

# EL CICLO DE LA ENERGIA<sup>1</sup>

Jorge Adolfo Nieto Díaz<sup>2</sup>

## INTRODUCCION

La célula es un organismo complejo, no es solamente la sumatoria de organelos sino mucho más; a su interior se dan una serie de mecanismos interrelacionados que su comprensión requiere de un conocimiento avanzado en genética, bioquímica y fisicoquímica entre otras áreas del saber.

Un organelo siempre trabaja en función de otro; sólo, no tiene ningún sentido. En un artículo anterior titulado "El ciclo celular. Hacia una visión holística de la célula, se analizaron, si no a fondo, por lo menos sí las principales relaciones interorganelos tratando de mostrar la célula como un organismo dinámico.

Una de las principales relaciones que se presentan intracelularmente es la que se entabla entre el cloroplasto y la mitocondria, a menudo se discute que fué primero si el proceso fotosintético o el proceso de respiración y es un dilema tan grande como el del huevo y la gallina. Sin embargo, las pruebas de los estratos geológicos han demostrado que a medida que estos son más antiguos hay menor presencia de óxidos, lo que hace pensar que no existía mucho oxígeno en la atmósfera hace 3.500 millones de años, fecha en la cual aparecieron las primeras esferas microscópicas aisladas parecidas a las bacterias actuales (existen fósiles de estas estructuras).

Durante los primeros 3.000 millones de años las células se dedicaron a perfeccionar sus estructuras mediante un profundo desarrollo evolutivo; así como también implementaron otras estructuras funcionales para responder a los cambios del medio ambiente.

Según Lynn Margulis de la Universidad de Boston "Las bacterias primitivas (las que se cree están más directamente relacionadas con nuestras células antepasadas más antiguas) no tienen protección química contra el oxígeno y su material celular se quema si es expuesto al oxígeno. Estas células primitivas llamadas anaerobias estrictas, viven de fermentación, absorbiendo compuestos orgánicos y generando ATP anaeróbicamente. Es razonable suponer que evolucionaron en ausencia de oxígeno. Ante la presencia de moléculas de ARN, de ADN y de ribosomas en el cloroplasto y en la mitocondria se ha sugerido la teoría mediante la cual se dice que primero estos organismos funcionaron por separado, pero luego se establecieron relaciones simbióticas entre los dos y esto hace que hoy en día los dos mecanismos se alimenten mutuamente. En el presente documento se analizara primero la respiración y luego la fotosíntesis.

## EL PROCESO DE RESPIRACION

A menudo se dice que la respiración celular la lleva a cabo la mitocondria, sin embargo el concepto es mucho más amplio ya que una parte de este proceso se realiza por fuera de ella tal es el caso del ciclo de la glucólisis que se da en el citosol del citoplasma, y del ciclo del glioxilato que se lleva a cabo en el glioxisoma organelo que también contribuye a la producción de energía.

El proceso de respiración posee tres pasos fundamentales que son:

