

Tema 6. La fotosíntesis

1. Definición

Se define principalmente como el proceso por el cual los organismos que contienen clorofila absorben la luz solar para así crear su alimento y tener un crecimiento.

Una de las características esenciales de la vida es el consumo de energía, ya que todos los procesos vitales sólo se producen si disponen de ella. Todos los vegetales obtienen esa energía de la luz solar. En ellos, el proceso de captación y transformación de dicha energía en compuestos biológicamente aprovechables ("alimento-energía") se denomina fotosíntesis.

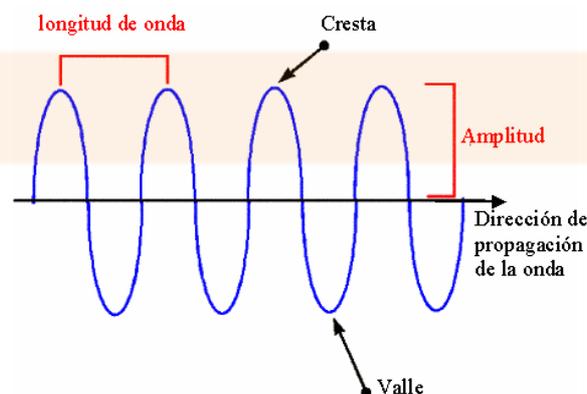
Las plantas poseen un compuesto de color verde llamado clorofila (pigmento fotosintético) que tiene la capacidad de absorber energía de la luz solar y cederla para la elaboración (síntesis) de hidratos de carbono (almidón) a partir de dos compuestos disponibles en el medio: agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2).

Este proceso fotoquímico produce además, oxígeno (O_2) que es liberado a la atmósfera y tiene fundamental importancia para la vida en general, ya que permite cumplir el proceso respiratorio.

El almidón producido representa una materia prima fundamental para la vida de los vegetales ya que, conjuntamente con los nutrientes obtenidos del suelo, permiten cumplir los complejos procesos químicos y biológicos que permiten su existencia. Dado que los vegetales (productores) representan el primer eslabón de las cadenas alimentarias, los animales (consumidores) dependen inevitablemente de la fotosíntesis, de manera que prácticamente toda la energía que circula por los ecosistemas tiene su origen en la fotosíntesis.

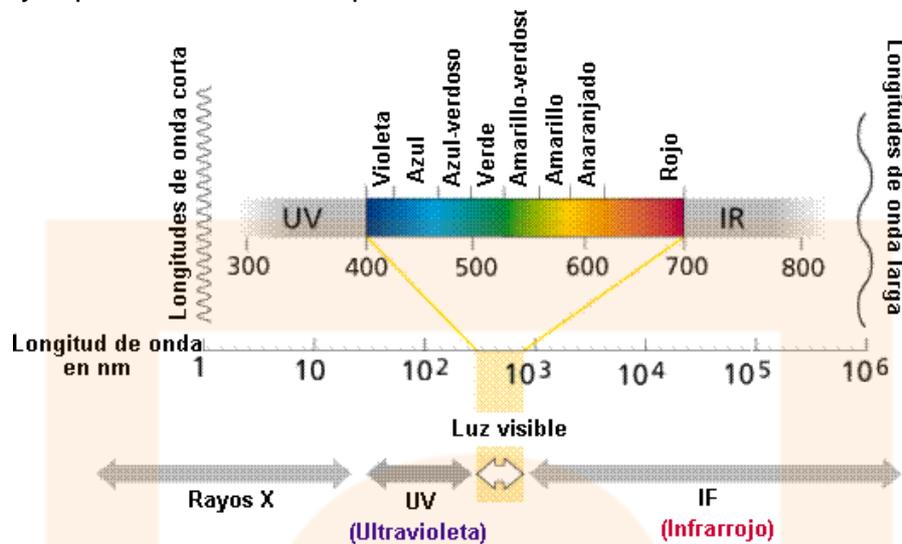
2. Naturaleza de la luz

La **luz blanca** se descompone en diferentes colores (color = longitud de onda) cuando pasa por un prisma. La longitud de onda se define como la distancia de pico a pico (o de valle a valle). La energía es inversamente proporcional a la longitud de onda: longitudes de onda larga tienen menor energía que las cortas.



