

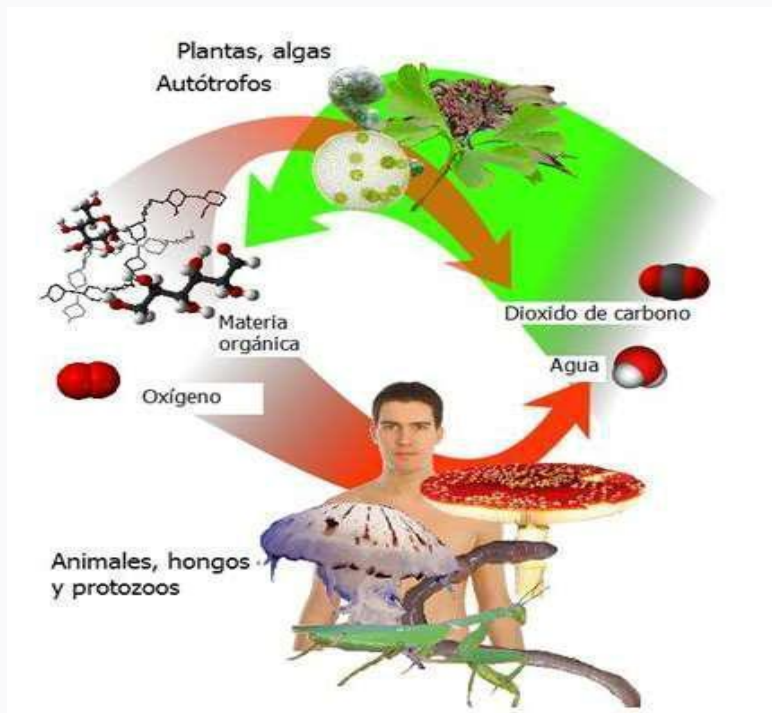
UNIDAD 2. FUNDAMENTOS METABOLICOS DE LOS MICROORGANISMOS

4. Principios de nutrición y química celular.

Cuenca (2016) destaca aspectos relevantes que se enfocan en la nutrición celular y la división de estos (nutrición autótrofa y heterótrofa), además menciona que aquellos procesos que requieren de energía y obtención de materia por parte de la célula para cumplir con sus funciones de vida y fabricar el material de la célula reciben la denominación de nutrición celular; a través de ella cada una de las células obtienen la energía que necesitan para desarrollarse y dividirse.

Figura 6

Nutrición de la célula



Fuente: Cabello, 2015.

Los procesos de nutrición se enfocan en 3 objetivos principales:

- ✓ Brindar energía.
- ✓ Brindar materiales de construcción para la síntesis y renovación de las estructuras orgánicas propias
- ✓ Brindar reguladores, sustancias que permitan que los procesos químicos sean regulados.

La nutrición de la célula requiere de los siguientes tipos de procesos:

1. Sustancia agregada del medio extracelular.
2. Uso químico de nutrientes a nivel metabólico
3. Evacuación de desechos al medio externo

4.1. Clasificación nutricional.

Debido a los nutrientes incorporados por la célula se conocen dos tipos de nutrición:

4.1.1. Fundamentos y mecanismos de la nutrición autótrofa

Se caracteriza por la agilidad que presentan los microorganismos para producir y sintetizar sustancias que son necesarias para realizar sus procesos metabólicos y nutritivo mediante sustancias inorgánicas.

4.1.1.1. Modo de acción de fotosintetizadores autótrofos

En el caso de algunos tipos de bacterias (bacterias verdes y púrpuras) y las plantas, la energía proviene de la luz del sol.

4.1.1.2. Modo de acción de quimiosintéticos autótrofos

La energía proviene de las reacciones oxidativas de tipo exotérmico como es el caso de bacterias nitrificantes, ferro bacterias, sulfo-bacterias.

