

LA LUZ Y EL COLOR EN LA NATURALEZA

María A. Pérez Fernández. Área de Ecología, Universidad de Extremadura.

Resumen

La luz es un fenómeno natural que se manifiesta en todas las actividades cotidianas. Su importancia en la naturaleza radica inicialmente en que la energía radiante es transformada en energía química en la fotosíntesis llevada a cabo por plantas y bacterias con pigmentos verdes. Los seres vivos detectan esta radiación dentro de unos rangos del espectro conocidos como visible; el ojo es capaz de detectar la fracción de radiación del espectro electromagnético, si bien no capta la radiación en el infrarrojo que, por otro lado, aporta una gran cantidad de información referente a las características térmicas de los objetos; esta propiedad está siendo utilizada en distintos proyectos tecnológicos, defensivos y de manejo de espacios naturales.

La luz, además de en la fotosíntesis tiene otros efectos sobre los organismos, como pueden ser los tropismos (orientación del crecimiento vegetativo en el sentido de aparición de la luz), la fotoblastia (germinación seminal como respuesta específica a determinadas longitudes de onda, consecuencia de la presencia en las semillas del fitocromo), la formación de imágenes en el cerebro de organismos acuáticos o incluso el desarrollo de alergias y fobias. Una de las manifestaciones más evidentes de la luz es la formación de colores. Son el resultado de la capacidad de los cuerpos de absorber y reflejar determinadas longitudes de onda. Su razón de ser no es fortuita, sino que son manifestaciones de diferentes estados en los organismos tales como la polinización o ausencia de la misma que simultáneamente sirve de indicación a los organismos polinizadores, reconocimiento de organismos peligrosos o impalatables, identificación de edades y rangos dentro de grupos animales o bien la manifestación de acumulos de sustancias particulares en la sangre como en el síndrome de la hiperbiliverdinemia.

Introduccion

La consideracion de los dos conceptos que dan sentido a estas lneas, luz y color, parece a primera vista quedar relegada al ambito meramente estetico o artistico, o al menos esa es la respuesta que uno obtiene ante el comentario 'estoy escribiendo sobre la luz y el color'; pintura, fotografia, diseno.....el campo de redaccion parece estar circunscrito al arte. Sin embargo al aclarar que lo que uno escribe ha de estar relacionado con la naturaleza, la respuesta obtenida del interlocutor se decanta hacia el ambito de la fisica: ondas, difusion y difraccion.... Pero tampoco es eso lo que quiero transmitir, como vamos a ver.

En Fisica, cuando se emplea la palabra color se hace casi instintivamente asociada a la luz, puesto que fisicamente lo que distingue una sensacion de color de otra es la longitud de onda de la radiacion luminosa que impresiona el sentido de la vista. La luz, identificada como colores, es lo que nos induce toda una gama de sensaciones: 'todo parece que recobra una nueva existencia en el gran teatro del mundo, al adornarse la Tierra con los brillantes colores de la luz, cuya belleza deslumbra nuestros ojos... (Barquera, 1809). Ahora bien, ¿se manifiestan unicamente los efectos de la luz en el ojo humano? Y del mismo modo, ¿Ejerce el color el mismo efecto en otros organismos distintos a nosotros? ¿Pueden analizarse independientemente la luz y el color?. Simplemente con observar atentamente el mundo natural que nos rodea podemos dar respuesta a esta y a otras muchas preguntas, del mismo modo que podemos darnos cuenta de la tremenda variacion cromatica con que este nos regala. A modo de ejemplo la Figura 1 muestra una coleccion de fotografias de la naturaleza que recogen tonalidades desde el blanco hasta el negro y que ilustran la riqueza de tonos y matices que podemos observar son simplemente mantener abiertos los ojos.

La principal intencion de las siguientes paginas es dar al lector una pequena vision de cuan importante son en la naturaleza tanto la luz como su expresion en forma de color. Con este proposito examinaremos una serie de fenomenos que observamos cotidianamente y en los que probablemente no reparamos, as como otros mas curiosos y ajenos a nosotros, en los que se manifiestan coloraciones diversas como expresiones de otros tantos fenomenos.

Si bien es interesante resaltar la fuerte repercusion que el desarrollo de la optica ha tenido a su vez en otras areas cientificas como la propia biologa, su consideracion escapa al proposito y extension de este articulo, por lo que modestamente nos limitaremos a expresar nuestro agradecimiento a esa inestimable ayuda, gracias a la cual el ojo humano ha sido

capaz de escudrinar los entresijos de pequeños microcosmos o bien de los muy alejados, siempre llenos de color y vida. Y conocedores de que el futuro nos reserva nuevos descubrimientos, animamos a nuestros colegas especialistas en óptica a continuar la investigación que nos permita seguir observando, descubriendo y disfrutando de todas esas luces y colores que el ojo humano aun no puede apreciar.

La luz: motor de la vida o por que el mundo es verde

La tierra recibe energía en forma de radiación electromagnética procedente del sol. Con pequeñas variaciones, la constante solar es de 1353 W/m^2 (o lo que es lo mismo $1,94 \text{ Kcal/cm}^2/\text{min}$), de modo que la superficie de la tierra recibe radiación visible, comprendida entre $0,4$ y $0,8 \mu\text{m}$ de longitud de onda, mas una pequeña parte del infrarrojo y del ultravioleta, junto con las ondas de radio de longitud de onda por encima de $100 \mu\text{m}$. Pues bien, el único modo de transformar en energía que mica toda esta energía radiante que llega a la superficie de la tierra es a través de las plantas y organismos con pigmentos verdes y/o verde-azulados (Figura 2). De hecho, el crecimiento de las plantas depende de su capacidad para incorporar el carbono atmosférico en formas orgánicas, lo que se consigue utilizando la energía de la luz, absorbida por las plantas durante la fotosíntesis. Este proceso, la fotosíntesis, se lleva a cabo en dos pasos: (i) una reacción inicial fotoquímica responsable de la captura de la energía de la luz mediante el concurso de los pigmentos capaces de absorber la energía lumínica que, en un proceso de reducción rinden NADPH y ATP; y (ii) el CO_2 atmosférico es posteriormente reducido e incorporado bioquímicamente en los carbohidratos (Mooney & Ehleringer, 1997).

Lo que ocurre realmente es que una porción de la luz incidente es absorbida por la clorofila presente en los cloroplastos de los órganos verdes de las plantas e inmediatamente transferida a centros de reacción especializados en los que los electrones (todos provenientes de la luz) son transportados por un gradiente de energía a lo largo del cual dicha energía es liberada. Todo este proceso se conoce como 'fase luminosa de la fotosíntesis' en la cual se producen ADP y NADP, moléculas esenciales para el siguiente paso que se conoce como 'fase oscura de la fotosíntesis' (Figura 3).

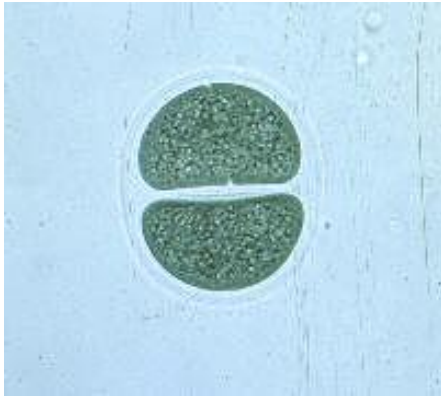


Figura 2. Ejemplar de *Chronococcus* sp, ejemplo de alga verde-azulada, con capacidad fotosintética.

¿Y no hay nada de color en este proceso? Si, precisamente los responsables primeros de captar la energía contenida en la radiación luminosa son la clorofila y los pigmentos accesorios, moléculas coloreadas y especializadas en el aprovechamiento de diferentes longitudes de onda. El CO_2 , que actúa a modo de combustible en este proceso, difunde desde la atmósfera hasta el lugar donde va a ser fijado, precisamente en los cloroplastos.

En la fase oscura se produce la reducción del CO_2 mediante la intervención de la enzima Rubisco (Ribulosa Bifosfato Carboxilasa) para formar compuestos finales de tres o cuatro moléculas de carbono en las plantas denominadas C3 y C4 respectivamente, o bien para dar compuestos ácidos específicos, caso de las cianobacterias.

Las plantas verdes son los únicos organismos capaces de fijar la energía solar, son verdaderas factorías de transformación de energía luminosa en energía química. Están continuamente sometidas a la acción de variados factores ambientales, los cuales a su vez ejercen una fuerte influencia sobre la fotosíntesis. De entre ellos, el más importante es obviamente la luz.

