



La fotosíntesis II: Fotosíntesis y Biotecnología

La población mundial crece a gran velocidad. Uno de los problemas que surge en este escenario es: ¿cómo se responde a la demanda alimentaria creciente? Para que la demanda de comida en el mundo sea satisfecha será necesario un incremento en el rendimiento de los cultivos. Se cree que el maíz, arroz, trigo, soja, cebada y sorgo serán las más importantes fuentes nutricionales del futuro.

En el caso del arroz, por ejemplo, se estima que se necesitará un incremento del rendimiento del 50% para el año 2030. Dado que el índice de cosecha para muchos cultivos ha alcanzado el máximo valor, es decir que no se puede aumentar la superficie de cultivo, el aumento en el rendimiento se logrará a través de un incremento en la biomasa del cultivo y en la fotosíntesis neta. Para esto es necesario aumentar el área de las hojas, o la fotosíntesis neta por área de hoja. Es decir, habrá que lograr un aumento en la fotosíntesis por hoja.

La pregunta es: ¿qué parte del proceso fotosintético puede ser modificado para aumentar la cantidad de CO₂ fijado?

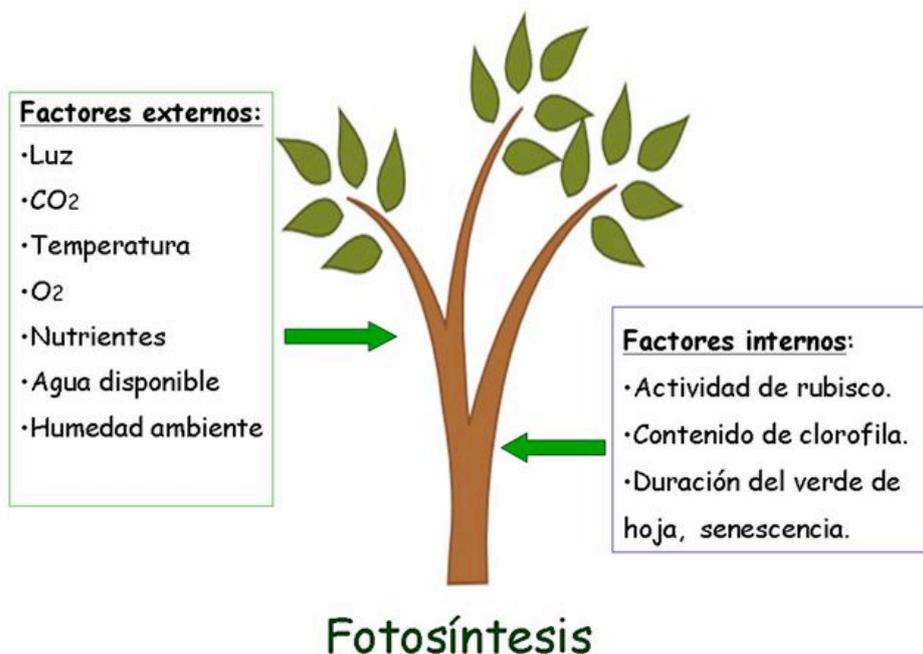
El mejoramiento genético, el uso de fertilizantes, y la optimización del manejo de los diferentes cultivos desde mediados de los '50 han generado un importante incremento mundial en el rendimiento potencial y real de la inmensa mayoría de los cultivos. Esta tendencia deberá mantenerse, pero aún con mayores tasas de aumento en los rendimientos.

Factores que modulan la fotosíntesis

Aumentar la tasa de fotosíntesis resulta la estrategia más lógica y promisoría para incrementar el rendimiento de los diferentes cultivos. Esta idea se basa en que toda la materia seca producida depende del proceso de fotosíntesis. Sin embargo, su puesta en práctica no es tan simple. La fotosíntesis es un proceso que no ocurre aislado de su entorno. El medioambiente tiene un efecto muy marcado en la eficiencia fotosintética de las distintas plantas. ¿Como hacer para regular un proceso en el que están implicadas 50 reacciones enzimáticas? ¿Como regular un proceso en el cual todas las reacciones involucradas se ven alteradas por el medioambiente?

Existen factores internos y externos que pueden regular en mayor o menor medida a la fotosíntesis, como muestra la ilustración:

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



Factores internos y externos que influyen en el proceso fotosintético

Cada uno de los factores ambientales citados afecta la tasa de fotosíntesis de diferente manera:

La concentración del CO₂ es uno de los factores ambientales con mayor influencia sobre la fotosíntesis y sobre el crecimiento de las plantas. Este gas estimula la fotosíntesis por su función de sustrato.

En cambio, altas concentraciones de O₂ inhiben el proceso de fotosíntesis.

Los altos niveles de luz (energía lumínica) permiten que se exprese la máxima capacidad de fotosíntesis, mientras no haya restricción de agua y nutrientes. Aumentar la penetración de radiación dentro del área de cultivo es una forma de inducir mayores tasas fotosintéticas.

En cuanto a la temperatura, las plantas viven y fotosintetizan en una gran variedad de hábitats con grandes diferencias en sus condiciones térmicas.