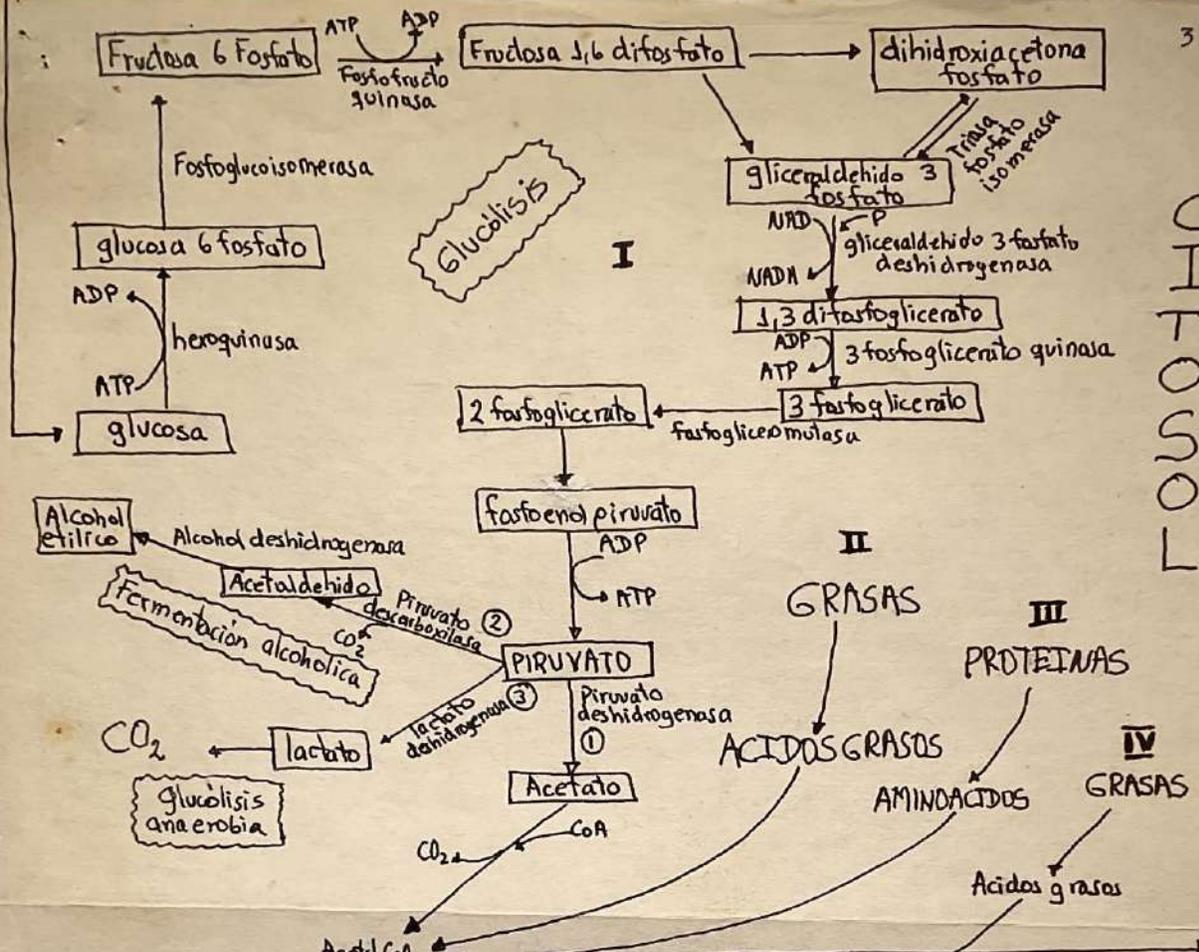
1. Notas de clase 1.992
2. Profesor de Biología general y Fisiología Comparada e Higiene, Universidad de la Salle. Departamento de Química y Biología, Facultad de Ciencias de la Educación.

1. Degradación de alimentos en el citosol de citoplasma
2. Ciclo de Krebs en la mitocondria
3. Transporte de electrones, también en la mitocondria.