Del total de la radiación solar y terrestre que incide sobre una hoja, únicamente la fracción que queda en la banda entre los 400 y 700 nm es fotosintéticamente activa y se conoce como PAR (del inglés Photosynthetically Active Radiation). Las tasas de fotosíntesis de las hojas aumentan con el aumento de la PAR ya que el poder reductor aumenta al avanzar las reacciones fotoquímicas. La luz afecta igualmente a la conductancia estomática del CO_2 , lo que a su vez limita la fotosíntesis. A intensidades muy bajas de luz no se produce toma de CO_2 porque bajo estas condiciones la tasa de respiración mitocondrial es también baja, y si no hay consumo de CO_2 no se produce diferencia de concentración que permita más entrada de este gas.

La respuesta fotosintética a la luz puede diferir considerablemente entre especies así como entre hojas de un mismo individuo, por lo que se pueden diferenciar hojas de luz y hojas de sombra. Las primeras tienen una mayor densidad de estomas y permiten mayor conductancia

de transferencia de gas, mayor capacidad para el transporte electrónico, mayores tasas de respiración mitocondrial así como un mayor contenido en enzimas que las presentes en hojas de sombra. Por todo ello, si transfirieramos una hoja de sombra directamente a la luz, su sistema fotosintético se inhibiría (en un proceso que se conoce como fotoinhibición) dado que estas hojas no tienen la capacidad para utilizar toda la energía de la luz ni para disipar el exceso de energía a través del ciclo de la xantofila. Igualmente, tras un período de aclimatación, su sistema fotosintético se activa, siendo ya capaces de fijar energía luminosa.

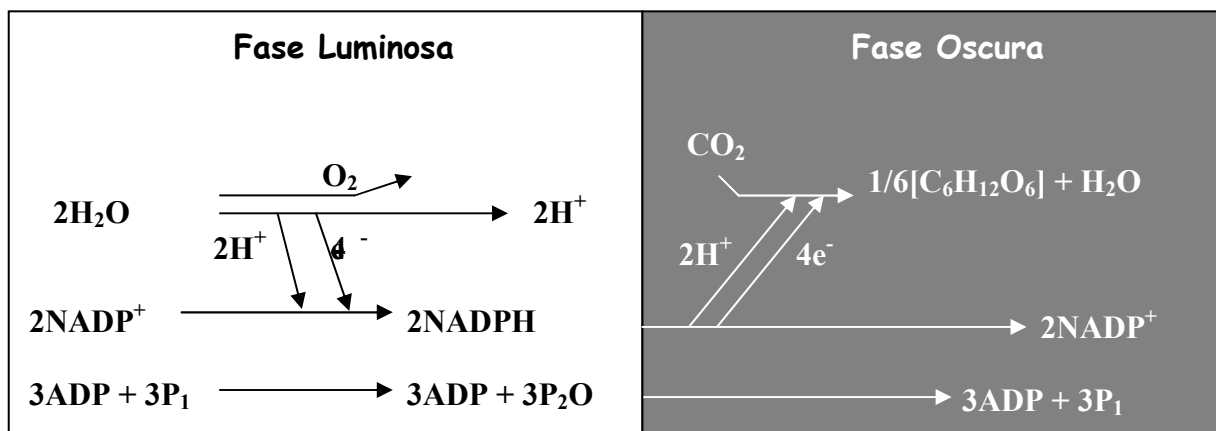


Figura 3. Representación de las reacciones acopladas de la fotosíntesis (según Miller, 1979).

El color de la luz: Visión infrarroja

Nuestros ojos son detectores biológicos sofisticados que han evolucionado para ver la luz visible o luz óptica. La zona visible, que corresponde a longitudes de onda entre los 400 nm del violeta a los 700 nm del rojo, es muy pequeña comparada con las múltiples y variadas manifestaciones que tienen sus ondas (Jou *et al.*, 1994; Frumento, 1995). De hecho, existen muchos otros tipos de luz o radiaciones que no podemos ver sin ayuda de la tecnología. El ojo humano es sensible a una fracción de la gama completa de la radiación que denominamos espectro electromagnético (Figura 4). Sin embargo, para apreciar la naturaleza en toda su complejidad necesitamos utilizar dispositivos artificiales que nos permitan ver los mundos ‘invisibles’ a los ojos humanos.

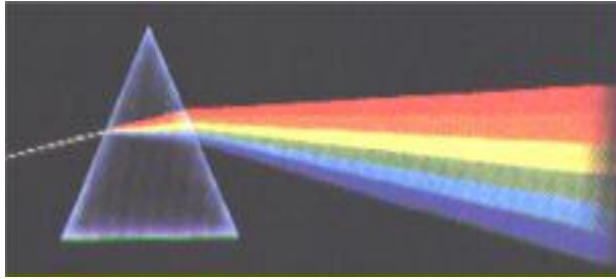
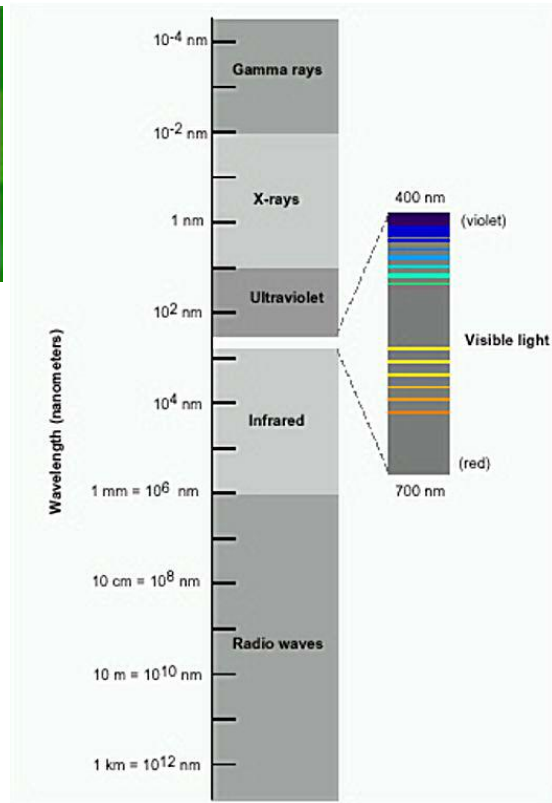


Figura 4. Ejemplo de espectro de luz visible

La luz infrarroja (IR) en cuanto a sus características, puede entenderse como una medida de la temperatura de los objetos. En una 'imagen de radiación térmica', o también llamadas de 'color falso', las regiones blancas se asocian a las más calientes, el rojo representa áreas más templadas y las porciones más frías aparecen azuladas.

En una imagen infrarroja de un ser vivo podemos identificar todo un mapa de colores. Las regiones amarillas corresponden a las zonas del cuerpo con más temperatura, mientras que las áreas moradas o violetas corresponden a las más frías. En un mamífero como un perro o un gato, las partes más calientes de la cara corresponden a los oídos y los ojos, mientras que la región más fría será la nariz. Esto nos hace ser conscientes de cuán diferente vemos las imágenes si tuvieramos los ojos adaptados a la luz infrarroja. Cualquier objeto con una temperatura más alta que el cero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$), o cero grados Kelvin (0 K), irradia en la banda infrarroja. Incluso los objetos que consideramos muy fríos, como los cubos de hielo, emiten luz infrarroja.

La mayoría de lo que vemos con nuestros ojos es el resultado de radiación indirecta (o radiación reflejada) generada por el sol o por luces artificiales y que es reflejada por distintos objetos. Sin embargo, si nuestros ojos fuesen capaces de ver la radiación infrarroja, esos mismos objetos serían visibles incluso en completa oscuridad. En general, cuanto más caliente se encuentre un objeto, tanto mayor será la radiación IR que produce. Diversas actividades de investigación de tecnologías de detectores infrarrojos han permitido crear numerosas aplicaciones útiles, además de las utilizadas en la ciencia, la defensa y el espacio. Utilizamos la tecnología infrarroja diariamente; por ejemplo, al pulsar el botón de un



control remoto para encender el televisor o para cambiar de canal. En algunos ordenadores, la luz infrarroja se utiliza para leer discos CD-ROM. Los cajeros de las tiendas usan lectores infrarrojos para leer los códigos de barras estandarizados de los productos y acelerar el pago de las compras, etc., etc., etc. La RI es también utilizada como sonda de diagnóstico: en la medición de temperaturas oceánicas desde satélites en órbita, detectar el calor de personas perdidas en bosques en la oscuridad de la noche, y estudiar debilidades estructurales en sistemas eléctricos y mecánicos. La luz infrarroja permite obtener medidas precisas y emitir conclusiones precisas sin necesidad de tocar los objetos analizados.

Los datos del infrarrojo térmico son empleados en el estudio de los volcanes y en la predicción de sus erupciones, mediante la creación de mapas de temperatura del suelo, datos muy útiles en la predicción de la actividad volcánica. Del mismo modo, los detectores infrarrojos a bordo de satélites y aviones son empleados en el estudio de la distribución de la vegetación y del suelo y en la detección de enfermedades y plagas, antes de que dicha enfermedad produzca efectos visibles. Los mapas de infrarrojos también ayudan a evaluar el grado de humedad del suelo, útil en estudios de irrigación.