Como en cualquier otro proceso bioquímico, la capacidad fotosintética de cada especie tiene un óptimo de temperatura. La mayor eficiencia de fotosíntesis ocurre a la temperatura óptima para ese cultivo. Por encima de ese valor, la fotosíntesis disminuye por la desnaturalización (pérdida de la estructura espacial) de las enzimas.

Los factores internos que aumentan la tasa de fotosíntesis son el contenido de clorofila en cloroplastos, la duración del pigmento en las hojas, la apertura de los estomas (que intercambian gases con el entorno), y la actividad de la enzima denominada rubisco.

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



Una enzima clave: la rubisco

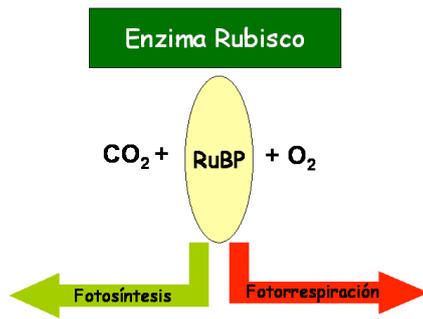
La enzima RuBisCO (*ribulosa-1,5-difosfato carboxilasa-oxigenasa*) cataliza una reacción clave en la fotosíntesis: la asimilación y fijación del CO_2 en la vía de síntesis de materia orgánica (ver cuaderno 106). La actividad de la enzima rubisco es la variable interna de mayor influencia sobre la fijación de CO_2 . Se han encontrado diferencias importantes en la actividad de esta enzima entre plantas con alta o baja tasa fotosintética. Pero, esta enzima también cataliza un proceso opuesto al anterior: la fotorrespiración. Si la concentración de CO_2 es baja, funciona como oxidasa, y en lugar de ayudar a la fijación de CO_2 se produce la oxidación de glúcidos hasta CO_2 y H_2O , y al proceso se le conoce como **fotorrespiración** (que no debe confundirse con la respiración mitocondrial).

La Rubisco es la enzima más abundante de la biosfera y constituye alrededor del 50% de la proteína soluble de las hojas de las plantas. La estructura de la rubisco en eucariotas y algunos procariotas consiste en 8 subunidades grandes y 8 subunidades pequeñas. El sitio activo se encuentra en las subunidad grande. De modo que existen ocho sitios activos por molécula de Rubisco. En cambio, la mayoría de las bacterias presentan rubisco de 4 subunidades grandes y 4 chicas. En particular, la rubisco de *Rhodospirillum rubrum*, presenta una estructura más simple aún: dos subunidades grandes y dos pequeñas. La reacción catalizada por la rubisco es limitante en la etapa de foto-asimilación de la fotosíntesis. Se trata de una enzima ineficiente, por ello se esta investigando la optimización de su actividad catalítica por ingeniería genética.

La enzima rubisco es considerada ineficiente por dos motivos:

1. Tiene baja tasa de recambio de sustrato (la cantidad de sustrato que une por unidad de tiempo). Su actividad catalítica es lenta: la rubisco cataliza la condensación de tres moléculas de CO_2 por segundo, mientras que la mayoría de las enzimas unen alrededor de mil moléculas de sustrato por segundo.
2. Cataliza dos reacciones competitivas: la carboxilación y la oxigenación de la RuBP (ribulosa-1,5-bifosfato). De ahí su nombre: carboxilasa/oxigenasa. Esta enzima presenta actividad oxigenasa, lo que implica que, en su sitio activo, puede unir O_2 en lugar de CO_2 , y en ese caso ocurre el proceso de **fotorrespiración**. En este proceso la planta consume O_2 . El O_2 desplaza al CO_2 del sitio activo de la enzima, y esto disminuye la tasa de fijación de CO_2 y la eficiencia de la fotosíntesis. La reacción de oxigenación puede resultar en pérdidas del 30-50% del carbono fijado. En condiciones de alta temperatura y sequía, las pérdidas por fotorrespiración aumentan sustancialmente. Esto ocurre ya que, a altas temperaturas, la solubilidad del CO_2 disminuye drásticamente, resultando en una menor disponibilidad del CO_2 respecto del O_2 en el sitio activo de la rubisco.

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



La enzima rubisco cataliza dos reacciones competitivas: la carboxilación de la RuBP (Fotosíntesis) y la oxigenación de la RuBP (Fotorrespiración).

Actualmente, la fotorrespiración y su marcado efecto en la producción agrícola están siendo investigados para el desarrollo de estrategias tendientes a minimizar la fotorrespiración en plantas.

Sin embargo, cabe la posibilidad de que con el tiempo la fotorrespiración pueda minimizarse sin estrategia de modificación genética alguna. La industrialización, la deforestación, la combustión de medios de transporte, entre otras causas, están provocando un fuerte aumento en la concentración atmosférica de CO₂. A pesar de todos los efectos nocivos que esto tiene sobre la Tierra, las plantas cuya eficiencia fotosintética es menor debido a la actividad oxigenasa de la rubisco, podrían verse favorecidas. Bajo estas condiciones, habría una supresión natural de la fotorrespiración y, en consecuencia, mayores tasas fotosintéticas.