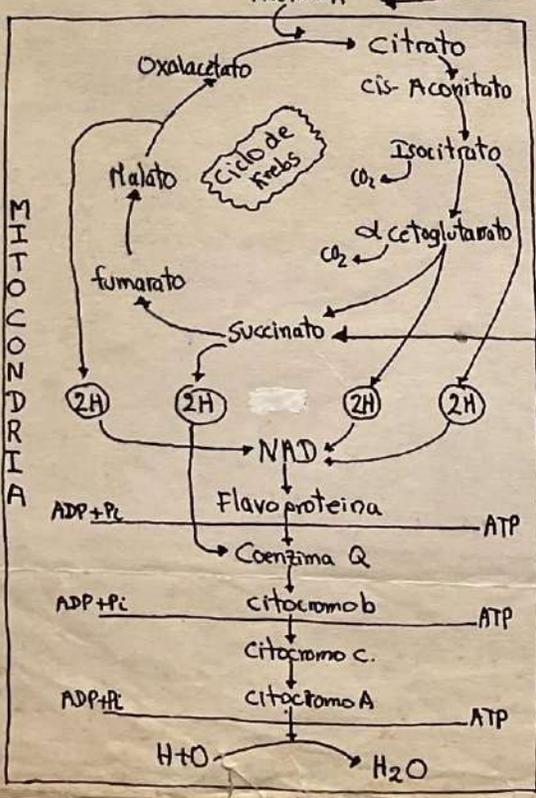
La Degradación de alimentos se hace en el siguiente orden; en primera instancia una célula utiliza normalmente la glucosa para obtener energía, pero si requiere de energía inmediata y en abundancia echará mano de las grasas que también son reservas energéticas, y en última instancia se toman las proteínas aunque el organismo solo hace esto en altos grados de desnutrición no es un camino muy normal. para este proceso. La degradación de la glucosa (ver fig. 1) se hace mediante un ciclo conocido como glucolisis aerobica allí la glucosa recibe un grupo fosfato del ATP y en presencia de la enzima hexoquinasa es transformada en glucosa 6 fosfato, luego en presencia de una fosfoglucoisomerasa se convierte en fructosa 6 fosfato, allí recibe otro grupo fosfato y del ATP y con ayuda de la fosfofructoquinasa se forma la fructosa 1,6 difosfato (1,6 se refiere a la posición de los átomos en la molécula de fructosa) este compuesto se transformará en dos moléculas de tres carbonos cada una (la fructosa posee 6) llamadas gliceraldehido 3 fosfato, muchas veces algunas moléculas toman un camino anexo que es convertirse primero en dihidroxiacetona fosfato y mediante la enzima triosa fosfato isomerasa si se convierte en gliceraldehido 3 fosfato; aquí en este paso surge una molécula considerada como transportadora de electrones, llamada NAD (Dinucleotido adenin nicotinamida) que captura algunos átomos de hidrógeno y se convierte en NADH la forma reducida, además de la adición de fosforo y en presencia de la enzima gliceraldehido 3 fosfato deshidrogenasa el gliceraldehido 3 fosfato se transforma en 1,3 difosfoglicerato, entra luego el ADP y captura en átomo de fósforo para convertirlo en 3 fosfoglicerato, reacción catalizada por la 3 fosfoglicerato quinasa, luego una enzima llamada fosfogliceromutasa hará saltar de posición al átomo de fósforo y se formará el compuesto 2 fosfoglicerato, este se transforma a su vez en fosfoenol piruvato al cual le es extraído el fósforo que tiene para dejarlo simplemente como piruvato; aquí es donde el camino del proceso se ramifica pues algunos organismos cogerán la vía de la fermentación alcohólica en donde este compuesto es transformado en acetaldehido y luego en alcohol etílico en presencia de las enzimas piruvato descarboxilasa y alcohol deshidrogenasa respectivamente con el desprendimiento de  $\text{CO}_2$ . Otros tomarán el camino de la glucólisis anaeróbica para transformar el piruvato en lactato con el desprendimiento de  $\text{CO}_2$ ; finalmente el camino más común que se toma es el de convertir el piruvato en acetato, extraerle el  $\text{CO}_2$ , adicionarle la coenzima A y formar un compuesto llamado Acetil CoA que es el que ingresará a la mitocondria.

Las proteínas que van a ser utilizadas en el proceso de obtención de energía serán primero desaminadas y despues de una serie de reacciones complejas convertidas en Acetil CoA, con la formación de úrea como producto de deshecho.