Otra aplicación importante de la banda infrarroja es el estudio de la distribución geográfica de los recursos naturales, imprescindible en el desarrollo de estrategias conducentes a la preservación del medio natural. En esta misma línea se incluye el uso de infrarrojos para vigilar fuegos mediante el uso de cámaras a bordo de helicópteros, aviones y satélites. Así, los equipos de lucha contra incendios pueden tomar fotografías y detectar fácilmente donde es más intenso el calor, es decir, donde se encuentran los 'puntos calientes' de un incendio, lo que indica por donde empezar a atacar el fuego, ya que en muchos casos las llamas quedan ocultas por el humo. La NASA ha desarrollado cámaras de mano infrarrojas que además de ver a través del humo denso, pueden también detectar llamas invisibles de alcohol e hidrógeno. Los bomberos usan este tipo de cámaras para estimar la posibilidad de fuego detrás de una puerta y para localizar personas y animales que puedan estar atrapados.

Fenomenos relacionados con la luz y el color de ocurrencia comun en la naturaleza

La fotoblastia en semillas

Un est mulo es cualquier fenomeno que provoca reacciones en un organismo. La velocidad de dicha reaccion depende de cada ser, aunque en terminos generales las plantas muestran respuestas mas lentas que los animales. En las plantas las respuestas mas conocidas ante los est mulos son los denominados tropismos, crecimiento hacia o en direccion opuesta al est mulo: geotropismo positivo o crecimiento en profundidad de las ra ces como respuesta a la gravedad, y opuesto a este encontramos el geotropismo negativo de los tallos alejandose de la gravedad terrestre. Del mismo modo, las plantas experimentan fototropismo positivo en respuesta a la luz, creciendo en busca de la maxima cantidad solar. Efectivamente, son estos fenomenos de los que todos hemos o do hablar frecuentemente y que incluso vemos a diario, pero no es, sin embargo, el modo exclusivo que la luz tiene de actuar sobre las plantas. La luz ejerce un tremendo efecto sobre las semillas, pudiendo activar o retardar su germinacion en funcion de la especie considerada. Las semillas de algunas especies germinan indistintamente en luz y en oscuridad (Baskin & Baskin, 1988), mientras que otras especies alcanzan mayores porcentajes de germinacion en luz que en oscuridad (Rodr guez-Echeverr a & Perez-Fernandez, 2001) y otras germinan mejor en oscuridad que en luz (Grime *et al.*, 1981; Baskin & Baskin, 1977). Este fenomeno es conocido con el nombre de fotoblastia (Fenner, 1985).

Las semillas de numerosas especies con requerimientos de luz para germinar logran mayores porcentajes de germinacion en primavera, una vez que han sido expuestas a las bajas temperaturas del invierno, mientras que otras germinan mejor en otono, tras haber sufrido las elevadas temperaturas del verano (Baskin & Baskin, 1988). Por tanto ¿cuando se satisfacen las necesidades lum nicas de las semillas para que estas germinen? La respuesta no es unica ni sencilla como vamos a demostrar a continuacion. Las semillas de *Cyperus inflexus* expuestas a la luz durante el invierno, no germinaron en la primavera siguiente al ser sometidas en presencia de luz a todas las condiciones idoneas para la germinacion; sin embargo, las semillas de *Aster pilosus* expuestas a la luz en invierno germinan, durante la primavera siguiente, en oscuridad completa; las semillas de *Draba verna* expuesta a luz durante su per odo de latencia veraniega son capaces de germinar en el otono siguiente en completa oscuridad (Baskin & Baskin, 1972).

Parece evidente que la luz ejerce un fuerte papel en la germinación, y que además dicho papel es especie-dependiente. Esto nos permite dividir las semillas en: (i) las que germinan exclusivamente en oscuridad, (ii) las que germinan exclusivamente en luz continua; (iii) las que germinan tras haber sido expuestas a un corto periodo de iluminación, (iv) las que son indiferentes a la presencia o ausencia de luz durante el periodo de germinación.

Los requerimientos de luz se han estudiado básicamente en el laboratorio, y los resultados nos sirven para interpretar su razón de ser en la naturaleza. Estos estudios han puesto de manifiesto que las diferentes zonas espectrales de la luz afectan a la germinación también de modo distinto, así :

- Luz por debajo de los 290 nm inhibe la germinación en prácticamente la mayoría de las especies .
- Luz entre 290-400 nm no manifiesta efectos claros o tendencias generales en la germinación.
- La luz en el rango de radiación visible, 400-700 nm, es la que ejerce efectos más acusados y diversos en diferentes especies:
 - Entre 560 y 700 nm y de modo especial la luz roja, tiene un claro efecto positivo, activando la germinación. Por ejemplo, en semillas de *Lectuca sativa* la luz óptima bajo la que se logran los máximos porcentajes de germinación es de 670 nm mientras que la máxima inhibición de la germinación en esta misma especie tiene lugar bajo 760 nm.
 - La luz azul inhibe la germinación prácticamente en todos los casos estudiados. No obstante, bajo determinadas circunstancias ambientales particulares, esta misma luz azul puede estimular la germinación.
- Que la germinación sea estimulada o inhibida depende por completo del periodo exacto de iluminación , relacionado a su vez con el inicio de la imbibición de las semillas.
- La sensibilidad de las semillas a la luz aumenta con el periodo de imbibición.

Se ha demostrado también que los efectos de la luz, bien sean activadores o inhibidores, son reversibles, aplicando, durante un periodo de tiempo adecuado la luz que causa el efecto contrario al resultante en un momento dado (aplicación de luz a semillas inhibidas por oscuridad y exposición a oscuridad a semillas inhibidas por la luz). Por ejemplo, en semillas de lechuga, cuya germinación resulta estimulada por la luz del rojo lejano, pueden ser inhibidas si son iluminadas con luz infrarroja. Una posterior iluminación con luz del rojo lejano induce nuevamente la germinación. Además, la estimulación e inhibición de la germinación seminal por la luz roja y/o roja lejana puede repetirse tantas veces como se desee, obteniéndose siempre el mismo tipo de respuesta por una misma especie.

El espectro de acción de la luz está asociado a una molécula presente en las plantas, el fitocromo (P), al que hemos de dedicar una línea con objeto de entender el efecto de una determinada intensidad y duración de la luz sobre la germinación (Kendrick, 1976). Necesitamos tener en cuenta el espectro de absorción del fitocromo, el cual muestra un claro solapamiento en cuanto a la absorción entre dos formas del fitocromo conocidas como roja, la roja (r) y la roja lejana (fr), e igualmente su absorbancia en el azul. Adicionalmente debemos de tener en cuenta que el fitocromo sufre transformaciones dentro de las semillas, las cuales pueden presentarse de modo sencillo como sigue:

- (1) Activación de la forma inactiva del fitocromo (P) a partir de una forma inactiva pre existente.
- (2) Síntesis del fitocromo a partir de un precursor
- (3) Transformación del fitocromo Pr a Pfr motivado por la exposición a la luz roja, o bien, aunque de modo menos efectivo, a la luz azul
- (4) Transformación de la forma Pfr a Pr inducida por la luz en el rojo lejano, lo cual requiere altos valores de energía, muy superiores a los requeridos para invertir el sentido de esta reacción (Pr a Pfr)
- (5) Reversión en oscuridad de Pfr a Pr
- (6) Reversión inversa en oscuridad (lo que acontece en semillas secas), causando una conversión parcial de Pr a Pfr incluso en oscuridad
- (7) Destrucción enzimática del Pfr
- (8) Reacción del Pfr con alguna sustancia desconocida, dentro de la propia semilla, como pudieran ser compuestos químicos o de membrana, que resulta en la germinación de la semilla.

Los pasos 5 y 6 están mediados por la actuación de varios compuestos intermediarios. La forma P representa normalmente un estado de equilibrio entre las formas Pr y Pfr.

En realidad, la interpretación de la activación y/o inhibición de la luz es un proceso mucho más complejo, pero queda claro que en gran medida es dirigido por la luz. En algunas especies se ha observado que la germinación resulta inhibida por la luz blanca. Cuyos efectos son debidos a sus componentes del azul y de la luz en el rojo lejano.

En cualquier caso y de modo general puede decirse que la luz en el rojo lejano induce la reversión de Pfr a Pr; la luz blanca incluye dos tipos de fitocromos como la adición de pigmentos para poder ser entendida. Simultáneamente, el efecto de la luz depende tanto de la intensidad de la luz (su energía), como de la duración de la iluminación.