Estrategias fotosintéticas: Plantas C₃, C₄ y CAM

En células del mesófilo, donde ocurre la fotosíntesis, la concentración efectiva de CO₂ es baja, al igual que en la atmósfera. Además, existen diversas barreras, sobre todo en la apertura de los estomas, que limitan el flujo de CO₂ hacia la rubisco. Por otro lado, mantener los estomas abiertos tiene un costo elevado en pérdida de agua por transpiración. Algunas plantas de zonas calidas, áridas o semiáridas tienen mecanismos para concentrar el CO₂ en el entorno de la rubisco, y presentan diferentes anatomías foliares que hacen disminuir la fotorrespiración y la pérdida de agua por transpiración.

Las plantas terrestres se pueden clasificar en tres tipos fotosintéticos:

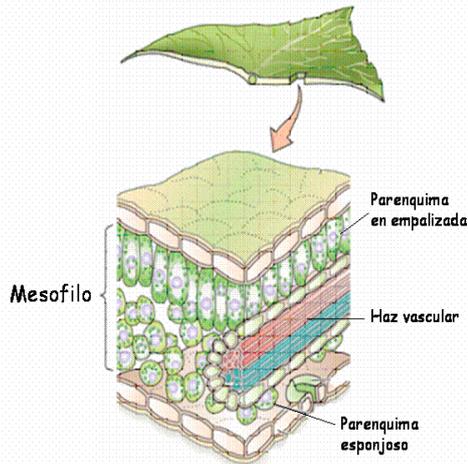
- C₃ (arroz, trigo, papa, cebada, tomate, etc.)
- C₄ (maíz, caña de azúcar, sorgo, etc.)
- CAM (cactus, orquídeas, aloe vera, nopal, piña, etc.)

Las vías C₄ y CAM involucran mecanismos especializados, con costo de energía, para la concentración y transporte del CO₂ a los sitios de fijación de la enzima rubisco. Están adaptadas a zonas donde existe una limitada disponibilidad de agua. La eficiencia fotosintética de estos dos grupos de plantas es superior a la

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.

de las plantas C3 bajo estas mismas condiciones ya que evolutivamente han desarrollado estrategias para reducir el proceso de fotorrespiración.

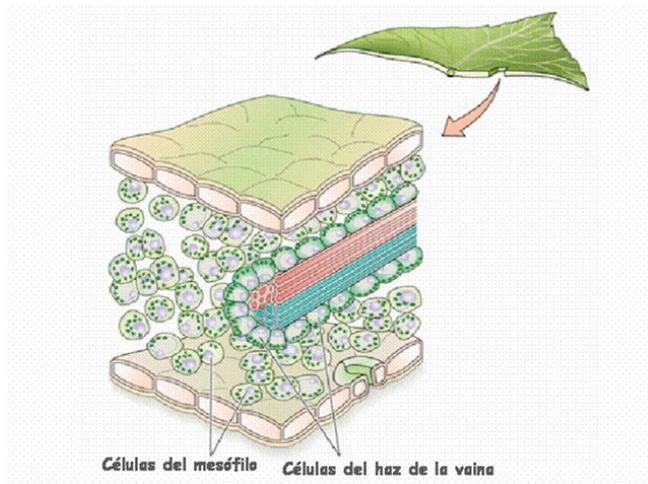
1. Plantas C3: La mayoría de las plantas vasculares, las cianobacterias y las algas verdes están incluidas en este grupo (ver Cuaderno n° 106).



Anatomía foliar de planta C3

Fuente: Taiz, L.; Zeiger, E. Plant physiology. 3rd. ed. Sunderland: Sinauer Associates, cop. 2002

2. Plantas C4: Este grupo de plantas debe su nombre a que el producto inmediato de la fijación del CO₂ es un ácido de 4 carbonos. Son plantas adaptadas a climas tropicales y cálidos. En sus hojas los haces vasculares están rodeados de un conjunto de células, llamadas del “haz de la vaina”, y por fuera de ellas se encuentran las células del mesófilo.