La distribución de los colores en el espectro está determinada por la longitud de onda de cada uno de ellos. La luz visible es una pequeña parte del espectro electromagnético. Cuanto más larga es la longitud de onda de la luz visible, tanto

más rojo es el color. Asimismo las longitudes de onda corta están en la zona violeta del espectro. Las longitudes de onda más largas que las del rojo se denominan infrarrojas, y aquellas más cortas que el violeta, ultravioletas.



La luz tiene una naturaleza dual: se comporta como onda y partícula. Entre las propiedades de la onda luminosa se incluye la refracción de la onda cuando pasa de un material a otro.

Albert Einstein desarrolló en 1905 la teoría de que la luz estaba compuesta de unas partículas denominadas fotones, cuya energía era inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz. La luz, por lo tanto, tiene propiedades explicables tanto por el modelo ondulatorio como por el corpuscular.

3. Clorofila y otros pigmentos

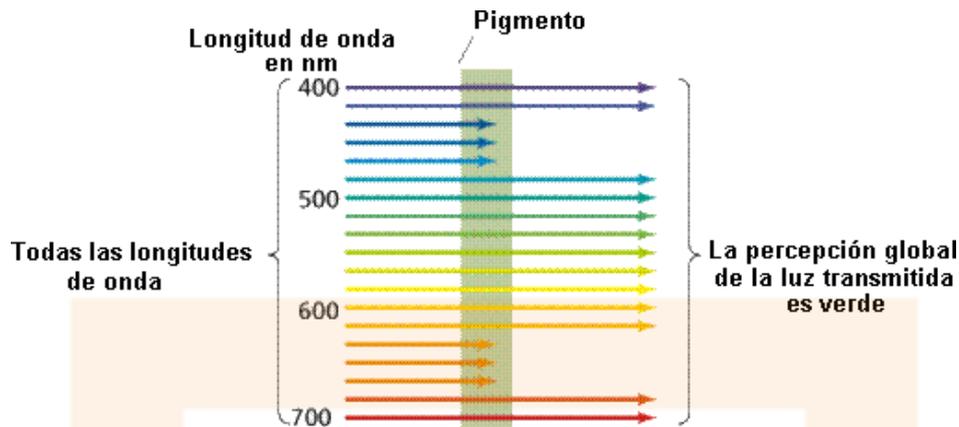
Un pigmento es cualquier sustancia que absorba la luz. El color del pigmento está dado por la longitud de onda no absorbida (y por lo tanto reflejada).

La clorofila es el pigmento verde común a todas las células fotosintéticas. Absorbe todas las longitudes de onda del espectro visible, excepto las de la percepción global del verde, detectado por nuestros ojos.

Los otros pigmentos incluyen a la **clorofila b** y los **carotenoides**, como el beta caroteno y las xantofilas (carotenoide de color amarillo), y absorben la energía que no es absorbida por la clorofila.

La **clorofila a** absorbe la energía de longitudes de onda correspondientes a los colores que van del violeta azulado al anaranjado-rojizo y rojo.

Los **carotenoides** y la **clorofila b** absorben en la longitud de onda del verde. Ambas clorofilas también absorben en la región final del espectro (anaranjado - rojo); o sea, a longitudes de onda larga y menor cantidad de energía.



Si un pigmento absorbe luz puede ocurrir una de estas tres cosas:

- la energía se disipa como calor.
- la energía se emite inmediatamente como una de longitud de onda más larga, fenómeno conocido como fluorescencia.
- la energía puede dar lugar a una reacción química como en la fotosíntesis. La clorofila sólo desencadena una reacción química cuando se asocia con una proteína embebida en una membrana (como en el cloroplasto) o los repliegues de membrana.