Las grasas para ser utilizadas primero se degradan a ácidos grasos, los cuales se convierten en acetil CoA para ingresar via mitocondria o en algunos casos ingresan a otro organelo celular llamado microcuerpo, glioxisoma o peroxisoma en forma de acetil CoA graso allí sufren un cambio a acetil CoA mediante el ciclo de la beta oxidación donde aparece un transportador de electrones, el FAD (Flavin adenin dinucleotido) que le extrae hidrógeno para convertirse en  $\text{FADH}_2$  a su vez este compuesto reacciona con el oxígeno para formar el  $\text{H}_2\text{O}_2$  y nuevamente el FAD; el peróxido de hidrógeno debe ser convertido en agua común mediante la enzima catalasa, de otra manera la célula moriría intoxicada. El acetil CoA obtenido por este procedimiento entrará a cumplir con otro ciclo llamado el ciclo del glioxilato en donde hay productos intermedios tales como el citrato, iso-



MITOSOL

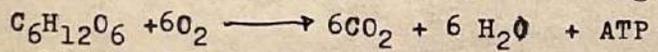


- 3 pasos fundamentales
- 1.- degradación de alimentos
  - 2.- ciclo de Krebs - ciclo del glioxilato
  - 3.- Transporte de electrones.

Fig.1 **RESPIRACION**

Nota, este esquema se puede unir con el del pag 8 y formaría solo.

citrato, glioxilato, malato, y oxalacetato; en el paso de isocitrato a glioxilato muchas moléculas se convierten en un compuesto llamado succinato que saldrá de este organelo y se dirigirá a la mitocondria a colaborar en el ciclo de Krebs; por eso se dice que el glioxisoma colabora en el proceso de respiración celular, además de otras funciones. Una vez que se obtiene el Acetil CoA bien sea por degradación de glucosas, grasas o carbohidratos, se inicia el proceso en la mitocondria, realizándose allí el llamado ciclo de Krebs en donde se convierte inicialmente en citrato, luego en aconitato, despues en isocitrato con el desprendimiento de CO<sub>2</sub>, más tarde en alfa cetoglutanato con desprendimiento de más CO<sub>2</sub>, luego a succinato, a fumarato a malato a oxalacetato y nuevamente a citrato. El paso de un compuesto a otro está mediado cada uno por una enzima diferente además se genera el desprendimiento de una gran cantidad de átomos de hidrógeno, a menudo se habla de flujo de electrones, estos no se pierden sino que son atrapados por sustancias transportadoras de electrones que sirven casi que exclusivamente dep puentes, entre ellas tenemos la NAD, La flavoproteina, la coenzima Q, el citocromo B, el citocromo C y el citocromo A. Este proceso de transporte de electrones genera una gran cantidad de electrones libre que son los que van constituyendo progresivamente las moléculas de ATP; muchos de ellos reaccionarán con átomos de oxígeno para formar moléculas de agua . Paradójicamente el proceso de respiración se ha reducido a la siguiente ecuación:



y como hemos visto anteriormente, es algo mucho más complejo. Para cumplir con los dos últimos pasos del proceso de respiración que son el ciclo de Krebs y el transporte de los electrones, la mitocondria posee una configuración especial (ver fig. 2) con dos membranas, una externa lisa y sin interrupciones, y una interna con plegamientos que reciben el nombre de crestas, estas aumentan sustancialmente la cantidad de membrana que puede ser acomodada en el interior de la mitocondria y es el lugar donde se localizan las enzimas que colaboran en el ciclo de Krebs y permiten que un compuesto sea transformado en otro, aumentandose de este modo la eficacia metabolica en un espacio reducido; el espacio interno de la mitocondria se denomina matriz y allí se localizan ribosomas y las fibras de ADN además de sales, otros solutos y enzimas que catalizan las oxidaciones de los nutrientes. Alrededor del 50% del material de la matriz mitocondrial es proteina.

Los productos finales dell proceso de respiración, el bioxido de carbono, el agua y el ATP serán utilizados para los demás procesos metabólicos de la célula, en especial para la fotosíntesis.