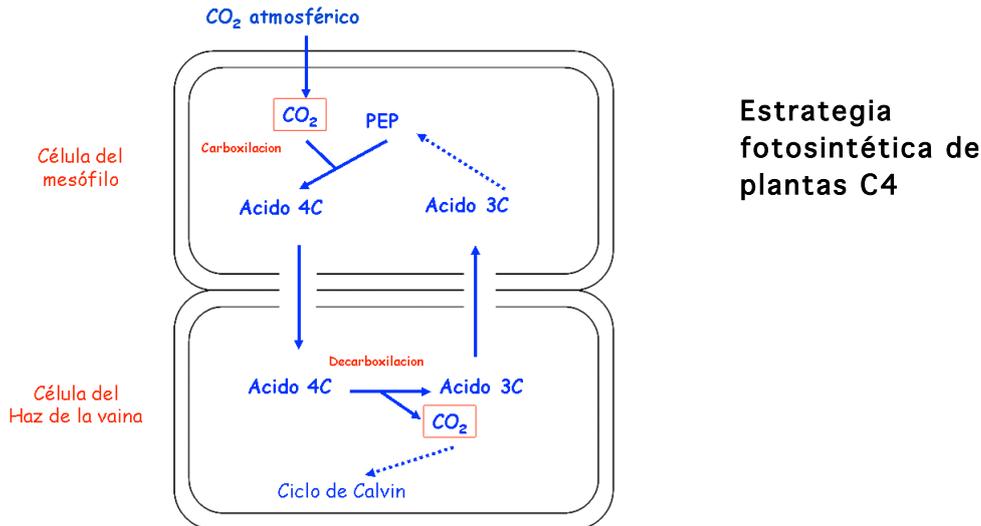
Anatomía foliar de planta C4.

Fuente: Taiz, L.; Zeiger, E. Plant physiology. 3rd. ed. Sunderland: Sinauer Associates, cop. 2002

Las plantas C4 han desarrollado evolutivamente una estrategia tendiente a minimizar las pérdidas ocasionadas por fotorrespiración. Estas plantas poseen una enzima adicional, la PEP carboxilasa, que es capaz de fijar CO₂ sin ser inhibida por la presencia de O₂ (como ocurre con la rubisco). El mecanismo empleado por las plantas C4 (ver imagen) consiste en que la PEP carboxilasa

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.

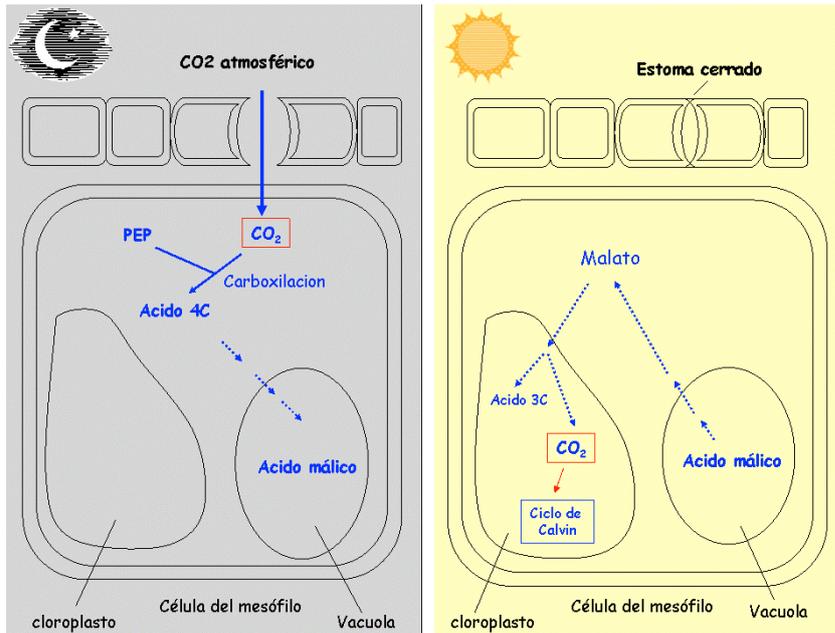
fija el CO_2 en las células del mesófilo y forma un compuesto de 4 carbonos. Este compuesto es transportado a las células del haz de la vaina donde libera el CO_2 , que es fijado definitivamente por la rubisco. En las células del haz de la vaina ocurre el ciclo de Calvin. Es decir que existe una separación espacial entre la fijación primaria de la PEP carboxilasa y la definitiva de la rubisco.



Estrategia fotosintética de plantas C4

- 1. Plantas CAM (Crassulacean acid metabolism):** El mecanismo fotosintético de este grupo fue descubierto en plantas de la familia de las crasuláceas, de allí su nombre. Estas plantas cuentan con adaptaciones para tolerar el estrés hídrico, en su mayoría son plantas suculentas, con hojas carnosas, que habitan desiertos cálidos, con alta radiación solar y escasez de agua. Mantienen cerrados sus estomas durante el día para evitar la pérdida de agua por transpiración y, durante la noche, el CO_2 que ingresa por los estomas es fijado por la enzima PEP carboxilasa con formación de ácido málico (malato). Este compuesto de 4 carbonos es almacenado en vacuolas. Durante el día, en los cloroplastos, el malato pierde un carbono en forma de CO_2 . Este CO_2 ingresa al ciclo de Calvin y es fijado por la enzima rubisco. Por lo tanto, el entorno de la rubisco se encuentra enriquecido en CO_2 mientras que la enzima PEP carboxilasa fija el CO_2 de forma transitoria en un entorno más oxidante. Este mecanismo, al igual que en las plantas C4, tiende a minimizar la fotorrespiración. En este caso existe una separación temporal entre las actividades de la PEP carboxilasa y la rubisco (ver imagen).

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



Estrategia
fotosintética de
plantas CAM

El rendimiento de los cultivos y el mejoramiento tradicional

El rendimiento de cultivos económicamente importantes como el trigo, arroz y maíz se ha duplicado en el último siglo por mejoramiento tradicional (ver Cuaderno n° 5).

