

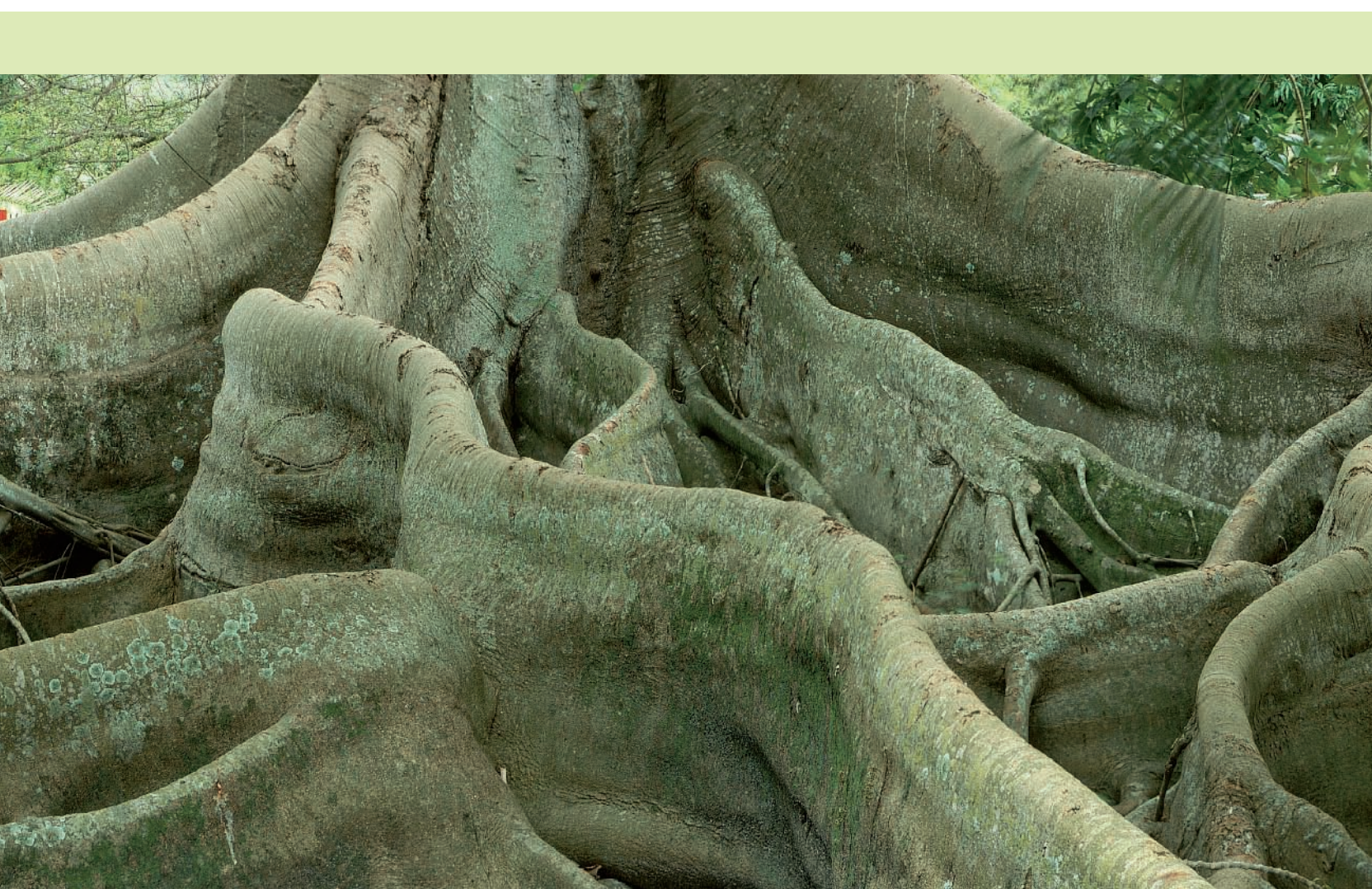
EL PROCESO DE NUTRICIÓN EN LAS PLANTAS

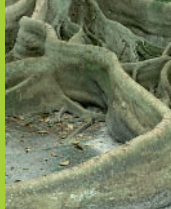
En esta unidad aprenderás:

- La función de nutrición en las plantas
- Nutrientes imprescindibles para el desarrollo vegetal
- Las fases de la nutrición en las plantas
- Otros tipos de nutrición en las plantas

La vida es la transmutación de la luz. Es materia y energía del Sol convertida en el fuego verde de los seres fotosintetizadores.

Lynn Margulis y Dorion Sagan





11.1 La función de nutrición en las plantas

Los organismos que sintetizan materia orgánica a partir de materia inorgánica y energía solar se denominan **autótrofos foto-sintéticos** o **fotoautótrofos**.

Todos los seres vivos necesitan nutrirse.



La **función de nutrición** es el proceso por el cual los seres vivos obtienen la materia y la energía que necesitan para formar sus propias estructuras y realizar sus funciones vitales.

La energía que utilizan los seres vivos procede de la degradación de la materia orgánica. Los animales no tienen más remedio que conseguir este tipo de materia, ya fabricada, ingiriendo otros seres vivos. Las plantas, en cambio, son auténticas «fábricas» de materia orgánica. Les basta con ponerse al sol, captar del aire dióxido de carbono y absorber por las raíces agua y sales minerales.

CEO

En el **CEO (centro de enseñanza on-line)** creado para este proyecto podrás encontrar el siguiente material adicional:

Enlaces, bibliografía, actividades interactivas (la fotosíntesis, elementos que intervienen en el transporte vegetal, absorción y transporte de agua y sales) y animaciones (transporte por el floema, fotosíntesis, flujo a presión y hojas).

11.2 Nutrientes imprescindibles para el desarrollo vegetal

De los 90 elementos químicos que aparecen en la naturaleza, 60 se pueden encontrar en las plantas, aunque de ellos, sólo 16 se consideran **elementos esenciales**, de forma que éstas no se desarrollan cuando falta cualquiera de ellos. De estos elementos esenciales, sólo el carbono y el oxígeno provienen del aire; los 14 restantes son suministrados por el suelo.

Elemento	Forma de asimilación	Concentración en tej. seco ¹	Funciones
Carbono	CO ₂	45	Forma parte de todas las moléculas orgánicas.
Oxígeno	O ₂ , C ₂ O	45	Forma parte de todas las moléculas orgánicas.
Hidrógeno	H ₂ O	6	Forma parte de todas las moléculas orgánicas.
Nitrógeno	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	1,5	Componente de todos los aminoácidos y nucleótidos.
Potasio	K ⁺	1	Interviene en la apertura y cierre de los estomas.
Calcio	Ca ²⁺	0,5	Forma parte de la pared celular y regula la permeabilidad celular.
Fósforo	H ₂ PO ₄ ⁻	0,2	Componente de los nucleótidos y de los lípidos que forman las membranas.
Magnesio	Mg ²⁺	0,2	Forma parte de la clorofila.
Azufre	SO ₄ ²⁻	0,1	Componente de algunos aminoácidos.
Cloro	Cl ⁻	0,01	Protege los fotosistemas de componentes oxidantes producidos durante la fotólisis del agua.
Hierro	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	0,01	Forma parte de algunos transportadores de electrones y activa enzimas importantes en la síntesis de clorofila.
Cobre	Cu ⁺ , Cu ²⁺	0,006	Forma parte de algunos transportadores de electrones y de algunas enzimas.
Manganeso	Mn ²⁺	0,005	Activa enzimas importantes para el catabolismo y es necesario para la liberación de oxígeno durante la fotosíntesis.
Zinc	Zn ²⁺	0,002	Activador o componente de muchas enzimas.
Boro	BO ₃ ³⁻	0,002	Forma un complejo con los azúcares, facilitando su transporte por la planta.
Molibdeno	MoO ₄ ²⁻	0,00001	Importante para la asimilación de nitratos.

1. El tejido seco es el que resulta después de eliminar el agua de la planta. La concentración se da en %.

Tabla 11.1 Elementos esenciales para las plantas.

11.3 Las fases de la nutrición en plantas

En el proceso de nutrición de las plantas, se distinguen las siguientes fases:

- Absorción y transporte de agua y sales minerales desde la raíz hasta el xilema.
- Transporte del agua y sales minerales por el xilema.
- Intercambio de gases en las hojas.
- Fotosíntesis.
- Transporte de materia orgánica por el floema.
- Respiración celular.
- Excreción de los productos de desecho del metabolismo.

Absorción y transporte de agua y sales minerales desde la raíz hasta el xilema

El suelo está constituido por pequeñas partículas de roca y materia orgánica que albergan espacios rellenos de aire y de agua. Del suelo, las plantas van a extraer agua y sales minerales. Solamente los minerales que están disueltos en agua pueden entrar en la raíz.

