferenciación en las representaciones y el procesamiento cortical. En último término será nuestra mente la que interpreta los patrones de luz que captan nuestros ojos. Como decía Steiner:

“El universo visto desde dentro es luz. visto desde fuera, espiritualmente, es pensamiento”.

ORIENTACIONES DIDÁCTICAS

Es conveniente que lea esta guía didáctica antes de ver el vídeo para tener un primer acercamiento a lo que le vamos a presentar. La mayoría de los aspectos de esta guía didáctica son resúmenes de lo que se va a ver en el vídeo, por lo que aporta al estudiante principalmente una visión general. Existen no obstante excepciones a esta regla. Una de estas excepciones es la que concierne a la parte dedicada a las vías nerviosas que llevan los impulsos nerviosos procedentes de la retina hasta la corteza y la representación en la misma, en especial la distinción parvo y magnocelular y la diferenciación en cuanto a la representación cortical. Otra excepción lo constituye la ampliación sobre los aspectos ópticos del ojo. Estos aspectos no están en el vídeo, por tanto, en este caso la guía constituye un complemento a las explicaciones del mismo.

No obstante, para todos aquellos que desean profundizar en los temas expuestos, tanto en el vídeo como en la guía, y además conocer otros aspectos como los referentes a movimientos oculares, visión estereoscópica, así como las neuronas principales de computación que explican el reconocimiento y la interpretación del objeto se incluye una bibliografía básica de consulta. Se anima a que acabe. Cuando el niño realiza más de un dibujo, se le puntúa el mejor realizado de los dos, a partir de los criterios del manual (pags. 103 a 108).

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acomodación:	Cambios en el grosor del cristalino del ojo que enfoca las imágenes de objetos cercanos o lejanos sobre la retina.
Adaptación:	Cambio en la sensibilidad a la luz de cada fotorreceptor, o del sistema visual globalmente, para emparejarse al promedio de intensidad de luz existente. La adaptación a la luz tiene lugar rápidamente, en cambio, la adaptación a la oscuridad es un proceso lento.
Bastón:	Fotorreceptor sensible a la luz de poca intensidad.
Brillo:	Parámetro psicofísico de la luz acromática y del color, que depende de la intensidad o grado de energía que emite un estímulo visual, del contraste con respecto a otros estímulos presentes en una escena y de la adaptación del ojo.
Célula bipolar:	Neurona de la retina que recibe información de los fotorreceptores y la transmite a las células ganglionares, cuyas axones constituyen al nervio óptico.
Célula ganglionar:	Neurona de la retina que recibe información de los fotorreceptores a través de las células bipolares, una vez ocurrido el procesamiento de los impulsos (inhibición lateral). Es la primera célula de la retina que genera un potencial de acción. Los axones de estas células forman el nervio óptico.
Color o matiz:	Se relaciona con la longitud de onda del estímulo. Diferentes colores tienen diferentes longitudes de onda.

Cono:	Fotorreceptor responsable de la gudeza de la visión cuando existe buena iluminación.
Contralateral:	Parte del cuerpo opuesta al punto de referencia.
Contraste:	Diferencia entre diferentes intensidades en un patrón de luz.
Córnea:	Tejido transparente que cubre la parte anterior del ojo.
Corteza visual primaria:	También se denomina corteza estriada o región V1. Se localiza en los lóbulos occipitales y recibe información directamente de la retina y de los núcleos geniculados laterales.
Cristalino:	Órgano transparente situado detrás del iris del ojo, cuya función es focalizar la imagen sobre la retina.
Fotón:	Corpúsculo al que se le asocia una energía y una longitud de onda con la que se propaga.
Fotopigmento:	Molécula compleja que se encuentra en los fotorreceptores. Se divide al incidir la luz sobre la membrana del fotorreceptor, dando lugar a la generación de un impulso nervioso.
Fotorreceptor:	Célula de la retina sensible a la luz: un cono o un bastón.
Fóvea:	Pequeña depresión en la retina con alta densidad de conos.
Ipsilateral:	Parte del cuerpo en el mismo lado que el punto de referencia.
Iris:	El músculo pigmentado del ojo que controla el tamaño de la pupila.
Longitud de onda:	La distancia entre ondas adyacentes de energía radiante; visión determina el color.
Luminancia:	Intensidad de luz que despiden un objeto. Depende de la intensidad de la luz incidente, de las características de la superficie del objeto y de hasta qué punto ésta refleja la luz.
Núcleo Geniculado Lateral:	Zona del cerebro en la que terminan los axones de las células ganglionares retinianas y desde la que parten otros axones a la corteza visual.
Orden óptico:	Término introducido por Gibson para referirse al patrón instantáneo de luz que es fruto de la incidencia de la luz desde todas las direcciones sobre cada punto del espacio. Según las regiones, el patrón de luz diferirá, de acuerdo con las superficies de las que es reflejado.
Percepción:	Proceso automático inconsciente mediante el cual reconocemos la información procedente de nuestros órganos sensoriales.
Proceso oponente:	Representación de los colores por la frecuencia de los impulsos de dos tipos de células ganglionares rojo / verde y amarillo / azul.
Punto ciego:	Región de la retina donde no hay visión, es el lugar donde los axones de las células ganglionares salen del ojo y se unen al nervio óptico.
Retina:	Capa de tejido situado en la superficie interior del fondo del ojo que contiene fotorreceptores y otras células nerviosas asociadas.
Rodopsina:	Fotopigmento de los bastones.
Saturación:	Parámetro del color que indica el grado de pureza espectral del mismo.
Sensación:	La detección de las propiedades elementales del estímulo.

- Tálamo:** Región del cerebro situada cerca del centro de los hemisferios cerebrales, por la que pasa toda la información sensorial, con excepción de las sensaciones olfativas. Región donde se sitúan los núcleos geniculados.
- Teoría tricromática:** Teoría según la cual la visión del color se debe a tres tipos de fotorreceptores, cada uno de los cuales con una sensibilidad máxima a diferentes longitudes de onda.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- BRUCE V., GREEN, P. R. (1994). *Percepción visual, Manual de fisiología, psicología y ecología de la visión*. Madrid: Paidós
- FERNÁNDEZ TRESPALACIOS, J. L. (2002). *Parte quinta: la percepción en: Procesos de Psicología General (I)*. Madrid: Sanz y Torres, 387-759.
- GRZIB, G. BIALES, C. (1999). Capítulo 3: *Percepción, en: Psicología General*. Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, S.A., 129-217
- HABER, R. N., HERSHENSON, M. (1973). *The psychology of visual perception*. London: Holt, Rinehart and Winston
- KAISER, P. K., BOYNTON, R. M. (1996). *Human Color Vision*. Washington: Optical Society of America
- NASSAU, K. (ED.) (1998). *Color for Science, Art and Technology*. Oxford: Elsevier.