El rendimiento de un cultivo puede entenderse desde dos perspectivas:

- Biológica: rendimiento en biomasa,
- Agronómica: rendimiento de semilla o grano.

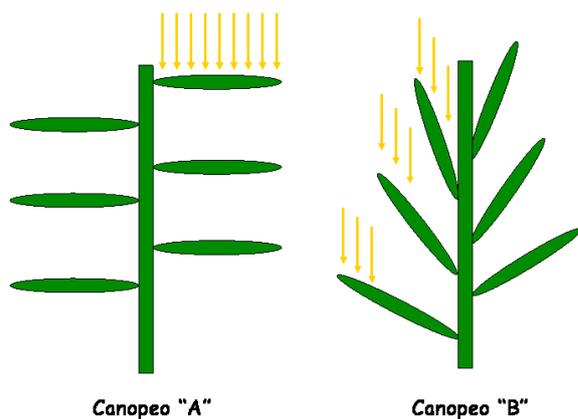
El rendimiento es el resultado de la interacción de diferentes factores como la fotosíntesis, la respiración, los nutrientes disponibles, el estado hídrico de las plantas, entre otros. A su vez, estos factores son alterados por las condiciones climáticas reinantes durante el crecimiento del cultivo y por el manejo del cultivo (control de malezas, fertilizantes, densidad de siembra, etc.). Por eso, una estrategia factible para incrementar el rendimiento de los cultivos es la de aumentar la tasa fotosintética.

Los mejores rendimientos fueron logrados principalmente por el aumento del área foliar, la duración diaria de la fotosíntesis, variantes "stay green" con senescencia retardada, nivel de clorofila en hoja, etc.

Todavía quedan oportunidades para continuar mejorando la fotosíntesis total y el rendimiento de la cosecha utilizando técnicas convencionales de mejoramiento. Un ejemplo de mejoramiento tradicional para la optimización de la fotosíntesis es la selección de cultivos con hojas que no sean completamente horizontales y que permitan que la radiación también incida en las hojas inferiores de la planta.

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.

Un cultivo maduro típico posee tres o más niveles de hojas. Si las hojas del cultivo están dispuestas completamente horizontales, la capa superior de hojas interceptará la mayor parte de la radiación. La luz capturada por el primer nivel de hojas no será aprovechada para fotosíntesis, ya que las hojas superiores estarán por encima del nivel de saturación lumínico. Una mejor disposición del canopeo sería el esquematizado en la figura (Canopeo "B"). Al distribuir la energía lumínica uniformemente entre los distintos niveles de hojas, se logran eficiencias fotosintéticas de más del doble con respecto a la disposición foliar de Canopeo "A". El mejoramiento tradicional ha optimizado estas variables para lograr mejores rendimientos fotosintéticos.



Canopeo de plantas hipotéticas antes del programa de mejoramiento tradicional (Canopeo "A") o luego del programa (Canopeo "B"). Esta ha sido la estrategia aplicada para mejorar el rendimiento de arroz. Variedades originales con hojas de disposición horizontal han sido reemplazadas por variedades nuevas, obtenidas por mejoramiento tradicional, con hojas más verticales y mejores eficiencias fotosintéticas.

Mejoramiento de la fotosíntesis asistida por marcadores moleculares

El mejoramiento tradicional de cultivos se basa en la selección de individuos con la mayor cantidad de caracteres agrónomicamente deseables (ver cuaderno N° 5). El éxito de esta estrategia depende del tipo de herencia que tenga el carácter en cuestión (ver Cuadernos N° 20, 40, 41). En el caso de la eficiencia fotosintética el mejoramiento tradicional se ve dificultado por lo complejo del proceso, por la cantidad de genes involucrados y por la interacción con el ambiente.

La fotosíntesis es un carácter fisiológico cuantitativo, por lo que el programa de mejoramiento puede resultar sumamente complejo. Los caracteres cuantitativos suelen ser codificados por muchos genes. Una estrategia para resolver las dificultades de este tipo de programas de mejoramiento, consiste en utilizar herramientas biotecnológicas para la selección de los distintos individuos, tales como los marcadores moleculares. La selección asistida por marcadores moleculares (ver cuadernos n° 69 y 108) es una forma económica y rápida de incorporar rápidamente caracteres valiosos en un germoplasma cualquiera. Esta tecnología se basa en la identificación de secuencias de ADN (marcadores) cercanas al carácter de interés agronómico.

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



Fotosíntesis e Ingeniería genética

La biotecnología moderna, mediante técnicas de ingeniería genética (ver cuadernos n° 4, 5, 6, 67), promete ofrecer alternativas para resolver las bajas tasas fotosintéticas de ciertas especies vegetales, debido a baja fijación de CO₂.

En los últimos 20 años, se han realizado grandes esfuerzos en aumentar la eficiencia de la actividad carboxilasa de la enzima rubisco para reducir pérdidas en los rendimientos de los cultivos. Una de las principales estrategias consiste en minimizar los niveles de fotorrespiración.