Estos nutrientes son absorbidos a través de unas células especializadas, llamadas **pelos absorbentes**, que se encuentran, fundamentalmente, en la zona pilífera de la raíz (véase la Figura 11.1).

Los pelos absorbentes son, en realidad, células epidérmicas especializadas que durante el proceso de diferenciación sufren una **evaginación**, que tiene como objetivo aumentar la superficie de absorción.

Después, los nutrientes tienen que atravesar los distintos tejidos de la raíz hasta llegar al xilema que, a su vez, los conducirá hasta el aparato fotosintético de la planta.

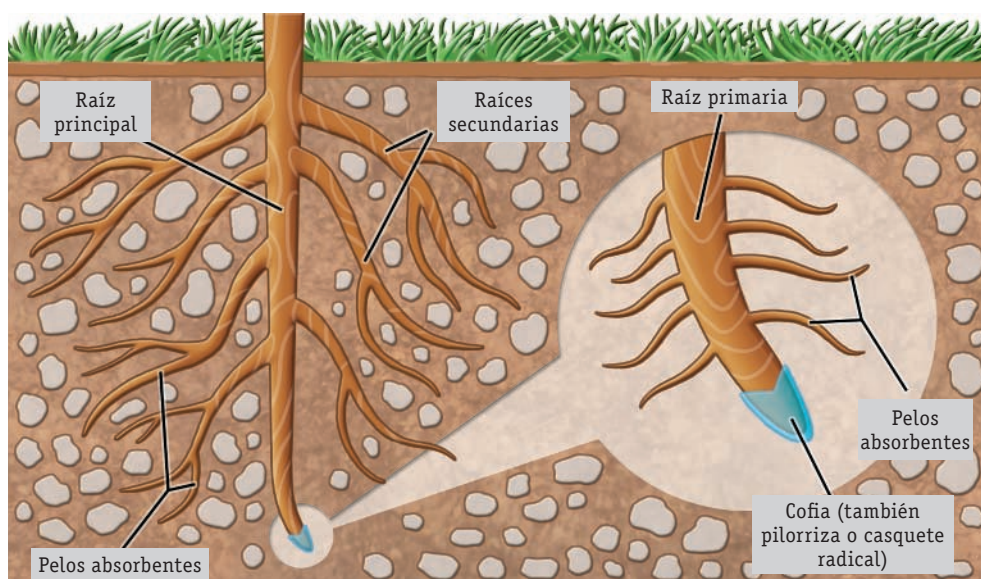


Fig. 11.1. Estructura de la raíz.

Abonos orgánicos versus abonos inorgánicos

En los ecosistemas naturales, los nutrientes del suelo no se agotan porque hongos y bacterias permiten su reciclado, al descomponer los cadáveres y desechos orgánicos. Sin embargo, la extracción de la cosecha en los suelos cultivados exige la utilización de fertilizantes para reponer la pérdida de nutrientes. Tradicionalmente, la agricultura utilizó abonos orgánicos (estiércol y compost) que los organismos descomponedores del suelo iban transformando lentamente en sales minerales. Actualmente, la mayoría de los agricultores dependen de fertilizantes inorgánicos comerciales que contienen nitrógeno (en forma de nitrato), fósforo (en forma de iones fosfato) y potasio (en forma de iones potasio). Estos abonos inorgánicos son más fáciles de transportar, almacenar y aplicar y han aumentado considerablemente la producción agrícola; sin embargo, tienen importantes inconvenientes: al no aportar humus (materia orgánica) al suelo, éste pierde su capacidad para retener agua y se compacta (por lo que también reduce su contenido de oxígeno); además, pueden llegar a contaminar las aguas subterráneas, porque algunas sales serán arrastradas por el agua de lluvia hasta los acuíferos.

Evaginación: protuberancia o saliente en una célula o en una cavidad.



Fig. 11.2. Musgo.

La incorporación del agua y las sales minerales, y su posterior transporte dentro de la planta, no se realiza por igual en todos los grupos vegetales. En los briofitos, el agua y las sales minerales se absorben por toda la superficie del vegetal y, después, se distribuyen lentamente célula a célula. La ausencia de xilema y floema, que permiten transportar los nutrientes entre zonas alejadas del vegetal, así como la falta de lignina, que endurece las paredes de las células y proporciona sostén, explican el pequeño tamaño de estas plantas.

Los plasmodesmos son poros de la pared celular de la célula vegetal, que conservan la lámina media.

El movimiento del agua y de las sales desde la epidermis de la raíz hasta el xilema del cilindro vascular puede seguir dos vías:

- Una **vía transcelular o simplástica**, es decir, pasando de célula a célula a través de los plasmodesmos. Como la concentración de sales minerales en el suelo es menor que la concentración de sales en el interior de la planta, su ingreso en las células se realiza por **transporte activo**, a través de unas **proteínas transportadoras** que se encuentran en las membranas celulares y supone un coste energético (*ATP*) para la planta. El agua penetra en los tejidos de la raíz por ósmosis.
- Una **vía extracelular o apoplástica**, es decir, aprovechando los grandes espacios intercelulares existentes entre las células parenquimáticas del córtex de la raíz. Es probable que la mayor parte de agua y sales minerales aprovechen esta vía, sin embargo, al llegar a la **endodermis** (la capa interna del córtex), ambos caminos convergen, debido a que esta capa resulta infranqueable por la vía extracelular. Los espacios intercelulares de la endodermis están fuertemente sellados por la **banda de Caspari**, un cinturón de suberina, sustancia muy impermeable que envuelve las paredes radial y transversal de estas células (véase la Figura 11.3).

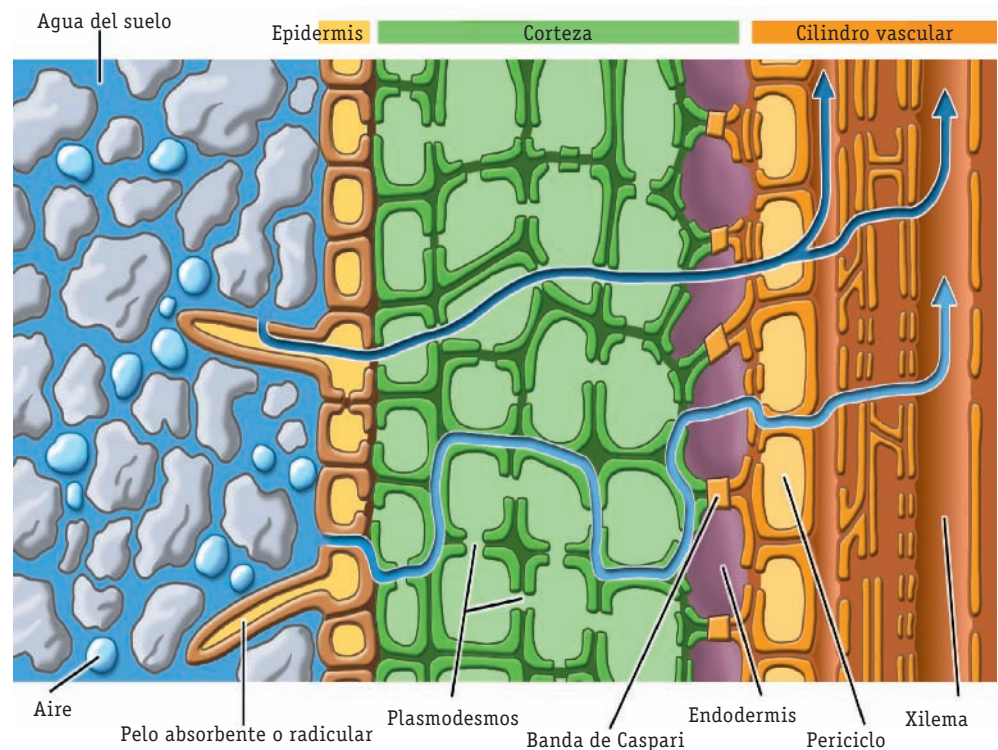


Fig. 11.3. Corte transversal de una raíz.



Actividad resuelta

Tanto en la vía transcelular como en la extracelular, el agua y las sales minerales deben atravesar la membrana de las células de la endodermis, porque la banda de Caspari impide el paso de sustancias entre las células. ¿Qué significado biológico tiene la existencia de esta banda?

La banda de Caspari es de gran importancia para las plantas porque permite controlar el paso de las sales minerales hacia el interior de la raíz. A causa del transporte activo, la concentración de minerales aumenta en el interior del cilindro vascular. Si las células de la endodermis no estuvieran selladas, se producirían fugas de nutrientes hacia el exterior, lo que desperdiciaría la energía empleada por las células vegetales en introducirlos por transporte activo.

Transporte de agua y sales minerales por el xilema

Las sales minerales y el agua forman la **savia bruta**, que tiene que recorrer grandes distancias a lo largo del xilema hasta llegar a las hojas, donde se realiza la fotosíntesis.