EL PROCESO DE FOTOSINTESIS

La hoja es el órgano fotosintetico por excelencia de la planta, aunque literalmente cualquier parte que contenga cloroplastos puede hacer este proceso.

Cuando se hace un corte transversal de una hoja, desde el haz hasta el envés se localizan las siguientes zonas (ver fig. 3): una cubícula que protege la hoja contra la desecación, la epidermis superior, el parénquima de empalizada (mesófilo de empalizada) o clorénquima, las cámaras subestomáticas, los estomas y la epidermis inferior además de localizar en la zona pque denominamos nervadura los vasos conductores xilema y floema. El clorénquima recibe este nombre porque sus células presentan unos organelos llamados cloroplastos (en abundancia) que son los sitios exactos donde se localiza el proceso de fotosíntesis; dentro de los cloroplastos se haya una molécula química directamente relacionada con este proceso

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF TORONTO



que es la clorofila, aunque también existen otros pigmentos fotosintetizadores, tal es el caso de los carotenoides y las ficobilinas. Las ficobilinas pertenecen a las algas rojas y algas verdeazules y están concentradas en gránulos llamados ficobilisomas que se ven como partículas amorfas en las micrografías electrónicas de las células de estas algas. La función de estos pigmentos fotosintetizadores es precisamente el poder absorber la energía solar a lo ancho de todo el espectro visible cuyas longitudes de onda varían entre 400 y 700 nanómetros.

La clorofila es el pigmento que presenta la máxima efectividad para este proceso, comparada con los otros; este pigmento absorbe energía en las longitudes del azul y el rojo que son las más eficaces en la inducción de la liberación de oxígeno o de otra actividad fotoquímica.

Las clorofilas son liposolubles y se pueden extraer y purificar fácilmente de las proteínas contaminantes. Químicamente la clorofila tiene dos porciones, una molécula de porfirina formada por un átomo central de magnesio al cual se hallan unidos 4 átomos de nitrógeno, cada uno de los cuales se localiza en un anillo pirrólico (ver fig.4) de ahí su nombre de compuestos tetrapirrólicos y una cadena larga de fitol (es un lípido). Hay diferentes tipos de clorofilas, pero difieren unas de otras es en las variaciones que hay en la molécula de porfirina, mas no en la función; se encuentran entonces: la clorofila A en plantas superiores y en algas, la clorofila B en plantas superiores y en la mayoría de algas verdes, la clorofila C en diatomeas, dinoflagelados y algas café, la clorofila D en las algas rojas y la bacterioclorofila especialmente en algunas bacterias y su característica es que no liberan oxígeno molecular.

La clorofila A tiene dos variedades, una que tiene la capacidad de absorber longitudes de onda de hasta 700 nanómetros por eso se le llama clorofila P700 y otra que absorbe tan solo hasta 690 nanómetros, por lo que se le llama clorofila P690 (P680).

Existen otros elementos básicos para la fotosíntesis aparte de la clorofila y son el bióxido de carbono, el agua y la luz.

Se ha comprobado mediante la utilización de isótopos radioactivos que el  $\text{CO}_2$  que se utiliza para la fotosíntesis proviene del aire y que penetra a las hojas a través de unas estructuras conocidas como estomas (ver fig. 5) que es un aparato formado por dos células de forma arriñonada que se abre o se cierra gracias a las presiones de turgencia que se dan a su interior; estos gases se acumulan en espacios que están inmediatamente después, las cámaras subestomáticas (fig.3).

El agua que se utiliza se obtiene a través de la raíz y se verificó mediante isótopos que el oxígeno que se libera al final de todo el proceso fotosintético se obtiene precisamente de ella.

La luz solar generalmente la vemos o la pintamos de color amarillo; sin embargo, sabemos que lo que nos llega es un paquete de varios colores al cual se le da el nombre de fotón. Los colores que vienen en un fotón van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, la energía liberada por un fotón se llama cuanto.