En general, la rubisco es el factor limitante de la fotosíntesis en plantas. Este efecto se ve exacerbado en plantas tipo C₃ en condiciones de alta temperatura y escasez de agua. El objetivo de las diferentes líneas de investigación es aumentar la actividad carboxilasa de la rubisco y/o disminuir su tasa de oxigenación. Actualmente se están desarrollando diferentes estrategias con tal fin como:

- **Expresión de genes de rubisco de un organismo en otro:** Mediante transformación de cloroplastos de tabaco (ver cuaderno n° 26) se logró reemplazar la rubisco por una variante más simple, de origen bacteriano (*Rhodospirillum rubrum*). La transformación fue efectiva y las plantas resultaron viables.
- **Introducción de genes de plantas C₄ en plantas C₃:** Al expresar la enzima PEPCK (*Phosphoenolpyruvate carboxykinase*) de una planta C₄ en cloroplastos de arroz se midió un incremento en la concentración de compuestos de la vía C₄, probando que esta estrategia puede aumentar la capacidad fotosintética de plantas C₃.
- **Expresión de un gen de cianobacterias en plantas superiores:** Se obtuvieron mayores tasas fotosintéticas, crecimiento más rápido y mayor peso final en plantas transgénicas de *Nicotiana tabacum* y *Arabidopsis thaliana* que expresan el gen *ictB*. El producto de ese gen está implicado en el transporte de CO₂ y fue aislado de cianobacterias que requieren altas concentraciones de ese gas para sobrevivir.
- **Aumento en la activación de la rubisco:** Por encima de los 30-35 °C, la asimilación de CO₂ en plantas C₃ se ve reducida por la menor actividad de la rubisco. El estado activo o inactivo de la rubisco depende de la enzima rubisco activasa, que es inestable a temperaturas moderadamente altas. Se aisló el gen de la rubisco activasa de una planta adaptada al desierto, que presenta su máxima tasa fotosintética a 48 °C. Ese gen se introdujo en plantas de *Arabidopsis thaliana*. Bajo condiciones de temperaturas levemente altas, las plantas transgénicas desarrollaron el doble del área

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



foliar con una tasa fotosintética un 30% mayor que las plantas no modificadas genéticamente.

- **Inhibición de la fotorrespiración:** Se ha logrado minimizar la fotorrespiración en *Arabidopsis thaliana* al introducir por técnicas de ingeniería genética una ruta metabólica de *E. coli* implicada en el catabolismo de uno de los sustratos de la fotorrespiración.

CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS

El tema trabajado en este Cuaderno, si bien es una continuidad del Cuaderno 106, tiene un nivel más elevado ya que incluye conceptos más complejos y específicos referidos a la estructura vegetal y la ingeniería genética. En el caso de alumnos de niveles superiores, se trabajará cada aspecto del Cuaderno, las diferentes estrategias, en los diferentes tipos de plantas, y el aumento que esto genera en el rendimiento y productividad.

Se sugiere a continuación, algunos conceptos que se pueden trabajar con alumnos de niveles escolares inferiores, que se desprenden de este Cuaderno:

- Factores que influyen en la fotosíntesis (internos y externos). Por ejemplo, qué sucede en ausencia de luz, o si la planta no tiene pigmentos que capten la luz, qué puede ocurrir si hay poco dióxido de carbono, etc.
- Qué es una enzima; la estructura proteica, el sitio activo, el complejo enzima-sustrato, y los efectos de las altas temperaturas (ver Cuaderno n° 30). Estos temas fueron vistos previamente, y se pueden aplicar para explicar de manera simple la actividad de la enzima rubisco, que cataliza la asimilación y fijación de dióxido de carbono. Esta función ya permite trabajar qué sucedería si la enzima no funcionara, o cómo se podría hacer para aumentar la tasa de la fotosíntesis (aumentando la actividad de esta enzima).
- El intercambio de oxígeno y de dióxido de carbono en las plantas: identificar en qué procesos intervienen en qué casos se incorporan y en qué casos se liberan. Es importante dejar en claro que, más allá de las estrategias y estructuras de las hojas y de las plantas, el proceso de fotosíntesis es básicamente el mismo en todos los organismos fotosintéticos, y los gases están involucrados de la misma forma en la función.
- Las funciones de fotosíntesis y de respiración. Se asocia a la idea anterior de repasar la fotosíntesis y diferenciarla de la respiración. Y, a su vez, relacionar ambos conceptos en el proceso de nutrición de la planta.
- Las plantas, su estructura celular y organización. La estructura de las hojas. Independientemente de las estrategias C3, C4 y CAM, es importante conocer la estructura de las células vegetales, y su ubicación y función específica en la organización de la hoja.

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



ACTIVIDADES

Entre las actividades se presentan algunas que se refieren a los conceptos más básicos de la fotosíntesis y la respiración (actividades 1 y 4), y actividades específicas de las estrategias fotosintéticas explicadas en el Cuaderno con mayor detalle (actividades 2 y 3). De esta forma, se sugiere seleccionar las actividades que se adapten mejor al nivel de los alumnos de la clase.