La luz, como factor determinante de la germinación seminal no puede entenderse ni explicarse por sí mismo, ya que interactúa con otros factores ambientales como son las temperaturas, los nitratos (Figura 5), el nivel de humedad del sustrato, las concentraciones de oxígeno, la edad de la semilla y como acabamos de ver del nivel de formas activas de fitocromo (Pfr). En la Figura 5 se presenta un ejemplo con resultados de un ensayo de germinación de cinco especies comúnmente representadas en la Península Ibérica, sometidas simultáneamente a tratamientos con soluciones nutritivas y condiciones de luz y oscuridad durante la germinación. Puede apreciarse que en la mayoría de las especies, e independientemente del tratamiento nutritivo, la luz ejerce un claro efecto activador de la germinación.

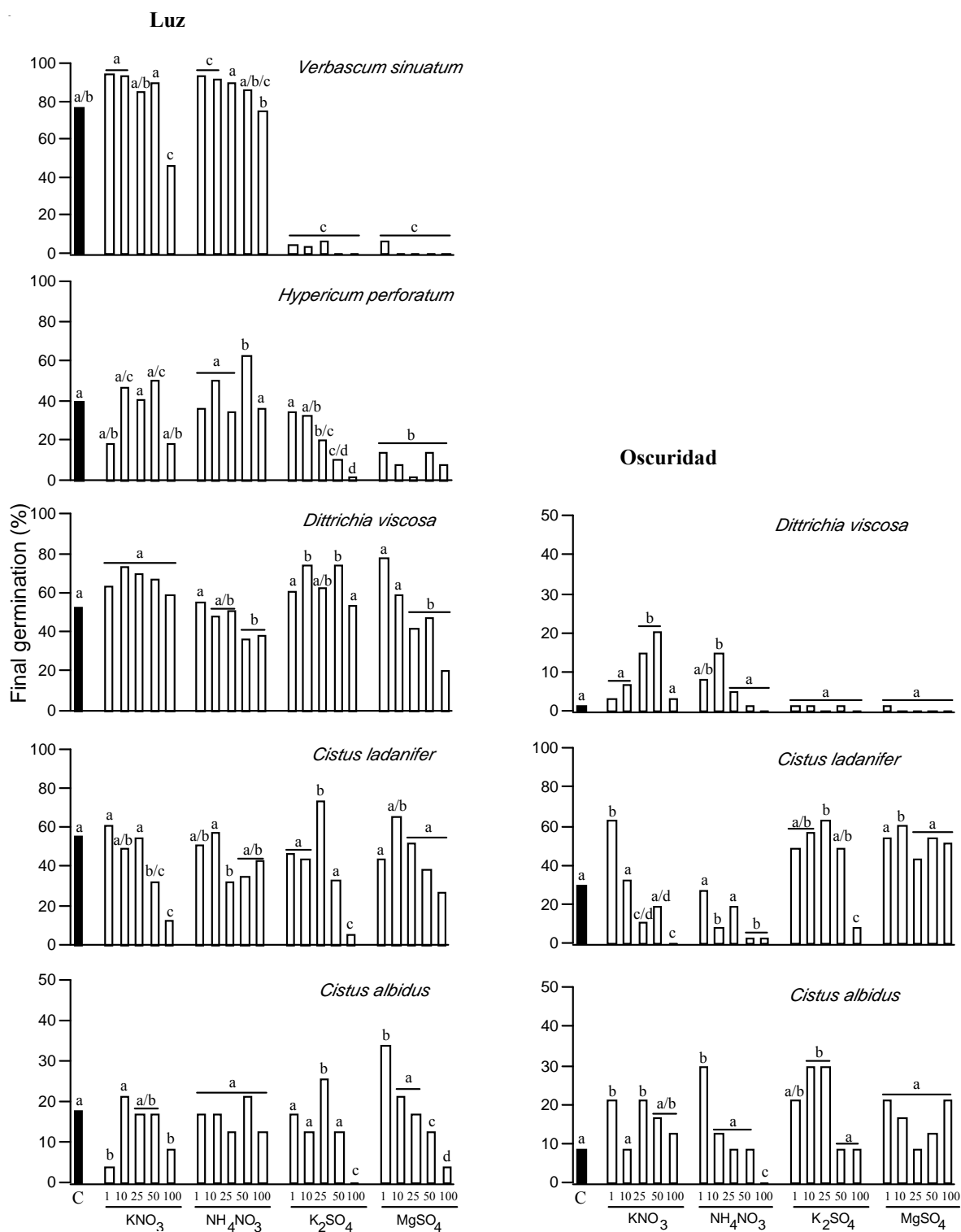


Figura 5. Porcentajes finales de germinación de semillas de *Verbascum sinuatum*, *Hypericum perforatum*, *Dittrichia viscosa*, *Cistus ladanifer* y *Cistus albidus* tratadas con agua destilada y con cuatro soluciones nutritivas a cinco concentraciones crecientes y posteriormente incubadas bajo ciclos de 14 horas luz y 10 de oscuridad (L14/D10) o en oscuridad continua. Letras diferentes sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos tras test de comparaciones múltiples tras ANOVA (Rodríguez-Echeverría & Pérez-Fernández, 2001).

Cambios en las pigmentaciones florales

Además de la fotosíntesis, a la que ya hemos hecho referencia, las plantas se ven afectadas por la luz de diferentes maneras y sin lugar a dudas una de ellas es el color de sus estructuras. De hecho, el color es interpretado como una característica floral de advertencia para los polinizadores (Menzel, 1985). Algunas plantas además, han añadido otro nivel de sofisticación al modo de atraer a los polinizadores. En un amplio rango de taxa de angiospermas, las flores se mantienen frescas sobre las plantas más allá del final de su etapa de viabilidad sexual y durante todo este tiempo son capaces de pasar por diferentes y localizadas coloraciones (Weiss, 1995). Diversos polinizadores, incluyendo insectos en al menos cuatro órdenes, reconocen los cambios de color florales como una señal, y concentran sus visitas a las flores cuando estas son sexualmente viables, momento en el que además ofrecen una recompensa (generalmente en forma de néctar) al polinizador; y todo ello acontece bajo un color floral específico (Weiss y Lamont, 1997). Tanto la planta como el polinizador resultan beneficiados en este proceso: la primera recibe un servicio eficiente de polinización, mientras que el segundo es dirigido de forma segura hacia las flores que ofrecen una recompensa, evitando así visitas inútiles a flores que ya han sido fecundadas y que por consiguiente no tienen nada que ofrecer. Este es el caso de especies como *Lupinus nanus* los pétalos presentan unas pequeñas maculas que pasan de blanco a magenta tras haber sido polinizadas. En *Chamaelucium uncinatum*, las partes florales más vistosas son amarillas y pasan a ser rojas una vez que la flor ha sido polinizada (Figura 6). Este es sin duda un tema excitante, además de muy extendido en la naturaleza y por sus implicaciones evolutivas, más complejo de lo que a simple vista pudiera parecer, por lo que bien merece que le dediquemos un poco más de espacio.

El fenómeno de cambios de coloraciones florales no es homogéneo ni dentro de una misma familia, ni de un mismo género, ni siquiera dentro de una misma especie, lo que sugiere múltiples e independientes eventos evolutivos. Los cambios de color están ampliamente representados en grupos como las Brassicaceae (la familia de las coles y los rabanitos), las Papilionaceae (familia de la amapola y el opio), Myrtaceae (familia que agrupa a los eucaliptos) y Boraginaceae (familia del borago y de la viborera), con amplia distribución en todo el planeta. Los colores iniciales y finales en las flores son muy diversos, al menos según la percepción del ojo humano, si bien esta percepción del color en los Hymenoptera, y probablemente en la mayoría de los polinizadores, no puede ser definida en los términos de las dimensiones humanas tradicionales: matiz, saturación e intensidad

(Giurfa et al., 1995). Todos estos cambios en matiz, por ejemplo del amarillo, blanco o verde al naranja, rojo, rosa o morado son muy frecuentes y motivados por la presencia de pigmentos antocianicos

Los pigmentos son compuestos que absorben la luz de unos colores particulares con especial eficiencia. Así, el tomate contiene un pigmento carotenoide que absorbe la luz en la gama de longitudes de onda que va del violeta al verde, y refleja las demás. La clorofila del pimiento absorbe todo, excepto el verde, que es reflejada, y las antocianinas de la hortensia lo absorben todo, excepto los azules y violetas (Lunau, 1996).

Los cambios florales pueden afectar bien a la flor entera o bien a partes localizadas de la misma. En especies polinizadas por insectos, se han encontrado casos en los que se produce el cambio de la flor y de toda la inflorescencia simultáneamente, así como cambios localizados (Weiss, 1995). En este último supuesto, los cambios de color se pueden observar en el centro de la flor, en el exterior de la corola, en la base de los nectarios, algunos pétalos en particular, estructuras asociadas a los pétalos, estilos y estigmas. Y tales cambios pueden ocurrir en una sola de estas partes o en varias o todas ellas simultáneamente.