Mientras que los animales gastan mucha energía en mover el corazón, las plantas, sorprendentemente, son capaces de elevar la savia bruta, en algunos casos, como en las secuoyas americanas o los eucaliptos australianos, a más de cien metros de altura, contra la gravedad y sin gasto de energía (véase la Figura 11.4).

El movimiento de la savia bruta puede explicarse bien porque se produce una presión positiva que la empuja a ascender desde abajo (**teoría de la presión radicular**), o bien porque existe una fuerza succionadora que, desde arriba, «tira» del agua y de las sales minerales (**teoría de la cohesión-tensión**).

Aunque en realidad participan ambos mecanismos, se han obtenido pruebas experimentales que apoyan que la cohesión-tensión es la teoría principal que explica el movimiento de la savia bruta por el xilema.

- La **teoría de la cohesión-tensión** defiende que la fuerza que eleva la savia bruta por el xilema se origina gracias a la **tensión** que origina la *transpiración* del agua y a la **cohesión** existente entre sus moléculas:
 - La **transpiración** es la pérdida de agua, en forma de vapor, a través de los estomas de las hojas, provocada por la acción de la energía solar. La pérdida de moléculas de agua origina un déficit hídrico que genera una fuerza de succión que eleva la savia bruta. Sin embargo, la tracción de la savia bruta sólo es posible mientras haya una columna de agua continua por el xilema.
 - El mantenimiento de una columna continua de agua se produce porque, a causa de los puentes de hidrógeno, entre las moléculas de agua existe una gran **cohesión**, así que la tensión generada por la transpiración no necesita ser muy grande, porque las moléculas de agua no suben de una en una, sino enlazadas a modo de cadena.
 - Las sales minerales, como están disueltas en el agua, se transportan pasivamente hacia arriba. La fuerte **adhesión** del agua a las paredes de los finos tubos del xilema también facilita su ascenso por **capilaridad**.

Como acabamos de ver, debido a la transpiración, las moléculas de agua que salen por los estomas «tiran» de las moléculas adyacentes en el xilema de la hoja, obligándolas a rellenar el hueco que dejan las primeras.

Este mecanismo se propaga hasta el xilema de la raíz y, en último caso, hasta el agua que se encuentra en los poros del suelo, que se ve forzada a penetrar en la planta a través de la vía transcelular.

La tensión generada es tan potente que permite a la planta absorber agua incluso de suelos muy secos.

El **xilema** está formado por dos tipos de células muy especializadas. En las plantas primitivas está constituido por las traqueidas, y en las más evolucionadas, por los elementos de los vasos, que llegan a formar verdaderos tubos huecos de muy pequeño diámetro.



Fig. 11.4. Secuoyas gigantes (*Sequoiadendron giganteum*) del parque nacional de Yosemite (EE.UU.).

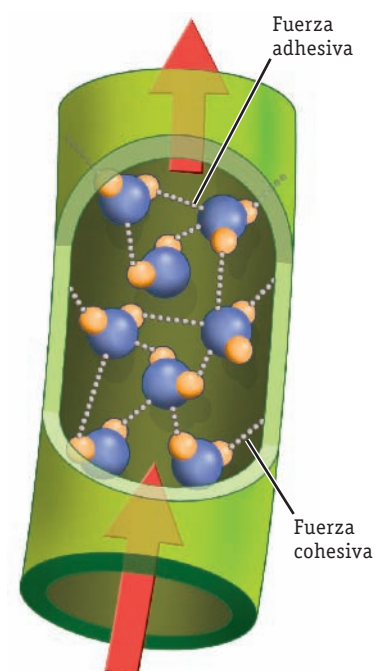


Fig. 11.5. Moléculas de agua ascendiendo por un tubo fino.



Fig. 11.6. Hoja mostrando el fenómeno de gutación.

- La **teoría de la presión radicular** sostiene que la acumulación de agua en los tejidos de la raíz genera una presión sobre el xilema que empuja a la savia bruta a ascender verticalmente. Una evidencia de la existencia de la presión radicular es la **gutación** o acumulación de gotitas de agua en el ápice y márgenes de las hojas (véase la Figura 11.6). Este fenómeno es típico en las selvas tropicales, donde las raíces disponen de abundante agua y la humedad del aire es tan elevada que reduce la transpiración. Aunque parece que la presión radicular podría asegurar el transporte del agua y de las sales minerales en herbáceas, se trata de un mecanismo secundario, ya que no es suficiente para las plantas de portes arbóreos y arbustivos (que deben elevar estos nutrientes varios metros sobre el suelo), y su importancia disminuye cuando desciende la humedad del suelo.

El intercambio de gases

Las plantas intercambian con la atmósfera oxígeno y dióxido de carbono. Aunque no disponen de aparato respiratorio como los animales, poseen unas estructuras especializadas en el intercambio gaseoso, situadas en su superficie: los *estomas* y las *lenticelas*.

- Los **estomas** son estructuras especializadas de la epidermis formadas por dos células, generalmente de forma arriñonada, las **células oclusivas**, que delimitan un espacio entre ellas, el **ostiolo**. Se sitúan por toda la parte aérea del vegetal, pero abundan en el envés de las hojas y en los tallos jóvenes. A pesar de ser células epidérmicas, las células oclusivas poseen cloroplastos y su pared vegetal se encuentra engrosada en la zona que rodea al ostiolo, lo que es fundamental para su funcionamiento (véase la Figura 11.7).

Después de entrar por el ostiolo, el dióxido de carbono, necesario para la fotosíntesis, se difunde por los espacios intercelulares de los tejidos del vegetal, entra en las células y, por último, en los cloroplastos. El oxígeno, que se produce durante la fotosíntesis, sale por el ostiolo y realiza el camino inverso. No todo el dióxido de carbono que se emplea en la fotosíntesis procede de la atmósfera. Una parte se genera durante la respiración celular. De la misma manera, el oxígeno que se utiliza en la respiración tiene un doble origen: la fotosíntesis y la atmósfera.

Como por los estomas también se pierde vapor de agua, es vital para la planta controlar su apertura y cierre, y lograr establecer un equilibrio entre las pérdidas de agua y la entrada y salida de los gases. En realidad, los estomas se abren y se cierran por un mecanismo muy sencillo, que consiste en la entrada y salida de agua de las células oclusivas, pero que se encuentra rigurosamente regulado a nivel molecular.

El funcionamiento del estoma presenta un **comportamiento circadiano**, ya que su apertura y su cierre ocurren rítmicamente en periodos de, aproximadamente, 24 horas. En la mayoría de las especies, los estomas se abren por el día y se cierran por la noche, pero en algunos vegetales que viven en climas cálidos, como la piña (*Ananas comosus*), ocurre al revés: la apertura de los estomas se produce durante la noche, cuando las temperaturas son más bajas y las pérdidas de agua por transpiración son menores.

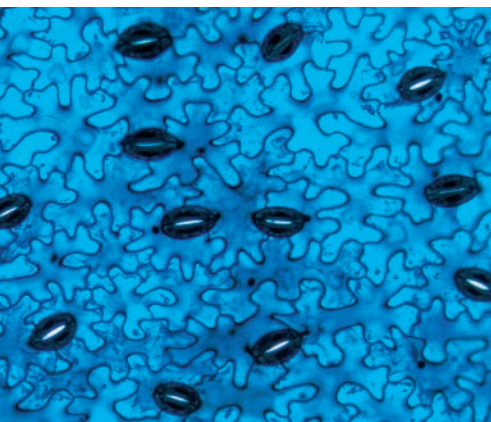


Fig. 11.7. Estomas abiertos y cerrados. Los cambios de las células oclusivas están relacionados con los cambios de turgencia.

Cuando la planta necesita dióxido de carbono, en las células oclusivas de los estomas se pone en funcionamiento una bomba de protones (H^+), que los expulsa al espacio extracelular. La salida de protones genera un déficit de cargas positivas en las células, que es compensado con la entrada de iones potasio (K^+). Al aumentar la concentración salina intracelular, el agua entra por ósmosis y el estoma se abre.



Cuando la pérdida de agua por transpiración no puede ser contrarrestada por la absorbida a través de la raíces, la planta debe cerrar sus estomas para asegurar su supervivencia. El mecanismo de cierre estomático está regulado por una hormona vegetal llamada **ácido abscísico (ABA)**. Cuando falta agua, esta hormona se une a un receptor específico que se encuentra en la membrana de la célula oclusiva. Tras la unión, el complejo hormona-receptor provoca un cambio en la permeabilidad de la membrana celular que facilita la salida de iones potasio. La disminución de la concentración salina intracelular induce la salida de agua, y el estoma se cierra.

Existen otros dos factores relacionados con la apertura y el cierre de los estomas: la **luz** y la **temperatura**.