Actividad 1. Repaso de conceptos

Completar el siguiente cuadro con los conceptos que correspondan según lo aprendido acerca de la fotosíntesis y la respiración.

	Fotosíntesis	Respiración
Se realiza durante el día.		
Se realiza durante la noche.		
Objetivo.		
Gases que produce.		
Gases que consume.		
Partes de la planta donde se realiza.		

Respuesta:

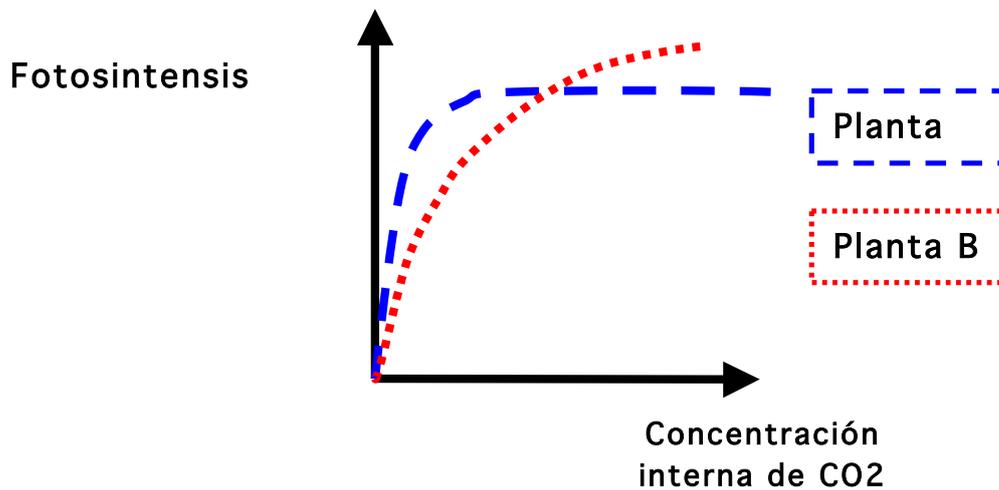
	Fotosíntesis	Respiración
Se realiza durante el día.	Sí	Sí
Se realiza durante la noche.	No	Sí
Objetivo.	Producir compuestos orgánicos.	Obtener energía.
Gases que produce.	Oxígeno (O ₂)	Dióxido de carbono (CO ₂)
Gases que consume.	Dióxido de carbono (CO ₂)	Oxígeno (O ₂)
Partes de la planta donde se realiza.	Partes verdes	Toda la planta

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.

Actividad 2. Análisis de gráfico

Analizar el gráfico y responder a las preguntas que siguen.

En el siguiente gráfico se representa la curva de fotosíntesis neta de dos plantas (A y B) en función de la concentración interna de CO₂.



- A que grupo fotosintético pertenecen ambas plantas? Justificar la respuesta.
- En condiciones de alta temperatura, ¿cuál de las plantas presentará una mayor tasa fotosintética?
- Como podría mejorarse la eficiencia fotosintética de la planta en condiciones de altas temperaturas?

Respuestas Actividad 2

- La planta A es una planta C₄, mientras que la planta B pertenece al grupo de las C₃. A bajas concentraciones de CO₂ habrá mayor oxígeno disponible, por lo que la rubisco de una planta C₃ tendrá mayor actividad oxigenasa que carboxilasa. La planta que presente mayor fotorrespiración tendrá una tasa fotosintética menor. Este es el caso de la planta B, y por ello la planta B es una C₃. En cambio, la planta A es una C₄ porque en condiciones de bajo CO₂ disponible su estrategia para minimizar la fotorrespiración le otorga una ventaja adaptativa por sobre las plantas C₃, y su fotosíntesis neta será mayor. A altas concentraciones de CO₂ la planta C₄ presenta menor eficiencia fotosintética porque su estrategia para concentrar oxígeno en el entorno de la rubisco le significa un gasto de energía. Las plantas C₃ son el grupo de mayor fotosíntesis neta en condiciones de alto CO₂.

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



- b) En condiciones de alta temperatura la planta A tendrá mayor eficiencia fotosintética. La temperatura disminuye la concentración de CO₂ disponible para la fijación por la enzima rubisco. Las Plantas C4 están adaptadas a estas condiciones, ya que su estrategia fotosintética permite reducir el efecto de la fotorrespiración.
- c) Para que la planta B, perteneciente al grupo C3, presente mayor tasa fotosintética en condiciones de alta temperatura, podría modificarse genéticamente de forma tradicional o por ingeniería genética. Hay varias estrategias, si el mejoramiento fuera solo por cruzamientos se podrían optimizar ciertos caracteres agronómicos que contribuyan con una mayor eficiencia fotosintética (área foliar, disposición de las hojas, menor senescencia foliar, etc.). Por biotecnología moderna se podría transformar a la planta C3 con genes de plantas C4 (como la PEP carboxilasa), introducir variantes de rubisco mas eficientes, o activasas activas a mayores temperaturas, etc.