Todos estos mecanismos tienen una base bioquímica que implican la aparición o desaparición de tres tipos fundamentales de pigmentos florales: las antocianinas y carotenos ya citados, así como las betalaninas; e igualmente las posibles variaciones de pH en el medio (Yazaki, 1976). El propio proceso de polinización parece estimular la producción de etileno en algunas Fabaceae (como en *Lupinus* o altramuz); este etileno difunde posteriormente induciendo la aparición de tonalidades rojizas. Paralelamente, durante el climaterio floral se produce una gran demanda de oxígeno, que ha sugerido una relación directa entre la disminución de este gas y la producción de coloración cianótica (Saito, 1993). Se ha observado igualmente que algunos cambios ocurren a una tasa constante, independientemente de la presencia o no de polinizadores, mientras que otros son inducidos por el polinizador (Ne'eman & Neshet, 1995). La predictabilidad o no de estos cambios está relacionada con algunas características bien de la especie, bien del medio. Así, los cambios no inducibles podrán haber evolucionado a bajas tasas de remoción de polen, o bien cuando se requieren muchas visitas para extraer todo el polen (Casper & La Pine, 1984); los cambios inducibles surgen a partir de visitas de polinizadores poco previsibles, como consecuencia de la escasez de los propios polinizadores e igualmente acontece cuando todo el polen es extraído en una única visita (Lamont, 1985). Con todo, nuevamente se pone de

manifiesto que esta diversidad de mecanismos fisiológicos apunta a posibles or genes evolutivos diferentes para los cambios florales.

Ahora bien, ¿cual es verdaderamente la función de este cambio de coloración? La explicación más sencilla parece ser la ya expuesta, de **atraer a los polinizadores**, y dentro de esta función se diferencian además varias hipótesis: (i) interferencia con la polinización, por la cual la reducción de polinizadores ineficientes maximiza la producción de semillas viables (ii) eficiencia en el 'pastoreo' por parte de los polinizadores, de modo que el aumento del tiempo de permanencia de los polinizadores en la planta, buscando néctar en distintas flores induce un aumento en la eficacia biológica de la planta y (iii) eficiencia de la polinización, por la que una restricción en el número de polinizadores que visitan flores viables dan igualmente lugar a plantas con mayor eficacia biológica (es decir, mayor éxito reproductivo en general). Ahora bien, al cambio en la coloración floral se le atribuyen otras funciones como la atracción a larga distancia, las restricciones fisiológicas, la translocación de nutrientes, la indicación de dicogamia, 'test de inteligencia' o incluso la total ausencia de significado.

La **atracción a larga distancia** se basa en el hecho de mantener sobre la planta las estructuras florales externas de aquellas flores que ya han sido fecundadas. El objeto es aumentar la cantidad o tamaño de estructuras florales (como cap tulos o inflorescencias) que se presentan a los polinizadores, de modo que estos detecten tales estructuras desde largas distancias; las diferencias de color entre flores fecundadas y no fecundadas servir a pues, como un mecanismo de alerta para los polinizadores, a corta distancia (Wolfe, 1987). El hecho de que algunas plantas mantengan las flores ya fecundadas es debido a **restricciones fisiológicas** tales como que la abscisión requiera varios días para completarse o bien que los tubos polínicos necesiten igualmente varios días para alcanzar el ovario (Delph & Lively, 1989). Otra propuesta sugiere que el mantenimiento de flores ya polinizadas representa una vía de **retranslocación de nutrientes**, es decir una manera de transportar los nutrientes contenidos en las plantas ya fecundadas a los frutos y/o semillas en desarrollo (Lamont, 1985). Una observación curiosa llevada a cabo en 1793 por Sprengel en *Aesculus hippocastanum* fue referente a la **dicogamia**. Este autor observó que los polinizadores de esta planta visitaban preferentemente flores con nectarios amarillos y raramente visitaban aquellas con nectarios rojos, concluyendo inicialmente que el color amarillo resultaba más atractivo a los insectos que el rojo; así, en su fase amarilla las flores eran masculinas, mientras que la fase roja correspondía a las flores femeninas y el cambio de color servía

para dirigir a los insectos primero hacia las flores masculinas donde recogen el polen para después visitar las flores rojas, es decir las flores femeninas, donde depositan el polen recién recolectado. Desafortunadamente estas observaciones no son correctas en lo que a la flora se refiere, pero vale la pena sean citadas en este trabajo. Otro elemento que también merece la pena presentar y que completa algunas de las propuestas anteriores es aquella que sugiere que el cambio de color en las estructuras florales sirve no solo como una señal para los polinizadores sino también como una especie de *test de inteligencia* que ‘permite a la planta’ separar aquellos que le son útiles en términos de polinización, de los que no lo son o que son incluso potencialmente dañinos (Ascherson, 1988). Los potenciales polinizadores ‘más estúpidos o inútiles’ son aquellos que visitan las flores más conspicuas, con nectarios rojos; por el contrario, los polinizadores ‘inteligentes’ únicamente serán atraídos por las flores menos atractivas, generalmente las de colores pálidos.

Finalmente podría argumentarse que ninguna de estas hipótesis explicativas son válidas y pudiera ser que los cambios de color a los que hemos aludido sea simplemente un proceso secundario, o proceso de envejecimiento natural y espontáneo que puede o no ser mantenido por la selección natural, incluso pudiera ser debido exclusivamente a cambios químicos. No obstante, lo más aceptado y probable es que el mantenimiento de las estructuras florales tras la fecundación es un proceso evolutivamente seleccionado y mantenido ya que el coste de mantenimiento floral diario es muy elevado (hasta el 9% del coste de producir una nueva flor), por lo que la selección no habría operado en el sentido de mantener flores no viables sexualmente a menos que estas tengan algún valor adaptativo (Ashman & Schoen, 1994). Obviamente, la naturaleza de las señales por cambios de color representa una clara intersección entre la plasticidad fisiológica de las plantas, capaces de presentar variadas coloraciones, y de la sensibilidad espectral, exactitud visual y habilidades cognitivas de los polinizadores.

Colores en las aves

Las plumas son la característica distintiva de las aves, realmente la única que no comparten con ningún otro grupo de animales. Son las plumas las que les proporcionan protección contra el frío y el calor intensos, les permiten desplazarse fácilmente en el aire y el agua, les esconden de sus enemigos y son también una de las causas de que el hombre las haya domesticado, atrapado y cazado. Pero sin lugar a dudas, lo más llamativo del plumaje es su colorido, que además, tiene un importante valor funcional (National Geographic, 1990). El

variado colorido de las plumas, muchas veces metálico o iridiscente, es producido por la acción de pigmentos biológicos (biocromos) o por el efecto físico de la dispersión de la luz a cargo de las estructuras (esquemocromos) que se encuentran en las barbulas de las plumas y producen la gran variedad de colores observados en las plumas (Figura 7). En general podemos reconocer tres clases de pigmentos: las melaninas, los carotenos y las porfirinas.

El pigmento principal que se encuentra en las plumas es la melanina, aminoácido productor del color de la piel de los humanos, y en las aves el color café y el negro así como sus variaciones. El exceso de melanina puede conducir a que algunos individuos sean anormalmente negros, llamados melánicos, mientras que su falta absoluta produce individuos anormalmente blancos o albinos; la melanina, además, proporciona resistencia adicional a las plumas haciéndolas más duraderas al desgaste, por eso en muchas aves con alas dispuestas para el vuelo rápido, su coloración es negra y la estructura más rígida, como en los vencejos (Begon *et al*, 1999).

Los colores amarillos, naranjas y rojos son producidos por sustancias llamadas carotenos, similares a los que dan el color naranja a la zanahoria. Se han detectado varios tipos de carotenos en las aves, que provocan los colores naranja brillante del gallito de las rocas y las calandrias; se conoce además que algunos de ellos son ingeridos en los alimentos vegetales, por esta razón, algunas aves en cautiverio con el tiempo presentan plumajes destenidos, ya que las fuentes de pigmentos carotenicos no están incluidas en su dieta. Es el mismo caso de los flamencos de los zoológicos, donde para evitarlo, se agregan colorantes de naturaleza carotenica al agua que beben y así los "pintan".

Las porfirinas integran otro grupo de pigmentos nitrogenados de estructura química parecida a la hemoglobina de la sangre que dan como resultado colores verdes, rosas y rojos principalmente. Los turacos poseen un par de pigmentos llamados turacina (rojo) y turacoverdina (verde), que solo en ellos aparece (Attenborough, 1998). Generalmente la turacina se concentra en parches muy vistosos en las alas, mientras que la turacoverdina se encuentra en todas las plumas verdes. Estos se encuentran entre los pocos pigmentos de color particular encontrados en las aves.