Las temperaturas elevadas estimulan la respiración celular y, por tanto, provocan un aumento de la concentración de CO_2 entre las células del mesófilo. En estas condiciones, la bomba de protones no se pondrá en funcionamiento y los estomas permanecerán cerrados. Esta respuesta tiene un importante significado biológico: evitar la excesiva pérdida de agua que se produciría si, a temperaturas muy altas, los estomas permanecieran abiertos.

La luz activa la fotosíntesis, que producirá un aumento en el consumo de CO_2 que, debido al mecanismo descrito anteriormente, desencadenará la apertura de los estomas. Desde un punto de vista biológico, esta respuesta es tremendamente lógica. Cuando hay luz la planta puede hacer la fotosíntesis y, por tanto, necesita abrir sus estomas para que entre el CO_2 .

- Las **lenticelas** son unas pequeñas protuberancias que se encuentran en la epidermis de tallos y ramas de plantas leñosas. Para facilitar el intercambio gaseoso, sus células tienen forma redondeada y están muy separadas entre sí, por lo que dejan grandes espacios intercelulares (véase la Figura 11.8).

Recuerda que la fotosíntesis no es exclusiva de las plantas, y también tiene lugar en algas, cianobacterias y otras bacterias fotosintéticas.



Fig. 11.8. Lenticelas.

ACTIVIDADES

1> Razona la siguiente frase: «La transpiración es el precio que han tenido que pagar las plantas para poder hacer la fotosíntesis».

2> ¿Por qué las plantas no han desarrollado órganos respiratorios especializados como los animales?

PAU

Pruebas de Acceso a la Universidad

Transporte en vegetales. Sistema vascular

- Xilema
- Floema

Centra la pregunta

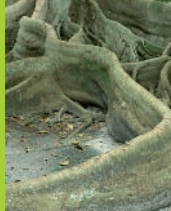
Esta pregunta se responde con los conocimientos adquiridos en las Unidades 8 y 11 sobre histología y fisiología vegetales.

Debes recordar

Los conceptos de xilema, floema y las teorías que explican el movimiento de la savia.

Responde la pregunta

- El xilema es el tejido conductor que transporta la savia bruta desde las raíces hasta las hojas. Este movimiento se explica mediante dos teorías: **teoría de la presión radicular** (la savia bruta asciende gracias a la presión que ejerce el agua acumulada en la raíz sobre los tejidos) y **teoría de la cohesión-tensión** (la fuerza que eleva la savia bruta por el xilema se origina por la tensión provocada por la transpiración y por la cohesión existente entre las moléculas de agua).
- El floema es el tejido conductor que transporta la savia elaborada desde las hojas al resto del vegetal. Gracias a las diferencias de presión hidrostática existentes entre las zonas donde se produce la materia orgánica y aquellas donde se acumula (**hipótesis del flujo a presión**).



La fotosíntesis

Gran parte de los ecosistemas dependen directamente de la energía solar. Sin embargo, esto no ha sido siempre así. Se piensa que las primeras formas de vida sobre la Tierra se nutrían de moléculas inorgánicas presentes en el medio, que oxidaban a base de quimiosíntesis (**autótrofos quimiosintéticos**) y vivían en ambientes sin oxígeno; a partir de ellos surgieron otros autótrofos que utilizaban la luz como fuente de energía (**autótrofos fotosintéticos**), y de esta diversidad surgieron los heterótrofos, que pudieron vivir de los productos que los autótrofos generaban. Es decir, que la vida nació **autótrofa** y **anaerobia**. Hace aproximadamente dos mil millones de años, estos seres vivos debieron de sufrir mutaciones fortuitas en su ADN, lo que les permitió aprovechar la energía luminosa para fabricar biomoléculas orgánicas a partir de precursores inorgánicos, como hemos comentado. Seguramente para entonces, los nutrientes orgánicos ya escaseaban, así que estos primeros organismos fotosintéticos empezaron a proliferar, y lograron cambiar por completo el escenario de la vida.

Agua: H_2O
Glucosa: $C_6H_{12}O_6$
Cloruro sódico: $NaCl$
Aminoácido tipo: $H_2N-C-COOH$ R

Fig. 11.9. Fórmula química de: agua, glucosa, cloruro sódico y aminoácido tipo.



La **fotosíntesis** es un proceso anabólico cuya función es convertir la energía luminosa en energía química, que se emplea para sintetizar moléculas orgánicas a partir de compuestos inorgánicos. Como subproducto, se desprende oxígeno.

El metabolismo celular y las reacciones REDOX

La Figura 11.9. muestra la fórmula química de algunas biomoléculas. Con poco esfuerzo podrás clasificarlas en sustancias orgánicas e inorgánicas, y seguro que también tienes muy claro que la materia orgánica, capaz de oxidarse, es exclusiva de los seres vivos; pero, ¿alguna vez te has parado a pensar por qué un compuesto orgánico encierra energía en sus enlaces químicos o cuáles son los mecanismos íntimos que explican los flujos energéticos asociados a su metabolismo? Intentemos estudiar estos aspectos básicos del funcionamiento de la química de la vida, fundamentales para entender la fotosíntesis, analizando una reacción metabólica clásica: el catabolismo total de la glucosa.



En primer lugar salta a la vista algo que tú ya conocías: la materia orgánica, incluida la glucosa, está constituida principalmente por carbono e hidrógeno. Sin embargo, el producto carbonado de esta degradación es el dióxido de carbono, constituido únicamente por carbono y oxígeno. Echa mano de tus conocimientos de química e intenta pensar qué reacción química ha tenido lugar en esta transformación: ¡Eureka! Se ha producido una oxidación. ¿Tendrá esto que ver con el catabolismo y la liberación de energía que éste lleva asociada?

En realidad, **las reacciones químicas de oxidación son la base del catabolismo celular**, pero, para entender todo este galimatías, debes tener claras las siguientes ideas:

- Aunque estás acostumbrado a pensar que un compuesto se oxida cuando gana oxígenos o pierde hidrógenos, es el momento de afinar un poco más: **un compuesto se oxida cuando cede electrones**. Veamos por qué. Cuando una molécula orgánica incorpora átomos de oxígeno, éste, al ser más electronegativo que el carbono, atrae con más fuerza los electrones compartidos, así que cuantos más oxígenos acompañantes tenga el carbono, menos electrones poseerá en propiedad. Por otro lado, la pérdida de hidrógenos también supone una oxidación, ya que estos átomos están formados por un protón y un electrón, que también se pierde.
- En los átomos, la energía de un electrón depende del orbital que ocupa y aumenta a medida que nos alejamos del núcleo. El catabolismo de la materia orgánica produce liberación de energía porque durante las oxidaciones que se producen, los electrones cedidos pasan de niveles altos de energía a niveles de energía menores. La diferencia de energía se libera al medio y es empleada por la célula para formar ATP.
- Los electrones no pueden quedarse por ahí, «flotando», así que un átomo sólo puede oxidarse, es decir, ceder un electrón, si otro átomo acepta dicho electrón, es decir, se reduce. Las reacciones de oxidación y reducción son por tanto inseparables y se conocen con el nombre de **reacciones REDOX**. **Las reacciones del anabolismo son, mayoritariamente, reacciones de reducción**, así que para entender mejor la fotosíntesis, que es un proceso anabólico, sólo tendrás que hacer el razonamiento inverso al aquí presentado.

La fotosíntesis se produce en dos fases: la *fase luminosa* y la *fase oscura*.

- Durante la **fase luminosa**, que tiene lugar en la membrana de los tilacoides del cloroplasto, los rayos solares, al colisionar con las moléculas de clorofila de los fotosistemas, desplazan algunos electrones de su órbita, aumentando su nivel de energía. Parte de estos electrones se transfieren a una cadena de moléculas transportadoras de electrones y, como en cada componente de la misma, éstos van pasando a orbitales de energía decreciente, la energía sobrante se libera y las enzimas ATP-sintetasas la emplearán para formar ATP. Los electrones restantes se transfieren a moléculas de NADP^+ , que pasan a su forma reducida (NADPH), y aportarán poder reductor (es decir, electrones) durante la formación de moléculas orgánicas en la siguiente fase. La clorofila recupera los electrones perdidos tomándolos del agua, que se escinde por fotólisis (ruptura por la luz). El oxígeno resultante se libera al medio.
- Durante la **fase oscura**, que tiene lugar en el estroma del cloroplasto, se producen un conjunto de reacciones químicas denominadas **ciclo de Calvin**, que conducen a la síntesis de glucosa a partir de dióxido de carbono y agua. La energía y el poder reductor necesarios para este proceso anabólico son suministrados por el ATP y el NADPH obtenidos en la fase anterior. La primera reacción del ciclo de Calvin consiste en la **fijación del CO_2** , es decir, en la incorporación del carbono que contiene a un intermediario orgánico. Esta reacción está catalizada por la enzima **Rubisco** y, dada su importancia, no es de extrañar que sea la proteína más abundante de la Tierra.