Los cloroplastos de las células eucarióticas poseen una membrana doble con un pequeño espacio (un poco difuso) entre las dos; el interior recibe el nombre de estroma y allí se localizan compartimientos denominados tilacoides (ver fig. 6) organizados unos encima de otros, formando pilas que se llaman granas y por eso a veces se utiliza el término tilacoides de la grana, aunque hay algunos de estos que van de una grana a otra y reciben otro nombre, tilacoides del estroma; dentro de los tilacoides se localizan las moléculas de clorofila. Los espacios que hay entre los tilacoides forman lo que es el estroma que contiene numerosos gránulos que se tiñen de rojo y de función desconocida hasta ahora, además de numerosos ribosomas y agregados de fibrillas de ADN de 2 nm de ancho, este tipo de estruc-

turas presentes tanto en el cloroplasto como en la mitocondria es lo que ha llevado a pensar que en algún momento de la evolución fueron organismos independientes y que en busca de una relación simbiótica terminaron incluidos dentro de una misma estructura (célula).

El proceso de fotosíntesis tiene dos partes fundamentales una que se realiza estrictamente en presencia de la luz y que se llama fase lumínica, y otra que no requiere de ella y se denomina fase oscura.

La fase lumínica se da mediante tres pasos claves; la fotólisis del agua, la fotoexcitación y la fotofosforilación (ver fig. 7).

La fotólisis del agua es un proceso que tiene que ver con el rompimiento de la molécula de agua por acción de la energía solar, liberando una gran cantidad de electrones al interior del cloroplasto y oxígeno molecular que es liberado al exterior de la planta.

La fotoexcitación es un proceso en el cual la energía del sol es capaz de hacer saltar los electrones de los átomos que componen la clorofila, desde los niveles interiores hasta los exteriores, de esta manera un átomo puede transferir un electrón a otro átomo o molécula que tenga un nivel energético menor; este procedimiento también genera un flujo de electrones.

La fotofosforilación es la formación de moléculas de ATP a partir del ADP, aprovechando el flujo de electrones que hay entre las sustancias transportadoras.

El mecanismo que opera en la fase lumínica de la fotosíntesis es el siguiente; la luz llega sobre los cloroplastos y ocasiona la fotólisis del agua, la fotoexcitación en el llamado fotosistema II constituido por la clorofila P690 y la fotoexcitación en el fotosistema I formado por clorofila P700; estos tres procesos generan flujo de electrones. Los electrones liberados por la fotólisis son tomados por una serie de sustancias transportadoras de electrones que son en su orden, la quinona, la plastoquinona, el citocromo y la plastocianina que es la encargada de entregar los electrones que lleva al fotosistema II (FSII en la fig. 7) para rellenar los espacios dejados por los que salieron de allí a raíz de la fotoexcitación, éstos también son llevados al fotosistema I (FSI) por sustancias transportadoras para llevar vacíos. Los electrones que salen de FSI son tomados por una sustancia reductora de la ferredoxina y de allí se pasan a la ferredoxina; en este punto algunos electrones serán capturados por la NADP que se convertirá en NADPH (difosfonucleótido de adenosina reducida), sustancia que será utilizada en la fase oscura de la fotosíntesis; otros de los electrones que porta la ferredoxina pasarán a los citocromos y al pasar por allí el ADP atrapará muchos de ellos para formar ATP el cual será utilizado también en la fase oscura.

En resumen, los productos finales de la fase lumínica son el ATP y la NADPH.