Muchos colores son producidos por la dispersión de la luz a través de las capas de queratina, que funciona de manera similar al paso de la luz por un prisma, o por interferencias que pueden ser constructivas para muchos colores y destructivas para otros.. El blanco, el azul, el verde y el violeta, rara vez son producidos por pigmentos; por lo general se deben a que las diferentes capas de proteína que cubren las plumas reflejan la luz

de los pigmentos internos de diferentes maneras; así, el azul, por ejemplo, es resultado de la pigmentación con melanina. De igual manera se producen los colores iridiscentes encontrados en los plumajes de los colibríes, trogones, quetzales y jacamares, que cambian de acuerdo con la posición de la pluma con respecto a la luz (National Geographic, 1999).

La diferencia de coloración en el plumaje de las aves tiene distintos significados. En primer lugar indica la edad del individuo, predominando los colores claros en las etapas infantiles y juveniles (Begon *et al.*, 1999). Efectivamente, la diferencia principal con el plumaje que van a adquirir como adultos está en que las plumas de vuelo son más cortas, su textura más suave y el patrón de color diferente. Por ejemplo, en las diversas especies de zorzales, el plumaje juvenil tiene un patrón moteado, a pesar de que los adultos son de colores lisos. Esto se ha interpretado como prueba de las relaciones evolutivas cercanas entre los miembros de este grupo. Los carpinteros arlequines juveniles presentan un plumaje más pálido, aunque de patrón similar al de los adultos. Curiosamente, en muchas especies el plumaje juvenil de los machos se parece mucho al de las hembras adultas, por lo que a veces es imposible distinguirlos (Begon *et al.*, 1999). Existen dos tipos de plumaje adulto; el primero es llamado plumaje básico o de invierno, que aparece en los periodos no reproductivos, es de colores poco llamativos y se adquiere antes de migrar en invierno o al terminar la reproducción. El segundo es llamado plumaje nupcial, de reproducción o alternativo, y es de colores llamativos, con algunas plumas ornamentales, como las largas y filamentosas plumas del dorso de las garzas, y se adquiere antes de la reproducción o antes de la migración de regreso al área reproductiva. Sin embargo, no todas las aves presentan diferencia en el patrón del plumaje en tiempo de reproducción y en invierno. En los patos, las aves de playa y las gaviotas, son evidentes los plumajes de invierno de colores pardos y grises, en contraste con los plumajes de reproducción.

En los patos se encuentra un plumaje especial llamado plumaje eclipse, que adquieren los machos poco después del apareamiento y es muy parecido al de la hembra. Dura poco tiempo y se piensa que tiene la función de proteger al macho de los depredadores durante la incubación. Muchas veces se encuentran plumajes completamente diferentes entre machos y hembras, a lo que se le llama dimorfismo sexual. Por lo general, las aves que tienen el plumaje más vistoso son las del sexo dominante: faisanes, gallos, avestruces, colibríes y trogones, las hembras de los falaropos y algunas avutardas.

La importancia del plumaje y su color en la vida de las aves es grande pues son animales cuyo sentido de la vista está altamente desarrollado. Los colores tienen

importancia fundamental para distinguir a los individuos de la misma especie, los depredadores, las presas o a la pareja. Los patrones de color de los chotacabras, los tinamues y los gorriones de los pastizales son pardos, moteados y rayados, lo que les permite confundirse fácilmente con el medio, llamándose a estos plumajes crípticos. Las avefrías viven en zonas rocosas, y sus plumajes presentan bandas anchas y colores contrastantes, que les ayudan a perderse en el medio; a estos se les llama patrones disruptivos. Las tortolitas, muchos gorriones y chipes, generalmente se encuentran en grupos y poseen parches de color vivo, blanco o amarillo, en las alas, cola y rabadilla, solamente visibles cuando el ave vuela. Se piensa que estos patrones sirven como aviso a la parvada en caso de peligro (patrones de advertencia). Otras aves utilizan sus patrones de plumaje para advertir que son peligrosas o tienen mal sabor, como algunas avutardas. Sin embargo, lo más frecuente es que los plumajes muy vistosos sirvan para atraer a la pareja (gamosemáticos).

Algunas aves migratorias como los playeros y chorlitos, mudan su plumaje antes de la migración, reemplazándolo por uno altamente críptico de colores cenizos y grises que les ofrece más posibilidades de retorno al ser menos visibles a los depredadores; esta muda se da al principio de cada invierno y constituye una estrategia altamente eficaz. Algunas gaviotas en las que la madurez sexual se alcanza a los cuatro años de vida, cada año presentan un plumaje con coloración diferente que nunca es igual al del adulto, se cree que es una estrategia para evitar rivalidades con otros individuos adultos de la misma especie permitiendo al juvenil crecer evitando riñas por alimento y espacio dentro de la colonia (Begon *et al*, 1999).

Luz y color en medios acuáticos

Una de las diferencias primordiales entre los ecosistemas terrestres y los acuáticos radica precisamente en la cantidad de radiación luminosa que reciben y en cómo esta está distribuida y utilizada (amen de las características intrínsecas derivadas de las propiedades del aire en uno y del agua en otro). En los medios acuáticos, la energía luminosa es absorbida en gran parte por el agua y la productividad primaria está limitada por la energía luminosa que actúa como factor limitante. Este hecho es aún más patente en medios marinos, donde la iluminación disminuye rápidamente con la profundidad, lo que permite distinguir una zona fótica iluminada en la que puede tener lugar la fotosíntesis y por ende desarrollarse el fitoplancton, y una zona oscura sin el fitoplancton (Adamek & Sukop,

1995). La luz es un elemento indispensable ya que es fuente de vida y genera la cadena alimentaria que sustenta a esta; en terminos generales la diversidad de especies es mas baja en cualquier medio acuatico que en cualquiera de los vecinos ecosistemas terrestres. Ahora bien, en los medios marinos, la biodiversidad de modos de vida es mucho mas elevada que en cualquier otro ecosistema. Quizá los medios marinos mas espectaculares sean los de arrecife ya que estos son de los mas ricos en cuanto a vida marina se refiere, pero curiosamente tambien son los mas exigentes en cuanto la iluminacion (Margalef, 1981).

A la hora de hablar de luz, entran en juego muchos factores para poder entender las caracter sticas de cada tipo. Del mismo modo, las caracter sticas particulares de la luz redundan en distintos efectos sobre la biolog a de los seres vivos. Respondamos ahora a una cuestion sencilla: ¿que color tiene la luz?, ¿blanco?, ¿azul?, ¿amarillo?..... Es frecuente encontrar entre el gran publico como respuesta casi inmediata: blanco. Sin embargo, lo que muchos profanos desconocen es que el blanco es en realidad la suma de muchos colores, la reunion de todos los colores visibles del espectro de luz, que juntos adquieren apariencia blanca. De todos es conocido el fenomeno natural del arco iris. Este fenomeno no es mas que la descomposicion de la luz al pasar por el agua, que actua a modo de filtro descomponiendo la luz blanca en todos sus componentes. Del mismo modo, cuando vemos cualquier otro color, lo que realmente vemos es la suma de varios de los componentes de la luz y la impresion conjunta es un unico color.

La luz viaja en el vac o a 300.000 kilometros por segundo. En la atmosfera, desciende un poco. Sin embargo, al ser el agua un medio 1000 veces mas denso que el aire, la velocidad de la luz en el medio acuoso desciende a 200.000 km/s. Esto se debe a que la luz penetra en el agua 2000 veces peor que en el aire. La luz visible que recibimos del Sol va desde el rojo (700nm), hasta el violeta (400nm). No obstante, en el medio marino las ondas mas cortas y mas largas son atenuadas rapidamente ya que el agua es muy opaca con respecto al ultravioleta y especialmente a la luz roja, pero bastante transparente a la luz azul y verde. Esta caracter stica hace que en los oceanos conforme se va profundizando, se pierda riqueza cromatica, lo que tiene especial importancia ya que en los fondos coralinos la luz que impera de forma mayoritaria es la luz azul. Por debajo de los 10 a 15 primeros metros de profundidad, queda practicamente nada de rojo y amarillo, siendo la luz imperante la verde y mayoritariamente la azul. Esta energ a radiante visible tiene dos importantes funciones en el medio marino. En primer lugar, proporcionar informacion al medio permitiendo que los animales formen las imagenes de lo que ven en sus cerebros