Actividad 3. Completar el siguiente cuadro de comparación entre las diferentes estrategias fotosintéticas.

Vía	C3	C4	CAM
Carboxilación inicial(Enzima)			
Anatomía			
Tasa de Fotosíntesis			
Inhibición por O ₂			
Eficiencia en el uso de agua			
Distribución geográfica			

Respuesta

Vía	C3	C4	CAM
Carboxilación inicial(Enzima)	RUBISCO	PEPC	PEPC
Anatomía	Normal	Kranz	Suculenta
Tasa de Fotosíntesis	Media	Alta	Baja
Inhibición por O ₂	SI	NO	DIA: SI NOCHE: NO
Eficiencia en el uso de agua	Baja	Media	Alta
Distribución geográfica	Amplia	Tropical	Áridos

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



Actividad 4. Laboratorio. Síntesis de almidón mediante la fotosíntesis

A partir del siguiente trabajo de laboratorio los alumnos podrán comprobar la síntesis de almidón a partir de la fotosíntesis. Para detectar almidón en muestras se puede poner unas gotas de lugol (solución de yodo) sobre la sustancia a testear. Si la muestra adquiere un color azulado es porque contiene almidón. Esto se puede demostrar haciendo la siguiente prueba: Colocar en un vaso de precipitados un poco de maicena (almidón de maíz) con una cucharada de agua y agregar unas gotas de lugol. Observar qué color toma la muestra. Este será un control positivo del método de detección de almidón.

Materiales:

- ü Plantas de geranio
- ü Alcohol etílico
- ü Lugol
- ü Mechero
- ü Vasos de precipitados
- ü Papel de aluminio o cartulina
- ü Maicena
- ü Clips para hojas de papel

Procedimiento

2. Seleccionar plantas de geranio en buenas condiciones fisiológicas y con gran superficie foliar para el desarrollo de la actividad.
3. Dividir a las plantas en dos grupos: **Plantas experimentales** y **Plantas control**.
4. Cortar figuras de cartulina o papel de aluminio. Las figuras deberán tener aproximadamente la mitad del tamaño de las hojas.
5. Con los clips sujetar las figuras recortadas solo en las hojas de las Plantas experimentales.
6. Colocar todas las plantas, de ambos grupos, en condiciones de luz, y temperatura ambiental cálida (alrededor de 24°C) durante 5 días aproximadamente.

A cabo de 5 días, realizar la prueba de almidón en ambos grupos de hojas, según el siguiente protocolo:

1. Hervir las hojas en el alcohol etílico, para eliminar la coloración conferida por los pigmentos.

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



2. Eliminar el alcohol etílico.
3. Colocar las hojas decoloradas, con mucho cuidado, en un vaso de precipitados.
4. Agregar algunas gotas de lugol.
5. Observar la coloración que adquieren las hojas y discutir.

Análisis de la experiencia:

¿Cuáles son las hojas que fabricaron almidón? ¿Cómo se explica teniendo en cuenta el tratamiento recibido por los dos grupos?

Las hojas que fabrican almidón son aquellas que están expuestas a la luz. En este caso el reactivo Lugol cambiará su tonalidad rojiza a violeta, al detectar el almidón. La luz permite a las plantas realizar el proceso de la fotosíntesis, en el que se fabrican las sustancias orgánicas.

Material de Consulta

- "Fundamentos de Fisiología Vegetal". Azcón-Bieto J. y Talón M. Editorial. McGrawHill/Interamericana. Barcelona, España. 2000
- "Plant physiology" Taiz, L.; Zeiger, E. 3rd. ed. Sunderland: Sinauer Associates, cop. 2002
- "Fisiología Vegetal". Salisbury, F.B. y C.W. Ross. Grupo Editorial Ibero América, México. 1994.
- "Bioquímica". Lubert Stryer. Editorial Reverté. Cuarta Edición. Barcelona. 1995
- "Molecular Biology of the Cell". Alberts, et al. Fourth edition. [Garland Science](#) New York y London. 2002
- <http://www.efn.uncor.edu/dep/biologia/intrbiol/fotosint.htm> Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba con una completa descripción de las etapas de la fotosíntesis
- "Algunas consideraciones en la relación entre la fotosíntesis y el rendimiento de grano de trigo". Gutierrez-Rodriguez et al. Ciencia Ergo Sum. 2005. Vol:12, 002
- http://www.euita.upv.es/varios/biologia/Temas/tema_11.htm Descripción de la fotosíntesis. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- <http://www.biologia.edu.ar/animaciones/index.htm>. Animación de la etapa foto-absorción. Se accede a través del link "Generación de energía" de esta página de la Universidad Nacional del Nordeste.

"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.



"El Cuaderno de Por Qué Biotecnología" es una herramienta didáctica creada y desarrollada por el equipo pedagógico del Programa Educativo Por Qué Biotecnología. Su reproducción está autorizada bajo la condición de que se aclare la autoría y propiedad de este recurso pedagógico por parte del Programa Educativo Por Qué Biotecnología.