4. Cloroplastos

Los cloroplastos son orgánulos exclusivos de las células vegetales. En ellos tiene lugar la fotosíntesis, proceso en el que se transforma la energía lumínica en energía química.

Un cloroplasto tiene tres membranas y presenta tres compartimentos:

- La **membrana externa** es muy permeable.
- La **membrana interna** es menos permeable, no presenta pliegues (la de la mitocondria sí los presenta). Entre ambas membranas queda un primer compartimento que es el espacio intermembrana. La membrana interna delimita un espacio que es el estroma, donde se encuentran ribosomas y gránulos de almidón
- La **membrana tilacoide** es el tercer tipo de membrana, aparece formando unos sacos aplanados denominados tilacoides, y forman unas agrupaciones llamadas grana. Los tilacoides están interconectados y delimitan una tercera cavidad que es el espacio tilacoide.



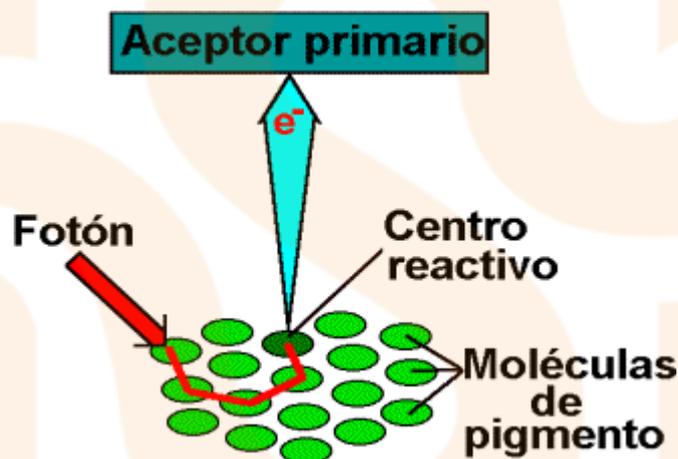
Esta membrana tilacoidal es la responsable de la captación de la energía solar, gracias a la presencia de clorofilas y de otros pigmentos asociados con proteínas en unas estructuras funcionales que son los fotosistemas.

5. Fotosistemas

Los fotosistemas son las unidades de la membrana tilacoidal. Cada fotosistema está formado por dos partes:

- Un **complejo antena**. Formado por varios centenares de moléculas de clorofila y carotenos.
- Un **centro reactivo**. Tiene unas moléculas de **clorofila a** que actúan como una verdadera *trampa energética*, puesto que los electrones que liberan son *catapultados* hacia la cadena de transporte electrónico de la membrana tilacoidal.

El **complejo antena** funciona así: Cuando una de sus moléculas se excita al captar un fotón (unidad de energía lumínica) transfiere esa energía de excitación a otra molécula cercana por un proceso de resonancia y, en una reacción en cadena, esa energía llega hasta el centro reactivo.



Existen dos fotosistemas:

- El **fotosistema I**, cuya molécula reactiva de *clorofila a* se conoce como **P700**.
- El **fotosistema II**, que contiene una molécula de *clorofila a* reactiva denominada **P680**.

Ambas formas "activas" de la **clorofila a** funcionan en la fotosíntesis debido a su relación con las proteínas de la membrana tilacoide. Durante las reacciones de la **fase lumínica** los dos fotosistemas actúan coordinadamente.

La **fotofosforilación** es el proceso de conversión de la energía del electrón excitado por la luz, en un enlace de una molécula de ADP. Esto ocurre cuando los electrones del agua son excitados por la luz en presencia de P680.

La energía de la luz causa la eliminación de un electrón de una molécula de P680 que es parte del Fotosistema II. El electrón es transferido a una molécula aceptora (aceptor primario), y pasa luego cuesta abajo al Fotosistema I a través de la cadena transportadora de electrones.