La fase oscura se inicia con una pentosa llamada ribulosa 1,5 difosfato, que con la adición de  $H_2O$  y  $CO_2$  y en presencia de una enzima, la ribulosa 1,5 difosfato carboxilasa será transformado en un compuesto hexacarbonado transitorio ya que posteriormente se partirá en dos secciones de 3 átomos de carbono cada una llamadas 3, fosfoglicerato, allí interviene el ATP, adicionando un átomo de fósforo y formando la 1,3 difosfoglicerato, reacción catalizada por la enzima fosfoglicerato quinasa; en el siguiente paso aparece el NADPH, formado en la fase lumínica, para adicionar átomos de hidrógeno y originar el compuesto 3, fosfoglicerato con la pérdida de un átomo de fósforo y bajo la acción de la enzima 3, fosfogliceraldehido deshidrogenasa. El 3, fosfogliceraldehido sufre una serie de reacciones complejas en las cuales hay dos caminos a tomar; por un lado pierde un átomo de carbono y recibe otro átomo de fósforo de la molécula de ATP, para formar el ribulosa 5 fosfato en primera instancia y luego la ribulosa 1,5 difosfato, reacción catalizada por la fosforribulosa quinasa, por

C  
L  
O  
R  
O  
P  
L  
A  
S  
T  
O

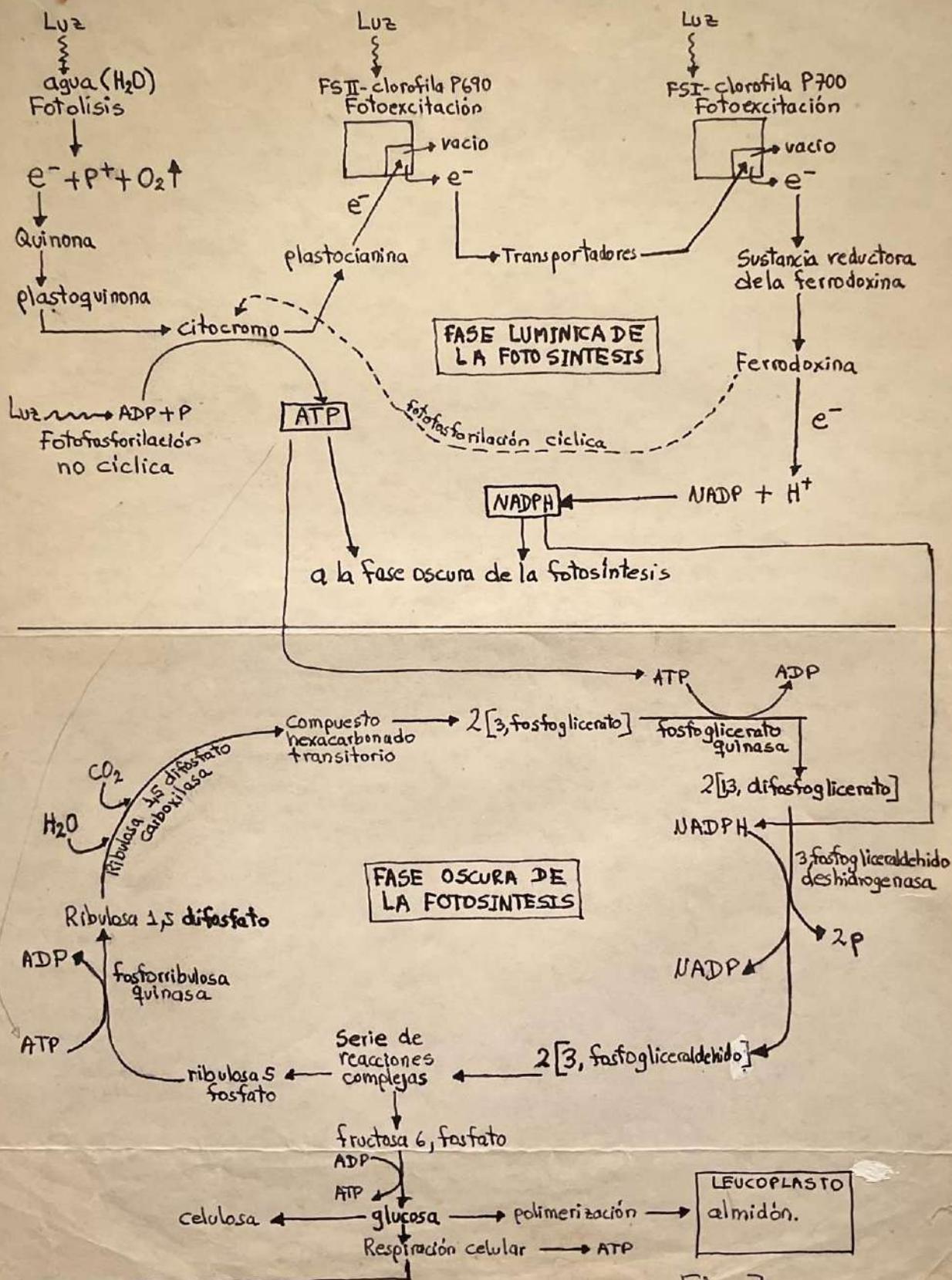
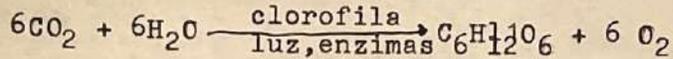