(Ali, 1959). En segundo lugar, proveer al reino vegetal de la energía necesaria para que produzca alimento con el que generaran su propia materia orgánica (Adamek & Sukop, 1995). En todos los procesos vitales, sin duda la fotosíntesis, como ya hemos explicado, ocupa el primer lugar en el rango de importancia, ya que la autogeneración de materia orgánica por parte del reino vegetal constituye el primer eslabón de la cadena de vida. En efecto, si no existiese el reino vegetal, no habría nada orgánico, y por lo tanto, los humanos no existiríamos como depredadores especializados. En las zonas tropicales y ecuatoriales que es donde se sitúan todos los arrecifes coralinos, las variaciones de las estaciones típicas de latitudes mayores, o no se producen o se producen pero de forma mucho más suave. Conforme se está en otoño o invierno, la altura del Sol sobre la vertical es menor, y el ángulo de incidencia de la luz respecto a la superficie del océano se hace también menor. Esto provoca que se produzcan los fenómenos de reflexión, que llevan consigo una disminución del porcentaje de penetración de la luz en el agua (Blaxter & Parrish, 1965). De igual modo, el grado de penetración de la luz también varía a lo largo del día, en ciclos mañana-tarde. El máximo grado de penetración se alcanza a las 12.00 del medio día solar, justo cuando el sol emite luz en perpendicular a la superficie del océano. De esa cantidad, debido a los fenómenos de reflexión y de absorción, solo consiguen penetrar unos 95.000 lúmenes en el agua. Pero estos lúmenes van decreciendo rápidamente, de forma que por debajo de los 150 metros de profundidad lo único que hay es una obscuridad intensa. La penetración de la luz en la superficie del océano también depende de las condiciones climáticas. En un día en calma, la tasa de reflexión será de tan solo un 4%. Sin embargo, si no lo es, se producen una tasa en torno al 25%. Bajo estas condiciones, tan solo un 20% (unos 15.000 lúmenes) penetran a unos 15-20 metros de profundidad. Es precisamente a una profundidad de 10 metros, donde se alcanza la máxima tasa de fotosíntesis por parte de los organismos autóctonos (vegetales) y en donde se pueden medir unos 30.000-35.000 lúmenes. El punto de saturación de luz es diferente para cada tipo de alga. Este fenómeno de saturación se produce cuando la intensidad de la luz alcanza un punto donde los cloroplastos han alcanzado la máxima actividad fotosintética. El punto de compensación es el punto de intensidad de luz donde la producción de oxígeno de la fotosíntesis es suficiente para compensar el consumo de oxígeno durante la fase de respiración de la planta o alga. Toda alga que reciba luz por debajo del punto de compensación puede llegar a morir. Es de fundamental importancia conocer que la mayor parte de los invertebrados marinos del tipo de corales, anémonas, etc., contienen dentro de sus tejidos exteriores, viviendo dentro de sus

propias células (endosimbióticas), un conjunto de algas microscópicas llamadas zooxantelas. Dicha relación consiste en que las algas, a cambio de poder vivir en un lugar protegido de agresores externos y en un enclave idóneo para captar luz solar con la que realizar la fotosíntesis (su socio invertebrado), ceden a su hospedador glucidos sintetizados a través de la fotosíntesis; así el invertebrado dispone de estos compuestos como alimento, los cuales son utilizados en la producción de aminoácidos con los que construye sus tejidos y otras sustancias orgánicas. De aquí podemos concluir la enorme importancia que tiene la luz como elemento dador de vida para el arrecife (Blaxter & Parrish, 1965). De algún modo, vemos como el arrecife se comporta como un enorme panel solar que capta toda su energía de la luz. Es importante señalar que las zooxantelas, responsables de la salud de los invertebrados, necesitan más luz que las macroalgas como las incluidas en el género *Caulerpa*, por citar alguno. No obstante, si los invertebrados pertenecen a un estrato en el nicho del arrecife muy superficial, sus zooxantelas necesitarán una mayor intensidad de luz, que si se localizan en aguas medias o profundas. El tipo de pigmentación que mayoritariamente contenga el alga condiciona el tipo de luz con la que realizará la fotosíntesis.

Respecto a organismos superiores no siempre se presenta de forma clara la relación con el espectro e intensidad de luz, aun siendo dicha relación muy importante. Se puede llegar a la inadecuada conclusión de que como los peces no realizan la función fotosintética, la luz no es un factor que les implique directamente (Blaxter & Parrish, 1965). El pez coralino es un ser vivo que está acostumbrado a los máximos niveles de estabilidad e idoneidad en su medio. El hábitat del arrecife de coral en muchos sentidos es idóneo. Las características químicas y físicas del hábitat marino, son extraordinariamente estables en prácticamente todos los parámetros que lo definen. Pero no son solo estables, sino que además los podemos calificar de ideales. A ello contribuye también la calidad y cantidad de luz (Steven, D.M. 1959). Debido a que la presencia de plancton en suspensión es muy baja, las aguas coralinas son extraordinariamente transparentes.

Este factor favorece que la penetración de la luz sea importante, al no encontrar esta en su camino ningún elemento que la detenga. El que el arrecife coralino esté muy iluminado no solo determina un factor de dependencia del invertebrado con zooxantelas y de las macroalgas, sino que también el pez coralino está sujeto a la cantidad de iluminación. De hecho, hay estudios que demuestran que la capa de mucosa de los epitelios de los peces está en directa relación con la recepción de la adecuada luz por parte del pez. En efecto, el

pez bajo unas condiciones adecuadas y naturales de luz, esta continuamente segregando una mucosa que constituye la primera barrera entre el medio exterior y su organismo (Steven, D.M. 1959). Así, cuando esta barrera mucosa está en perfectas condiciones, todas las enfermedades exteriores (parasitosis y/o parasitosis externas, externas, ect.) tienen muy difícil su penetración. Bajo las condiciones adecuadas de iluminación es prácticamente imposible que aparezcan enfermedades como Oodinium o Cryptocarium. Por otro lado, la adecuada luz en cantidad y calidad que obtiene el pez en el arrecife, le sirve para sintetizar la vitamina D.

Un fenómeno común recientemente observado en reptiles

Las variaciones en la coloración de los organismos es un proceso normal, que puede ser indicativo de aclimatación e incluso adaptaciones a diversos hábitats, así como una clara señal de plasticidad fenotípica tanto en plantas como animales (Begon *et al.*, 1999). El color blanco predominante en organismos árticos o típicos de climas fríos, o bien la pigmentación oscura en humanos que habitan zonas terrestres extremadamente cálidas y expuestos a prolongadas horas de radiación solar. Los primeros están diseñados para captar la máxima radiación posible, mientras que los segundos, bien provistos de melanina, tienen una piel capaz de repeler la luminosidad.

A otro nivel, el color de la sangre también es indicadora de diferentes estados en los organismos. A pesar de lo jocoso que pueda resultarnos, la pigmentación azul de la sangre, atribuida vulgarmente a la realeza, no es algo tan raro en la naturaleza. Recientemente (Pennacchio, 2001) se ha puesto de manifiesto este hecho en el lagarto de ‘cola roma’ *Trachysaurus rugosus*, la posibilidad de cambiar el color de su suero hemático como consecuencia de particulares estados fisiológicos. El estudio de la sangre y del sistema inmune de esta especie ha puesto de manifiesto que el suero de individuos sanos presenta color amarillo, más o menos pálido. Sin embargo, algunos individuos presentan ese suero de color verde-azulado. Un análisis químico detallado de la sangre reveló que los lagartos con sangre azul padecían una ictericia verde, estado fisiológico resultante de un exceso del pigmento bilico denominado biliverdina, que es el responsable del reciclado de la hemoglobina. En la mayoría de los vertebrados superiores, la biliverdina es rápidamente oxidada a bilirrubina (el pigmento responsable de la ictericia amarilla en humanos). Si bien no es una enfermedad muy común, la hiperbiliverdinemia (exceso de biliverdina) se ha descrito en varias especies de peces, insectos, ranas, reptiles, huevos de aves, placenta de

perros e incluso en humanos (Berne & Levy, 1987). ¿Que causa esta enfermedad? Entre las causas mas ampliamente aceptadas indican que la hiperbiliverdinemia es una respuesta inmune del organismo a elevadas intensidades de rayos Ultra Violeta, por lo que los individuos bajo condiciones estresantes de luz son mas propensos a desarrollar este estado. Otra teoria apunta a la posibilidad de aumentar la concentracion de determinados lipidos en el organismo, haciendo a su portador desagradable al paladar de los depredadores. No obstante Pennacchio (2001) sugiere que este cambio en el color del suero sanguineo es un indicador de alguna clase de infeccion viral o bacteriana, pero aun son necesarias mas investigaciones para poder concluir con exactitud cuales son las verdaderas causas de este estado hematico.