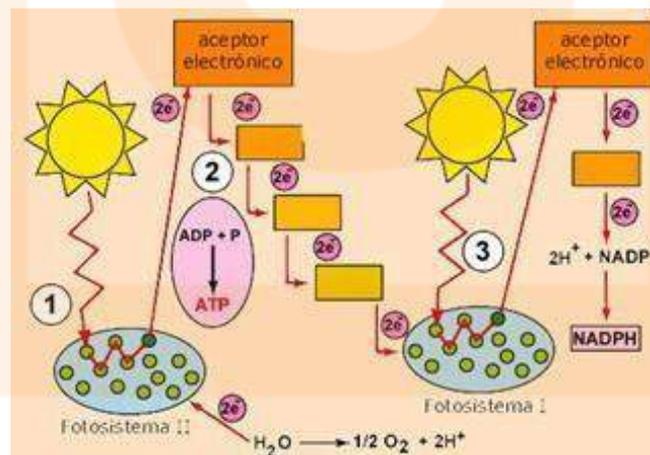
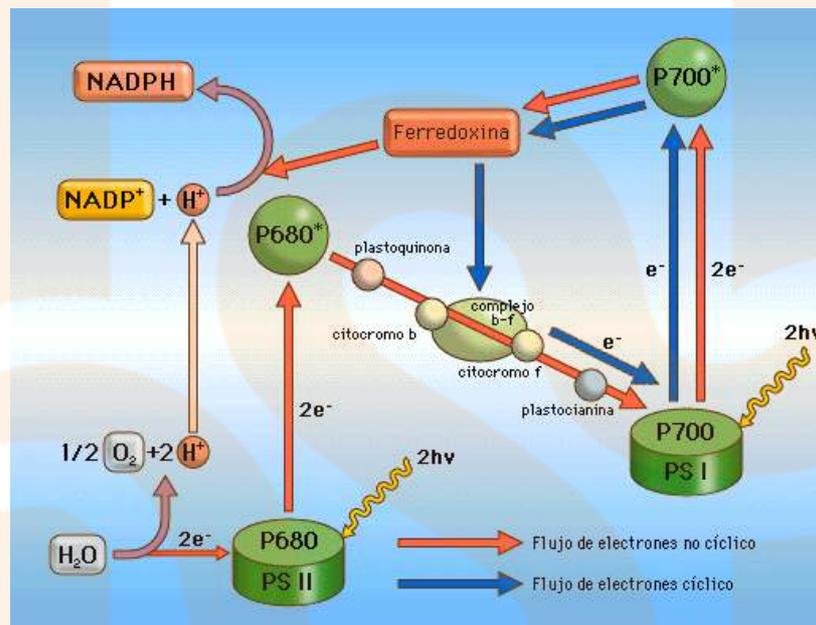
La P680 requiere un electrón, que es tomado del agua, rompiéndola en iones H^+ y O^{2-} . Estos iones O^{2-} se combinan para formar O_2 , que se libera a la atmósfera.

La luz actúa sobre la molécula de P700 del Fotosistema I, produciendo que un electrón sea elevado a un potencial más alto. Este electrón es aceptado por un aceptor primario (diferente del asociado al Fotosistema II).

El electrón pasa nuevamente por una serie de reacciones redox, y finalmente se combina con $NADP^+$ e H^+ para formar NADPH.

Existe, por lo tanto, un continuo flujo de electrones desde el agua al NADPH, el cual es usado para la fijación del carbono.

En el Fotosistema II, el "bombeo" de iones H dentro de los tilacoides y la conversión de $ADP + P$ en ATP es motorizado por un gradiente de electrones establecido en la membrana tilacoidea.



6. Etapas de la fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso que se desarrolla en dos etapas.

6.1. La **etapa clara**

Es un proceso dependiente de la luz. Requiere de energía de la luz para fabricar moléculas portadoras de energía. La etapa clara ocurre en la grana.