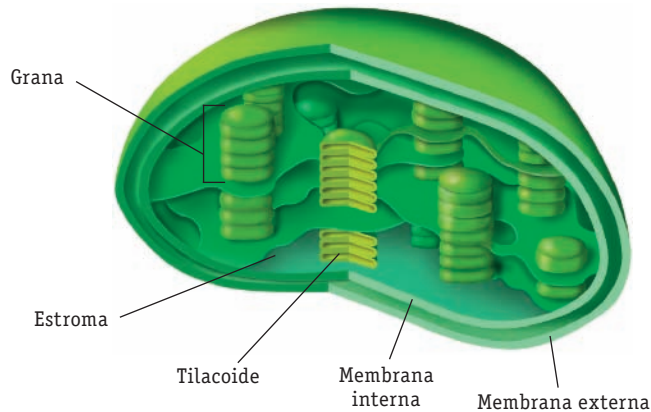


Fig. 11.10. Esquema de un cloroplasto. Los cloroplastos, los orgánulos donde tiene lugar la fotosíntesis, están rodeados por una doble membrana que delimita un espacio, el estroma, donde se encuentran los tilacoides, unas estructuras membranosas con forma de sacos aplanados. La fase luminosa de la fotosíntesis se produce en la membrana de los tilacoides, lugar donde se encuentra el **aparato fotosintetizador** formado por los fotosistemas (centros que contienen los pigmentos fotosintéticos, entre los que destaca la clorofila), la cadena transportadora de electrones y las enzimas ATP-sintetasas. La fase oscura ocurre en el estroma.

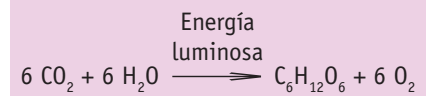


Fig. 11.11. Fabricación fotosintética de la glucosa.

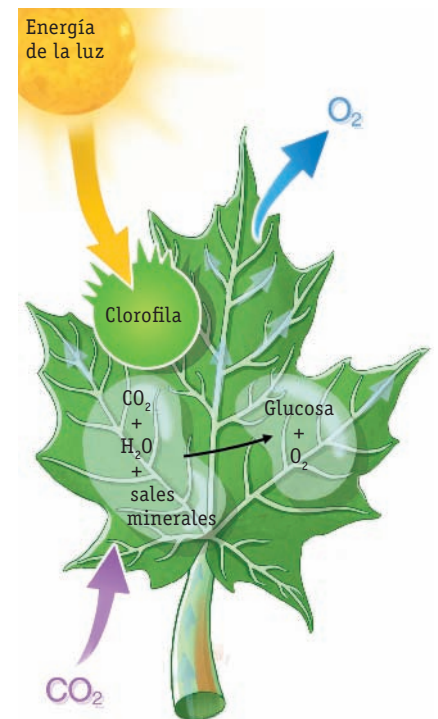


Fig. 11.12. Esquema sencillo de la fotosíntesis.

Actividad resuelta

¿Las plantas pueden hacer fotosíntesis durante la noche?

No, aunque esta respuesta no es tan obvia. El ciclo de Calvin se ha conocido tradicionalmente como fase oscura de la fotosíntesis, porque no se necesita luz solar; sin em-

bargo, esta denominación induce a error, porque parece indicar que se puede llevar a cabo durante la noche. Las últimas investigaciones sobre fisiología vegetal han demostrado que algunas de las enzimas implicadas en esta ruta metabólica, incluida la Rubisco, se inactivan en la oscuridad.

Distribución de la savia elaborada por el floema

Los productos que se han sintetizado en las hojas durante la fotosíntesis se denominan **savia elaborada**, mezcla de azúcares (principalmente sacarosa), aminoácidos, sales y agua.

El transporte de la savia elaborada desde las zonas de producción, o **fuentes**, hacia las zonas de consumo, o **sumideros**, se realiza por el floema. Las principales fuentes de la planta son las hojas, donde se lleva a cabo la fotosíntesis, mientras que los sumideros son los órganos en crecimiento, como los meristemos de tallos y raíces, o los tejidos de almacenamiento, como frutos, semillas y raíces.

Los órganos sumidero pueden actuar como importantes fuentes, ya que en momentos determinados ceden sus compuestos de reserva a otros órganos. Es el caso de la semilla, que funciona como sumidero durante su formación, y como fuente para alimentar al embrión durante la germinación.

El movimiento de la savia elaborada por el floema, que circula a un ritmo mucho mayor de lo que cabría esperar en caso de que sólo actuara la fuerza de gravedad, se explica a partir de la hipótesis de **flujo a presión**. Esta hipótesis se basa en las diferencias de presión de agua (**presión hidrostática**) existentes entre la fuente y el sumidero. Para estudiar esta hipótesis utilizaremos como ejemplo el transporte de azúcares por el floema (véase la Figura 11.13).

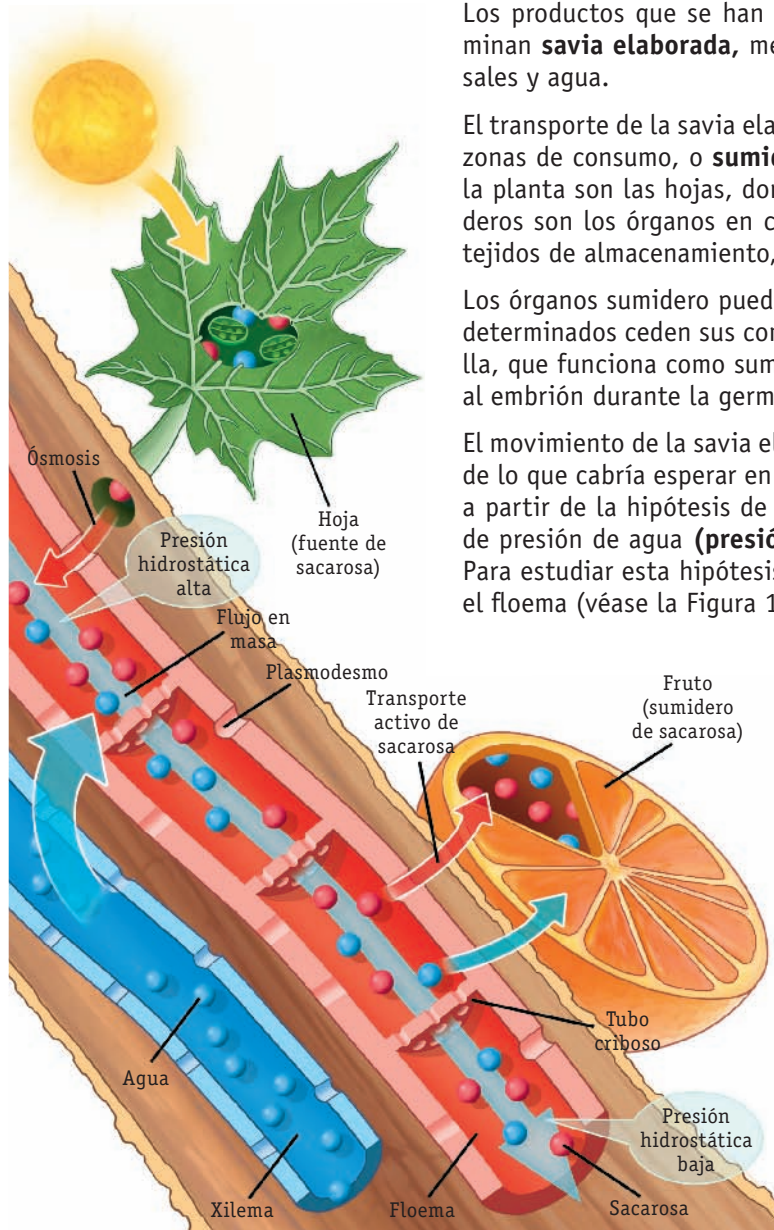


Fig. 11.13. Transporte de la savia elaborada a través del floema (hipótesis del flujo a presión).

La glucosa, procedente de la fotosíntesis, produce sacarosa en las hojas. A continuación, este disacárido pasa, primero, a las células acompañantes del floema y, después, se introduce en los tubos cribosos. El aumento de la concentración de azúcares en las células del floema provoca la entrada de agua por ósmosis. El agua procede del xilema, que discurre paralelo a los vasos conductores del floema.

En los sumideros ocurre lo contrario. La salida de sacarosa del floema hacia los frutos, los tubérculos o las semillas, provoca, a su vez, el arrastre de agua hacia estos órganos. El movimiento de sacarosa se realiza por transporte activo.

La diferencia de presión hidrostática, muy alta en el floema de la hoja y muy baja en los órganos sumidero, hace que fluya la savia elaborada por la planta sin gasto de energía.

ACTIVIDADES

3> La patata es una de las plantas más cultivadas en todo el mundo por poseer tubérculos comestibles. ¿Los tubérculos funcionan como fuente o sumidero? Razona la respuesta.