Fig. 7

el otro se transforma en la fructosa 6, fosfato, a la cual le es extraído el fósforo por acción de ADP que se convierte a su vez en ATP y formar en última instancia la glucosa.  
 Todo el proceso de fotosíntesis ha sido resumido en la siguiente ecuación:



La glucosa que se produce al final de todo el proceso puede tomar varios caminos, puede sufrir una serie de reacciones mediante las cuales se le adiciona más hidrógeno y formar los ácidos grasos y la glicerina, que catalizados por la enzima lipasa serán fusionados para originar las grasas y en general los lípidos; otras moléculas de glucosa reaccionarán con los nitratos para formar aminoácidos y de allí proteínas; pero la mayor parte serán utilizadas en el proceso de respiración para la producción de energía. Las que no van a ser utilizadas sufriran un proceso de polimerización para formar celulosa y celobiosa y ser almacenadas en el exterior de la membrana plasmática y formar allí la pared celular, o ser almacenadas en forma de almidón en los leucoplastos, o ser almacenadas en forma de pigmentos como los carotenos en los cromoplastos

#### CONCLUSIONES

- 1- El proceso de fotosíntesis también produce energía.
- 2- Las sustancias transportadoras de electrones son fundamentales para la formación de compuestos tales como el ATP, el ANADPH y la glucosa.
- 3- No podemos reducir los procesos de fotosíntesis y respiración a simples ecuaciones químicas.
- 4- Fotosíntesis y respiración son dos procesos que se retroalimentan mutuamente.

#### BIBLIOGRAFIA SUGERIDA

- 1- Avers, Charlotte. Biología celular. Segunda edición, 1.981. Grupo Editorial Iberoamericano.
- 2- Burke, Jack. Biología celular. Primera edición. México, nueva editorial Interamericana. 1.970
- 3- Kimball, John. Biología. Cuarta edición 1.982. Grupo editorial Iberoamericano.
- 4- Margilis, Lynn. El origen de la célula. Barcelona España, 1.988, Editorial Reverté, S.A.
- 5- Medrano Hipólito, Andreu Pol y Esteban Delgado. ¿es posible mejorar la eficacia fotosintética de las plantas?. Mundo Científico No. 84 Volumen 8 página 996-1003.
- 6- De Robertis, E.D.P.; Francisco Saenz y E.M.F. De Robertis,. Biología celular. Décima edición. Buenos aires. Ateneo, 1.978.
- 7- Uribe, Uribe, Lorenzo. Botánica. Editorial Voluntad 16. edición, mayo de 1.971.
- 8- Hill, Ben y otros. Tratado de Botánica. Segunda edición. Barcelona, 1.967. Ediciones Omega.
- 9- Villee, Claude. Biología. Séptima edición, 1.984. México. Nueva editorial Interamericana.
- 10- Weisz, Paul. Biología. Quinta edición. Barcelona. Omega 1.968.