En esta etapa, la luz que "golpea" a la clorofila excita a un electrón a un nivel energético superior. En una serie de reacciones, la energía se convierte (a lo largo de un proceso de transporte de electrones) en ATP y NADPH. El agua se descompone en el proceso, liberando oxígeno como producto secundario de la reacción.

El ATP y el NADPH se utilizan para fabricar los enlaces C-C en la siguiente etapa.

6.2. La **etapa oscura**

Es un proceso independiente de la luz. Los productos de la primera etapa son utilizados para formar los enlaces de los carbohidratos. La etapa oscura ocurre en el estroma de los cloroplastos.

En la etapa oscura, el anhídrido carbónico de la atmósfera (o del agua en los organismos acuáticos) es capturado y modificado por la adición de **hidrógeno** para formar carbohidratos. La transformación del anhídrido carbónico en un compuesto orgánico se conoce como **fijación del Carbono**. La energía para ello proviene de la primera fase de la fotosíntesis. Los sistemas vivos no pueden utilizar directamente la energía de la luz, pero pueden, a través de una complicada serie de reacciones, convertirla en enlaces C-C, y esta energía puede ser luego liberada por la glicólisis y otros procesos metabólicos.

7. Ciclo de Calvin

El ciclo de Calvin es un conjunto de reacciones enzimáticas que tienen lugar en las plantas y que, en líneas generales, transforman el dióxido de carbono (CO_2) en sacarosa (un azúcar) y almidón (una sustancia de reserva).

Todo este proceso, conocido con el nombre de ciclo de fijación del carbono o ciclo de Calvin, tiene lugar en el estroma de los cloroplastos, ubicados en las hojas verdes de las plantas.

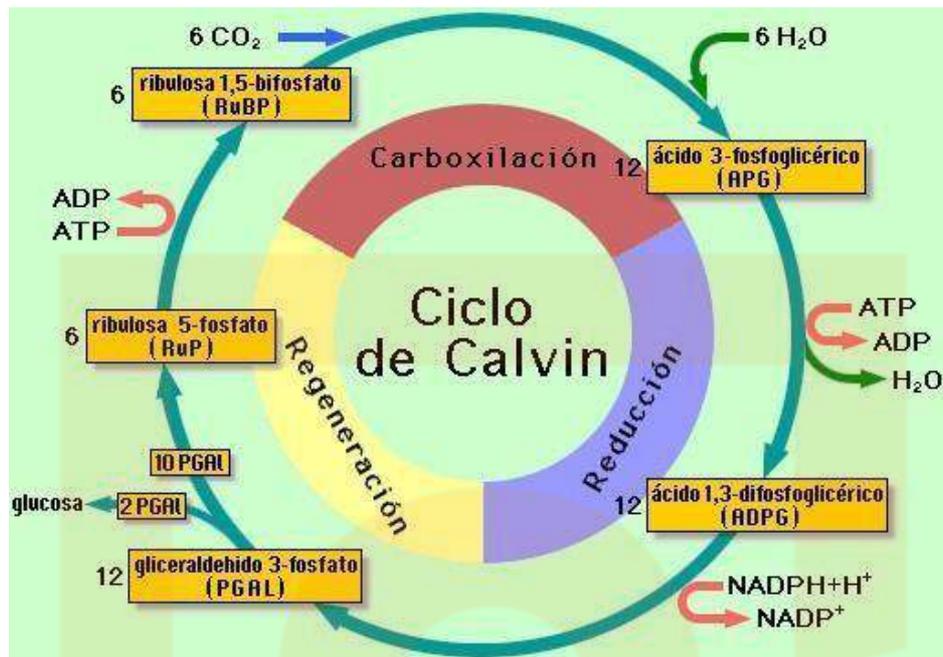
El mecanismo de síntesis de los azúcares es catalizado por la enzima ribulosa carboxilasa, la proteína más abundante en el cloroplasto.

En una primera etapa, esta enzima utiliza el CO_2 para desencadenar la reacción de producción de fosfoglicerato.