4> Un estudiante de 1.º de bachillerato escribe en su informe de prácticas: «El movimiento de la savia bruta es ascendente, desde la raíz a las hojas, y el movimiento de la savia elaborada es descendente, de la hojas a la raíz». Detecta y corrige los errores cometidos en este informe.



La respiración

Las plantas, como los animales y otros seres vivos, obtienen la energía necesaria para realizar sus funciones vitales degradando las moléculas orgánicas en un proceso llamado *respiración celular*.

¿Sabías que una célula vegetal tiene, por término medio, 200 mitocondrias?



La **respiración celular** es un proceso catabólico que requiere oxígeno y cuya función consiste en la degradación de la materia orgánica para extraer la energía que encierran sus enlaces. Tiene lugar en las mitocondrias.

La principal reserva de las plantas es el almidón. Cuando la planta necesita energía, éste se descompone en multitud de moléculas de glucosa, que se van a degradar totalmente durante la respiración celular desprendiendo la energía que contienen.

Esta degradación supone una oxidación muy lenta, en varios pasos, todos ellos muy controlados. En algunos de estos pasos se liberan pequeñas cantidades de energía, que son empleadas en la formación de ATP.

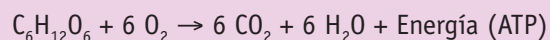


Fig. 11.14. Reacción general de la respiración celular.

Actividad resuelta



El mangle negro (*Avicennia germinans*) es una de las especies más abundantes de los ecosistemas de manglar, formaciones arbóreas que se desarrollan en zonas cercanas al litoral, principalmente en la desembocadura de los ríos y en lagunas costeras. Las raíces de estos árboles se encuentran inmersas en agua salada, por lo que no pueden, en principio, absorber oxígeno para realizar la respiración celular. ¿Cómo crees que resuelven las plantas este problema?

Estas plantas han desarrollado unas raíces aeríferas que sobresalen de la zona inundada. Estas raíces están dotadas de unos órganos especializados en forma de saco, llamados **neumatóforos**, que les permiten captar oxígeno atmosférico y transportarlo a la parte sumergida de la raíz. De otra manera, las raíces morirían.

Otras especies del manglar, como el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), resuelven el problema de la falta de oxígeno exponiendo un gran número de lenticelas en sus tallos.



Fig. 11.15. Manglar.



Fig. 11.16. Maíz (*Zea mays*), una planta C_4 .

La fotorrespiración puede reducir al 50% la actividad fotosintética de plantas que viven en ambientes cálidos y secos.

La Rubisco y el CO_2 : un matrimonio malavenido

Aunque la Rubisco es, quizás, una de las enzimas fundamentales en la química de la vida, presenta un grave inconveniente: su afinidad por el oxígeno es mayor que la que posee por el dióxido de carbono. Cuando la Rubisco se une al O_2 , se pone en marcha la **fotorrespiración**, un proceso que también tiene lugar en los cloroplastos. Es parecido a la respiración celular, porque consume O_2 y produce CO_2 , pero, a diferencia de ésta, no se produce energía útil para la célula y, además, impide la formación de glucosa porque se paraliza la fotosíntesis.

Cuando la humedad relativa del aire es baja y la temperatura es alta, como ocurre en los desiertos, zonas tropicales, o en pleno verano de zonas templadas, los estomas se cierran para evitar la pérdida de agua. El CO_2 del aire no puede entrar, y el O_2 producido durante la fotosíntesis no puede salir, por lo que su concentración aumenta. En estas condiciones, la fotorrespiración es tan predominante que podría llegar a matar a la planta.

Es difícil encontrar una respuesta lógica al fenómeno de la fotorrespiración. La idea más aceptada en la actualidad es que en la atmósfera primitiva no había apenas oxígeno y, en consecuencia, la fotosíntesis no se veía disminuida por este fenómeno. Sin embargo, el aumento progresivo de O_2 en la atmósfera, gracias precisamente a la acción de los organismos fotosintéticos, puso en peligro la eficacia fotosintética, y la selección natural favoreció el desarrollo de plantas que presentaban rutas alternativas para captar el CO_2 y evitar así los efectos negativos de la fotorrespiración: aparecen las plantas C_4 y las plantas CAM.

- Las **plantas C_4** , como el maíz (*Zea mays*, véase la Figura 11.16) o la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), son originarias de climas tropicales y deben esta denominación a su capacidad para fijar CO_2 y originar compuestos de cuatro carbonos de manera muy eficaz que, más tarde, pueden liberar CO_2 . Este mecanismo les permite mantener concentraciones altas de éste y realizar la fotosíntesis eficazmente, aunque las plantas cierran los estomas ante temperaturas e intensidades lumínicas elevadas.
- Las **plantas CAM** (del inglés *Crassulacean Acid Metabolism*), como los cactus o las crasuláceas, viven en unas condiciones de tan extrema sequedad que, para impedir la deshidratación, sus estomas permanecen cerrados durante el día y sólo se abren por la noche. Estas plantas suplen la falta de intercambio de gases acumulando CO_2 en sus tejidos por las noches; después, lo liberan durante el día para reducirlo sin tener que abrir los estomas, lo que les permite sobrevivir en los desiertos, donde no pueden hacerlo las plantas C_3 y C_4 .



Fig. 11.17. Echeverria derenbergii, una planta CAM originaria de los desiertos de México.

ACTIVIDADES

5 > En el sudeste de Madrid se ha instalado un campo de golf con césped inglés (*Lolium perenne*). Durante el verano, y a consecuencia de la fuerte sequía, las autoridades han prohibido el riego de parques y jar-

dines. Lindando con el campo de golf, es frecuente encontrar una mala hierba, el garranchuelo. Investiga qué metabolismo posee esta planta y explica la evolución natural que se dará en dicho campo.

Eliminación de los productos de desecho

La **excreción** es la eliminación de sustancias inservibles o perjudiciales para el organismo.

Las plantas no tienen aparatos o sistemas especializados en esta función, porque las principales sustancias de desecho que se forman durante el catabolismo (dióxido de carbono, agua, y productos nitrogenados) son reutilizadas en la fotosíntesis. Por tanto, la función excretora de las plantas queda reducida a un número muy limitado de actividades como son la eliminación por difusión del dióxido de carbono sobrante, la acumulación en las vacuolas de cristales de oxalato cálcico (residuo metabólico de las células vegetales), o la eliminación del exceso de sal en plantas que viven en ambientes salobres. En este último caso, la excreción se realiza a través de unos conductos asociados a unas glándulas de la sal, presentes en las hojas.

Pero seguro que recuerdas que las plantas también expulsan otras sustancias, como resinas, aceites esenciales, etc. Por eso es importante que diferencies entre excreción y **secreción**. En este último caso, la planta también elimina sustancias, pero siempre con un significado fisiológico. Se consideran ejemplos de secreción, que no de excreción:

- la **resina** de los pinos, que tiene una función defensiva, ya que taponan heridas y evita que entren insectos que se alimentan de madera (véase la Figura 11.18).
- las **esencias** y el **néctar** de las flores, atraen los insectos y favorecen la polinización.
- el **látex**, que es una sustancia lechosa que se genera en los conductos laticíferos de algunas plantas como las euforbias (*Euphorbia* sp.), la higuera (*Ficus carica*) o la amapola (*Papaver rhoeas*), y que contiene azúcares, taninos y sustancias venenosas cuya función es defender la planta del ataque de los herbívoros.



Fig. 11.18. Explotación tradicional de pino resinero (*Pinus pinaster*).



Fig. 11.19. Árbol del caucho (*Hevea brasiliensis*). El caucho es una secreción laticífera que se utiliza con fines industriales.



Fig. 11.20. Insecto buscando su ración de néctar.

ACTIVIDADES

6> La **etnobotánica** es la ciencia que estudia el uso tradicional de las plantas. Muchas de las secreciones que producen las plantas han sido utilizadas por el hombre e, incluso, han revolucionado la historia. Es el caso del árbol del caucho (*Hevea brasiliensis*) en la ciudad de Manaus (Brasil). Investiga el caso y responde:

- ¿Qué tipo de secreción se aprovecha? Indica el producto que se obtiene a partir de la misma, así como sus usos industriales. ¿Cuál es la finalidad biológica de esta secreción?
- ¿Qué supuso para la población de la zona el empleo de esta planta?



Fig. 11.21. *Cuscuta* (*Cuscuta europaea*). Las plantas con nutrición heterótrofa reducen o pierden la mayor parte de los órganos que ya no necesitan. Por ejemplo, reducen las hojas a escamas, las raíces pueden incluso desaparecer y, además, los tallos poseen pocas ramas y pierden el color verde.



Fig. 11.22. Planta carnívora en una turbera.



Fig. 11.23. Los níscalos (*Lactarius deliciosus*) son hongos que forman micorrizas con las raíces de los pinos.