Rechazo a la luz

Curiosamente, la luz no resulta beneficiosa para todos los organismos y asi podemos encontrarnos con numerosos ejemplos de seres con habitos nocturnos. En la mayor parte de los casos se trata de organismos que habitan zonas con climas extremos en los que las temperaturas diurnas son tal elevadas que no pueden tolerarlas, por lo que a fin de evitar exposiciones a las mismas con los consiguientes riesgos de quemaduras y perdidas de agua, desarrollan sus actividades al amparo de la noche (Ricklefs, 1998). En otros casos la adecuacion a la oscuridad es debida a la carencia de estructuras para soportar la luz o bien la tenencia de estructuras 'supersensibles'. El caso mas extremo lo encontramos en la intolerancia a la luz en individuos particulares de una especie dada que al contrario que sus congeneres, presentan reacciones alergicas en presencia de la luz. Tal fenomeno se encuadra dentro de las alergias y no es infrecuente en el caso de humanos. Los especialistas establecen una clara diferencia entre reacciones fototoxicas y las fotoalergicas, ambos producidos o agravados por la accion de la luz solar. Las primeras, las reacciones fototoxicas, son las mas frecuentes y se caracterizan por cierta intolerancia a la luz solar. Las segundas, verdaderas alergias a la luz solar, representan trastornos del sistema inmunologico del individuo, el cual es responsable de la aparicion de lesiones tras la exposicion a la luz solar. Aparecen tras la exposicion a la luz solar tras la ingestion o aplicacion sobre la piel de sustancias fotosensibilizantes que la luz solar convierte en alergenicar. Son respuestas de caracter retardado, que aparecen tras horas o dias y estan mediadas por diversas sustancias (antibioticos, aerosoles antiinflamatorios, antihistaminicos topicos, diureticos orales, perfumes, filtros solares, alquitranes, plantas,

sulfuro de cadmio usado en los tatuajes, etc.). El resultado es la aparición de eritemas, exantemas y/o prurito.

Los casos más extremos se dan en personas con problemas de retina que resultan en fotofobias, o en enfermos de porfiria, lupus eritematoso, cuyo tejido cutáneo se daña ante el sol como consecuencia de alteraciones de los mecanismos naturales de protección y reparación ante los rayos del sol. Los licántropos (hombres lobo), personas con hábitos nocturnos e intolerantes a la luz, son un claro ejemplo de estas reacciones ante la radiación solar. Afortunadamente, se trata de enfermedades poco comunes y no hereditarias.

Agradecimientos

Esta revisión ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, Proyecto REN2004-0749 GLO.



Figura 1



Figura 6. *Chamelaucium uncinatum* es un ejemplo de especie que modifica la coloración una vez que las flores han sido polinizadas. Tonalidades pálidas indican disponibilidad de néctar y polen, mientras que la roja es indicativa de polinización completada.



Figura 7. Detalle del plumaje de un pavo real

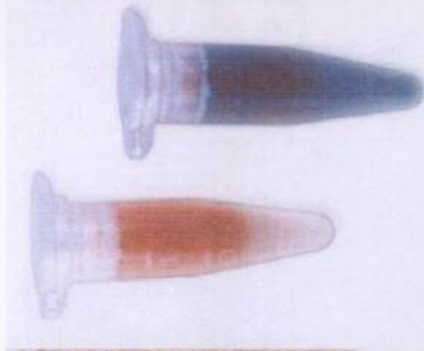


Figura 8. Ejemplar de lagarto de cola roma (*Trachysocaurus rugosus*) y muestras de suero sanguíneo extraído de un animal sano (amarillo) y de un animal con hiperbilirubinemia (azul).

Referencias Bibliograficas

- Adamek, Z. & Sukop, I. 1995. Zooplankton and zoobents development in ponds stocked with tench fry in mono- and polycultures with herbivorous fish. Polish Archives of Hydrobiology 42: 181-186.
- Ali, M.A. 1959. The ocular structure, retinomotor and photobehavioural responses of the juvenile Pacific salmon. Canadian Journal of Zoology 37: 965-996.
- Ascherso, P. 1988. Der Farbwechsel des Safmals in den Blüten der Rosskastanie. Naturwiss. Wochenschrift 2.
- Ashman, T. & Schoen, D.J. 1994. How long should flower live? Nature 371: 788-790.
- Attenborough, D. 1998. The life of Birds. BBC Books. Londres.
- Barquera, W. 1809. F sica de la luz. Imprenta de Mar a F. de Jauregui, Mexico.
- Baskin, J. M. & Baskin, C. C. 1972. The light factor in the germination ecology of *Drava verna*. Amerian Journal of Botany 59: 756-759.
- Baskin, J. M. & Baskin, C.C 1977. Germination of common milkweed (*Asclepias syriaca* L.) seeds. Botanical Gazette 137: 269-273.
- Begon, M., Harper, J. L. & Townsend, C.R. 1999. Ecolog a: Individuos, poblaciones y comunidades. Ediciones Omega. Barcelona.
- Berne, R.M. & Levy, M.N. 1987. *Fisiolog a*. Panamericana.
- Blaxter, J.H.S. & Parrish, B.b. 1965. The importance of light in shoaling, avoidance of nets and vertical migration by herring. Journal of Conservation and Permiculture. Int. Explor. Mer. 30: 40-57.
- Casper, B. B. & La Pine, 1984. Changes in corolla color and other floral characteristics in *Cryptantha humilis* (Boraginaceae): cues o discourage pollinators? Evolution 38: 128-141.
- Delph, L. F. & Lively, C. M. 1989. The evolution of floral color change: Pollinator attraction versus physiological constrains in *Fuchsia excorticata*. Evolution 43: 1252-1262.
- Fenner, M. 1985. Seed Ecology. Chapman and Hall. London, New York.
- Fruento, A.S. 1995. Biof sica. 3ª edicion. Mosby-Doyma.
- Giurfa, M., Nunez, J., Chittka, L. & Menzel, R. 1995. Colour preferences of flower-native honeybees. Journal of Compared Physiology. A 177: 247-259.

- Grime, J. P., Mason, G., Curtis, A.V., Rodman, J., Band, S.R., Mowforth, M.A.G., Neal, A.M. & Shaw, S. 1981. A comparative study of germination characteristics in a local flora. *Journal of Ecology* 69: 1017-1059.
- Jou, D., Llebot, J. E. & Perez Garcia, C. 1994. *Física para ciencias de la vida*. McGraw Hill.
- Kendrick, R. E. 1976. Photocontrol of seed germination. *Science Programme*. Oxford 63: 347-367.
- Lamont, B.B. 1985. The significance of flower colour change in eight co-occurring shrub species. *Botanical Journal of the Linnean Society* 90: 145-155.
- Lunau, K. 1996. Unidirectionality of floral colour changes. *Plant Systematics and Evolution* 200: 125-140.
- Margalef, R. 1981. *Ecología. Planeta*. Barcelona.
- Menzel, R. 1985. Learning in honeybees in an ecological and behavioral context. In: Holldobler, B. And Lindauer, M., eds. *Experimental behavioral ecology and sociobiology*. G. Fischer Verlag, Stuttgart, pp. 55-74.
- Miller, K.r. 1979. The photosynthetic membrane. *Scientific American* 21: 102-113.
- Mooney, H.A. & Ehleringer, J. R. 1997. Photosynthesis, In: M. J. Crawley (ed.) *Plant Ecology*. Blackwell Science, UK. Pp: 1-28.
- National Geographic, 1999. *El maravilloso mundo de los animales. Introducción al mundo de las aves*. RBA Publicaciones. Barcelona.
- Ne'eman, G. & Neshet, R. 1995. Pollination ecology and the significance of floral color change in *Lupinus pilosus* L. (Fabaceae). *Israel Journal of Plant Science* 43: 135-145.
- Pennacchio, M. 2001. Green-blooded lizards. *Wildlife*, summer 2001: 14.
- Ricklefs, R. E. 1998. *Invitación a la Ecología. La Economía de la Naturaleza*, 4ª edición. Panamericana.
- Rodríguez-Echeverría, S. & Pérez-Fernández, M.A. 2001. Light and nutrients availability determine seeds germination in five perennials. *Journal of Mediterranean Ecology* 2: 83-91.
- Saito, K. 1993. The catalytic aspects of glucose oxidase in the red color shift of *Carthamus tinctorius capitula*. *Plant Science* 90: 1-9.
- Steven, D.M. 1959. Studies on the shoaling behaviour of fish. 1. Responses of two species to change of illumination and to olfactory stimulus. *Journal of Experimental Biology* 36: 261-280.

- Weiss, M.R. 1995. Floral colour change: a widespread functional convergence. *American Journal of Botany* 82: 167-185.
- Weiss, M.R. & Lamont., B.B. 1997. Floral color change and insect pollination: a dynamic relationship. *Israel Journal of Plant Sciences* 45: 185-199.
- Wolfe, L.M. 1987. Inflorescence size and pollinaria removal in *Asclepias curassavica* and *Epidendrum radicans*. *Biotropica* 19: 86-89.
- Yazaki, Y. 1976. Co-pigmentation and the colour change with age in petals of *Fuchsia hybrida*. *Botanical Magazine* 89: 45 -47.

Nota: Este artículo está reproducido con las imágenes en color en la dirección web: <http://www.unex.es/~optica> dentro del apartado “Enlaces Interesantes”