Después de una serie de reacciones, este compuesto se transforma en gliceraldehído fosfato. Una parte de este azúcar es utilizada para regenerar más ribulosa difosfato; otra parte se convertirá en aminoácidos, grasas y almidón. Pero la parte más importante del gliceraldehído fosfato es transportada desde el cloroplasto hasta el citoplasma de la célula donde se integra, como un producto intermediario, en el ciclo de la glucosa, proceso durante el cual se transformará en fructosa fosfato y glucosa fosfato.

Estos azúcares se unirán más tarde para dar lugar al producto final, un disacárido llamado sacarosa fosfato. De esta manera la planta va almacenando sacarosa en las células de las hojas hasta que, en función de los requerimientos de

hidratos de carbono, es exportada al resto de la planta a través de los haces vasculares.



8. Fotorrespiración

En la luz, las plantas presentan un tipo de respiración que depende del oxígeno. El proceso se denomina fotorrespiración y consume, además de oxígeno, energía fotosintética, para producir CO_2 . La fotorrespiración es, pues, un sistema contrario a la fotosíntesis y negativo para las plantas.

Recuerda: En la fotosíntesis las plantas toman CO_2 del aire y liberan oxígeno. EXAMEN

Dicho proceso sucede en presencia de luz y además se incrementa conforme aumenta la temperatura ambiente, lo cual sucede especialmente en días claros y soleados. A mayor temperatura, más tasa de fotorrespiración, llegando a igualar en ocasiones la tasa de fotosíntesis. En esos momentos, el ritmo de crecimiento de las plantas se detiene.

Las plantas realizan la fotosíntesis con el objeto de almacenar la energía solar en compuestos orgánicos altamente energéticos; por el contrario **la fotorrespiración consume esa energía**.

La causa de este proceso de fotorrespiración es la acción de una enzima que poseen las plantas. Esta enzima, denominada *rubisco* se comporta como fijadora de carbono en la fotosíntesis, pero a determinada temperatura empieza a comportarse como oxigenasa, es decir, capturadora de oxígeno. Esto implica que una parte significativa del carbono fijado por fotosíntesis en el Ciclo de Calvin se oxida por fotorrespiración (formando CO_2) y no incrementa la reserva de carbohidratos.

9. Vía 4C

Muchas plantas han desarrollado mecanismos consistentes en aumentar la concentración de CO_2 disponible para la rubisco y así disminuir la actividad oxigenasa y la pérdida de C por fotorrespiración.

Algas y cianobacterias tienen mecanismos de bombeo de CO_2 dentro de las células. Estas bombas utilizan ATP obtenido por las reacciones lumínicas de la fotosíntesis.

En algunas plantas, el mecanismo de acumulación de CO_2 se basa en la síntesis y acumulación de moléculas de cuatro carbonos (malato o aspartato), antes de la fijación sobre la rubisco. Estas moléculas de cuatro carbonos son después descarboxiladas y el CO_2 es fijado mediante el ciclo de Calvin.

Las plantas C_4 son anatómicamente distintas de las plantas C_3 . Las plantas C_4 tienen hojas con dos tipos de células con cloroplastos:

- Las **células del mesófilo** (interior de la hoja), que llevan a cabo la fijación de CO_2 para sintetizar ácidos de cuatro carbonos
- Las **células de la vaina**, en las que se descarboxilan los ácidos C_4 y se asimila el CO_2 vía ciclo de Calvin. Plantas como el maíz o la caña de azúcar son ejemplos típicos.

El metabolismo C_4 implica:

1. Carboxilación en las células del mesófilo para formar la molécula de 4 carbonos
2. Transporte del ácido de 4 carbonos de las células del mesófilo.
3. Descarboxilación de los ácidos de cuatro carbonos y liberación del CO_2 que será fijado por la rubisco y el ciclo de Calvin.
4. Regreso del ácido de 3 carbonos a las células del mesófilo.