11.4 Otros tipos de nutrición en plantas

Aunque las plantas son organismos típicamente autótrofos, ya que obtienen la materia orgánica que necesitan por medio de la fotosíntesis, existen ejemplos de plantas que han desarrollado otras formas de nutrición. Viviendo como plantas parásitas, simbióticas o depredadoras, han conquistado nuevos **nichos ecológicos**. De los seres vivos con los que se relacionan obtienen complementos nutricionales orgánicos e inorgánicos.

- Las **plantas parásitas** sólo obtienen su alimento de otras plantas (parasitismo obligado) a las que producen daños. Se clasifican en dos grupos:
 - Las que son capaces de realizar la fotosíntesis, pero no obtienen las sales minerales y el agua a través de las raíces sino de la savia bruta de otras plantas a las que parasitan. Para ello, introducen unas estructuras muy especializadas llamadas **haustorios** a través de los tejidos de la planta hospedante y con ellos succionan la materia inorgánica. El muérdago (*Viscum album*) parasita de esta manera pinos (*Pinus* sp.), abetos (*Abies* sp.) y algunos árboles de hoja caduca como el tilo (*Tilia platyphyllos*), el chopo (*Populus* sp.), el manzano (*Pyrus malus*), etcétera.
 - Las que han perdido completamente su capacidad fotosintética, porque no tienen clorofila, así que introducen los haustorios en el floema de la planta que parasitan y succionan su savia elaborada. La cuscuta (*Cuscuta europaea*) y el orobanche (*Orobanche* sp.) son plantas de este tipo.
- Las **plantas carnívoras** sí pueden hacer fotosíntesis, pero como viven en suelos pobres en nitrógeno, completan su dieta atrapando pequeños insectos. Para ello, han desarrollado mecanismos muy ingeniosos.
 - La atrapamoscas (*Drosera rotundifolia*) tiene unos pelos glandulares en sus hojas que desprenden gotitas pegajosas que atrapan al animal.
 - Las hojas de otras plantas carnívoras, como *Dionaea muscipula*, son prensiles y cuando se posa la víctima, se cierran, actuando a modo de trampa.
 - Otros géneros de carnívoras tropicales, como *Nepenthes*, poseen unas estructuras en forma de jarrita con un líquido enzimático en su interior. Al posarse en la planta, el insecto resbala dentro de la jarrita y ya no puede salir.
- Las **plantas simbióticas** forman asociaciones de beneficio mutuo con otros organismos. Destacan, por su importancia, las micorrizas y las asociaciones de leguminosas y bacterias.
 - Las **micorrizas** son asociaciones simbióticas entre los hongos del suelo y las raíces de las plantas. Los vegetales transfieren azúcares y otros compuestos orgánicos a los hongos, y éstos proporcionan a las primeras sales minerales que pueden captar de lugares distantes mediante la extensión de sus micelios.
 - Las **leguminosas**, como los guisantes (*Pisum sativum*), la soja (*Glycine max*) o las habas (*Vicia faba*), han resuelto el problema de la escasez de compuestos nitrogenados en el suelo por medio de la cooperación con otros seres vivos. Las raíces de estas plantas poseen unos abultamientos o nódulos en los que viven bacterias del género *Rhizobium*, que son capaces de transformar el nitrógeno atmosférico en amonio y nitrato. A su vez, la planta proporciona azúcares a los microorganismos. El excedente nitrogenado que proporcionan estas bacterias es tan grande que algunos agricultores incluyen entre sus cultivos plantas leguminosas, no con carácter comercial, sino para enriquecer el suelo en nitratos.



Actividades finales

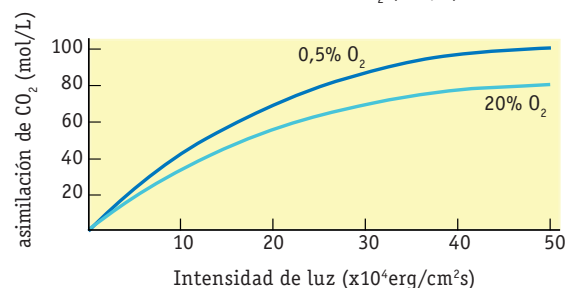
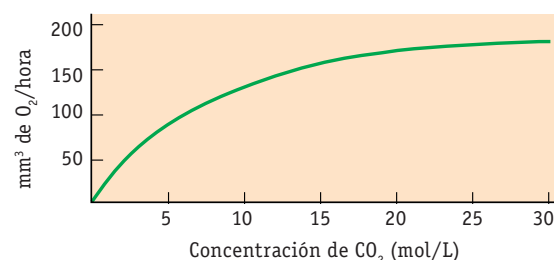


- 1> Describe el camino que sigue una molécula de agua desde que entra por un pelo absorbente de la raíz hasta que llega al mesófilo de una hoja.
- 2> ¿De dónde procede el O_2 que se desprende durante la fotosíntesis? Explica y escribe la ecuación global de este proceso.
- 3> ¿Es correcto decir que las plantas nos «roban» el O_2 por la noche y por eso se deben sacar de la habitación mientras dormimos?
- 4> ¿Por qué hay más abundancia de estomas en el envés de las hojas que en el haz?
- 5> Si cubriéramos la superficie de las hojas de una planta con aceite, ¿qué ocurriría? ¿Y si cubriéramos también el tallo?
- 6> ¿Por qué el mecanismo de presión radicular no es suficiente para plantas que miden más de diez metros?
- 7> ¿Es correcta la siguiente afirmación: «el movimiento de la savia bruta es ascendente, desde la raíz a las hojas, y el movimiento de la savia elaborada es descendente, de la hojas a la raíz»?
- 8> ¿Por qué se conservan mejor las flores cortadas si se añade azúcar al agua de su florero?
- 9> ¿En qué estado (abierto o cerrado) se encuentra un estoma en los siguientes casos?
 - a) Falta de agua
 - b) Elevada concentración de O_2
 - c) Es de noche
 - d) Es de día pero hace mucho calor
 - e) Es de día pero la temperatura es suave
- 10> Los agricultores utilizan estiércol para abonar sus cultivos. ¿Significa esto que la plantas absorben el estiércol por las raíces? Razona la respuesta.



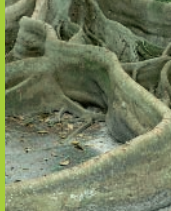
- 11> Calvin Horse, un estudiante de fisiología vegetal, investiga cómo influyen algunos factores en el rendimiento fotosintético del trigo. A la vista de las gráficas que ha obtenido, resuelve las siguientes cuestiones:

- a) Describe y razona el comportamiento de la planta ante concentraciones crecientes de CO_2 .
- b) ¿Por qué disminuye el rendimiento fotosintético al aumentar la concentración de oxígeno (O_2)?
- c) ¿A qué temperatura se produce mayor rendimiento fotosintético en la planta? ¿Por qué?
- d) ¿Cómo explicas que a 60 °C no haya fotosíntesis?
- e) En ausencia de agua no se realiza la fotosíntesis. ¿Qué mecanismo está implicado en esta respuesta?
- f) Nuestro estudiante ha demostrado que no todas las plantas se comportan del mismo modo ante las variaciones en la intensidad luminosa. ¿Qué sentido ecológico tiene?



Variación del rendimiento fotosintético en función de las concentraciones de O_2 y CO_2 y de la temperatura.

- 12> Si introducimos la parte aérea de una planta en una bolsa de plástico, transcurrido un día observamos que el interior de la bolsa está mojado. ¿De dónde procede el agua de la bolsa? ¿Cómo podrías calcular la cantidad de agua que ha perdido la planta?
- 13> ¿Se puede decir que hay plantas completamente heterótrofas? Razona la respuesta.



Actividades finales

- 14>** Si colocamos una planta en un lugar sin oxígeno, la absorción de sales minerales disminuye considerablemente. Explica a qué es debido.
- 15>** Busca información de cómo influye en el funcionamiento de una planta el déficit de: potasio, nitrógeno, fósforo, calcio, cloro y manganeso.
- 16>** El *Sphagnum palustre* es un musgo que crece formando tupidas y almohadilladas praderas embebidas en agua sobre las que crecen interesantes plantas, como la atrapamoscas, y cuyas porciones inferiores, por falta de oxígeno, mueren y se descomponen, formando la turba, un tipo de carbón.
- 17>** ¿Dónde y cómo consiguen las plantas el ATP que emplean en el transporte activo de sales minerales?
- 18>** Uno de los espectáculos más bellos que nos ofrece la naturaleza es la variedad de colores de un hayedo en otoño. ¿Por qué en esta época del año las hojas de estos árboles aparecen rojas, marrones o amarillas?

PAU→

Pruebas de Acceso a la Universidad

Referente al proceso fotosintético en organismos eucarióticos:

- Indique qué organismos lo realizan y la localización subcelular concreta donde se lleva a cabo.
- Escriba de forma abreviada la ecuación de la fabricación fotosintética de la glucosa.
- Indique la finalidad del ciclo de Calvin.

Centra la pregunta

Esta pregunta se responde con los conocimientos adquiridos en esta Unidad, concretamente en el apartado de la fotosíntesis. Además debes recordar conceptos de la Unidad 8, la célula eucariota, y de la Unidad 10, el reino protocista (las algas) y el reino de las plantas.

Debes recordar

El concepto general de fotosíntesis, fase oscura de la fotosíntesis (ciclo de Calvin) y cloroplastos.

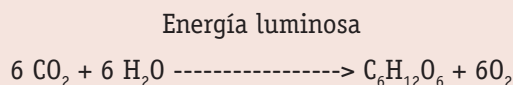
Responde la pregunta

- Los organismos eucariotas que realizan la fotosíntesis son las algas (reino protocista) y los organismos del reino de las plantas.

La fotosíntesis se lleva a cabo en unos orgánulos con doble membrana, los cloroplastos. El interior de estos orgánulos, llamado estroma, contiene unas estructuras membranosas con forma de saco llamadas tilacoides que cuando se apilan reciben el nombre de grana. En la membrana de los tilacoides está la clorofila, molécula capaz de captar la energía luminosa.

- La fotosíntesis es un proceso anabólico cuya función es convertir la energía luminosa en energía química, que se emplea para sintetizar moléculas orgánicas a partir de compuestos inorgánicos.

La fabricación de la glucosa en el proceso fotosintético puede expresarse con la siguiente ecuación:



- La fotosíntesis se produce en dos fases: la fase luminosa, en los tilacoides, y la fase oscura o ciclo de Calvin, en el estroma. El ciclo de Calvin consiste en una serie de reacciones que conducen a la formación de moléculas de glucosa gracias a la fijación del CO_2 atmosférico a moléculas orgánicas. La energía y poder reductor para realizar este proceso se obtienen del ATP y NADPH de la fase lumínica.



Investigación científica

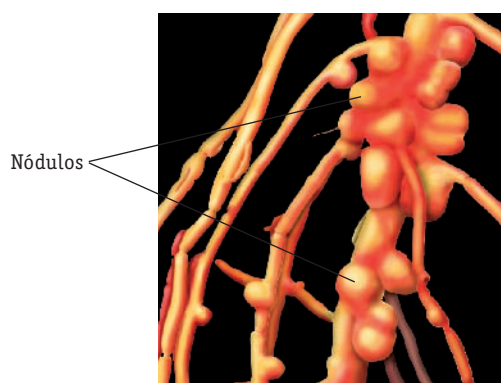


¿Cómo fijan nitrógeno las plantas?

La Revolución Verde de los años sesenta trajo un notable incremento de la producción agrícola, mediante el empleo de abonos químicos y semillas mejoradas. Pero el fertilizante nitrogenado, el más utilizado en la agricultura, se lleva la mayor parte de la inversión de esta actividad. Para la fabricación de este tipo de fertilizantes se requiere energía derivada del petróleo. Por otro lado, su uso indiscriminado ha ocasionado graves problemas de contaminación, ya que no todo el fertilizante que se aplica lo aprovecha la planta: en una cuantía importante acaba en lagos y lagunas, y provoca la **eutrofización** de estos ecosistemas.

La fijación biológica de nitrógeno es la opción natural de la fertilización agrícola. La mayor parte del nitrógeno se encuentra en el aire (70%), y de todos los seres vivos, sólo algunas bacterias pueden fijarlo y convertirlo en compuestos nitrogenados asimilables por todos los organismos.

En la naturaleza ya existen plantas que aprovechan la fijación de N_2 , ya que se asocian en **simbiosis** con bacterias fijadoras del nitrógeno de forma espontánea. Estas plantas alojan a las bacterias en estructuras especiales de sus raíces, llamadas nódulos, donde las bacterias fijan el nitrógeno atmosférico.



Raíz con nódulos de *Rhizobium*.

Las plantas mejor conocidas que establecen esta relación son las leguminosas, de alto valor comercial y alimentario, que fijan nitrógeno atmosférico cuando

entran en simbiosis con el *Rhizobium* u otros géneros emparentados.

¿Dónde reside la información genética que dicta la señal de la formación de nódulos? ¿Cómo entran en simbiosis las leguminosas y *Rhizobium*? Sabemos que en la mayoría de las especies *Rhizobium*, la información genética para la simbiosis se encuentra confinada en **plásmidos**, moléculas de ADN independientes del cromosoma bacteriano, de su misma naturaleza y menor tamaño.

Los nutrientes escasean en el suelo; las superficies de las raíces, en cambio, son ricas en azúcares, aminoácidos y vitaminas. *Rhizobium* son atraídos mediante **quimiotaxis** por algunos de estos compuestos y otros de tipo aromático: los flavonoides. Estas sustancias cumplen una función clave en el reconocimiento específico de estos microorganismos, porque inducen a la síntesis de factores de nodulación, que son los responsables de la formación de los nódulos radicales.

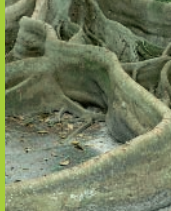
Una vez en el interior del nódulo, la bacteria se diferencia en una forma llamada bacteroide y deja de dividirse. Se establece entonces una íntima relación metabólica entre la planta y la bacteria por la que la planta suministra compuestos procedentes de la fotosíntesis a cambio de amonio, producto de la asimilación del nitrógeno.

Por otra parte, las investigaciones realizadas en torno al proceso simbiótico han permitido crear, mediante manipulación genética, cepas *Rhizobium* con gran capacidad fijadora, al presentar numerosas copias de los genes involucrados en la **transcripción** de la **enzima** encargada de la fijación de N_2 : la nitrogenasa. Se han descubierto otras formas de interacción en las que las bacterias fijadoras del N_2 viven dentro de los tallos, las hojas y las raíces sin formar nódulos.

Desde otro enfoque muy ambicioso, se trataría de introducir los genes de la nitrogenasa en el ADN de la planta, construyendo así plantas **transgénicas** capaces de fijar por ellas mismas el N_2 atmosférico.

Adaptado de MARTÍNEZ ROMERO, E., PALACIOS, R. y MORA, J.: «Cepas mejoradas de *Rhizobium*», en *Investigación y Ciencia*, 265.

- Busca el significado de las palabras del texto marcadas en negrita.
- Al menos en teoría, el principal objetivo de la Revolución Verde era aumentar la productividad agrícola para acabar con el hambre mundial. Busca información sobre el tema y debate con tus compañeros si este objetivo se ha alcanzado.



Trabajo de laboratorio

Estudio de la absorción de agua por los pelos absorbentes de la raíz

El agua y las sales minerales del suelo son absorbidas por unas células especializadas de la zona pilífera de la raíz llamadas pelos absorbentes.

La zona pilífera se encuentra por encima de la zona de alargamiento de la raíz.



Objetivo

Comprobar que el agua se absorbe por los pelos absorbentes de la raíz.

Materiales

- 3 plantitas de lentejas
- 3 frascos de vidrio numerados
- Hilo
- Plastilina
- Aceite
- Agua

Procedimiento

- Haz un agujero en la tapa del frasco 1 lo suficientemente grande para que entre la planta por él. Llena el tarro de agua, introduce la planta por el agujero de la tapa y fíjala con plastilina. Mete la planta en el tarro de tal manera que toda la raíz quede introducida en el agua. Cuando la raíz esté introducida en el agua, echa aceite con cuidado. Cierra el frasco.
- Haz lo mismo con la tapa del frasco 2. Llena el tarro con agua y mete la planta. Echa aceite de tal manera que la zona ramificada de la raíz quede esta vez en la fase aceitosa. El extremo de la raíz (cofia) debe quedar en contacto con el agua. Fija la planta con plastilina.
- Haz dos agujeros en la tapa del frasco 3. Mete la planta por uno de ellos y fíjala con plastilina. Ata con un hilo de 25 cm el extremo de la raíz, con cuidado para no cortar el tejido. Una vez atada la planta, introduce el hilo por la parte inferior de la tapa donde habías hecho el segundo agujero. Llena el vaso de agua e introduce la planta, de tal manera que toda la raíz quede en contacto con ella. Echa aceite con cuidado y cierra el tarro. Tira del hilo hasta que introduzcas en el aceite sólo el extremo de la raíz.
- Coloca los tres frascos en una zona iluminada y observa lo que ha ocurrido a la semana siguiente.

Resultados

Anota las modificaciones observadas al cabo de una semana.

Conclusiones

- ¿Qué ha ocurrido con la planta del frasco 2? ¿Por qué?
- ¿Qué ha ocurrido con las plantas de los frascos 1 y 3? ¿Por qué?
- ¿Dónde se absorbe el agua en las plantas?