4.1.2. Fundamentos y mecanismos de la Nutrición heterótrofa

Este tipo de nutrición figura a los organismos que adjuntan materia orgánica construida por otro organismo; dentro de los organismos heterótrofos se encuentran gran número de bacterias, animales, protozoos y hongos. Los microorganismos heterótrofos contienen dos formas esenciales en cuanto a la naturaleza energética:

4.1.2.1. Fotoheterótrofos

Son aquellos organismos que tienen como única fuente de energía la luz y mediante ella generan ATP y al mismo tiempo mediante otros organismos adquieren compuestos orgánicos como fuente carbónica; dentro de ellas se destaca *Rhodobacter* como bacteria no sulfurosa purpura

4.1.2.2. Quimioheterótrofos

La energía es adquirida mediante la ingesta de fuentes orgánicas de energía preformadas, las cuales llevan una síntesis por otros organismos, dentro de esta preformación están los lípidos, proteínas y carbohidratos. Dentro de este grupo se encuentran los *Lactobacillus*.

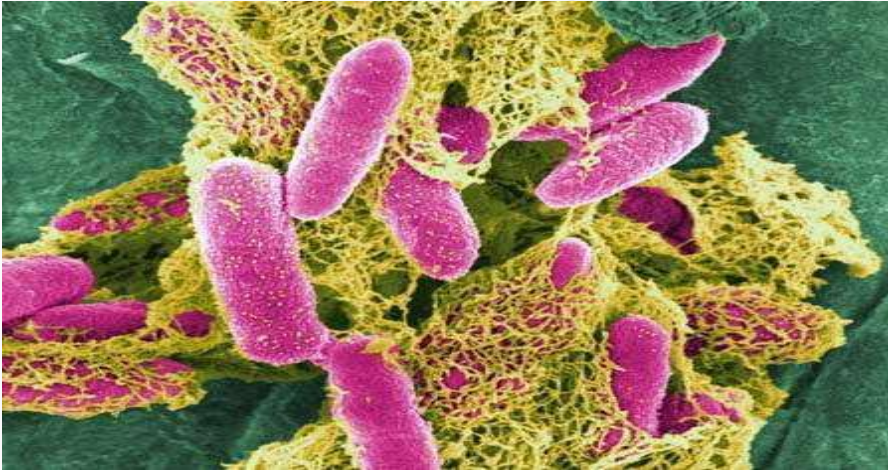
4.2. Nutrición bacteriana

Según lo mencionado por Montenegro (2015) esta nutrición realiza mediante la adquisición de sustancias químicas del ambiente en el que se encuentran por parte de las bacterias y de esta manera se ejerce el proceso de desarrollo de las mismas y se llevan a cabo dos fines:

- ✓ Finalidad catabólica energética
- ✓ Finalidad anabólica biosintética

Figura 7

Nutrición de las bacterias



Fuente: García, 2014.

4.2.1. Requerimientos nutricionales necesarios para la célula bacteriana

El mundo de las bacterias muestra una inmensa variedad de adaptabilidad metabólica cuando se trata de utilizar nutrientes. Esto incluye a los autótrofos, que obtienen su carbono de fuentes inorgánicas como el CO₂, así como a los heterótrofos que pueden utilizar una amplia gama de fuentes de carbono orgánico. En esencia, según los tipos de organismos, se requieren de nutrientes específicos que varían en cuanto al tipo y cantidad; de acuerdo a lo mencionado por Montenegro, (2015) algunos nutrientes conocidos como macronutrientes, son necesarios en cantidades significativas, mientras que otros se solicitan en cantidades mínimas, los cuales se denominan micronutrientes

Agua: El agua es importante para el crecimiento y desarrollo de las bacterias, ya que requieren cantidades importantes de ella. De hecho, muchas bacterias prosperan en ambientes con un nivel específico de humedad. Al considerar las funciones potenciales

del agua, no se puede pasar por alto su papel al proporcionar las condiciones necesarias para el crecimiento bacteriano, en este orden su papel es:

- El componente principal del protoplasto bacteriano.
- El entorno global en el que tienen lugar las reacciones biológicas.
- Una reacción bioquímica puede producir un excedente de reactivo, que luego se convierte en un producto.

Dentro de las fuentes de agua se encuentra:

- Endógeno se refiere a procesos que surgen de reacciones de oxidación-reducción.
- Exógeno se refiere a sustancias que se originan en el medio circundante y tienen la capacidad de atravesar las membranas.

4.2.1.1. Macronutrientes y micronutrientes

4.2.1.1.1. Macronutrientes

Carbono: Constituye el esqueleto de los carbohidratos, lípidos y proteínas, catalogados principalmente como los tres nutrientes más importantes, siendo fundamentales para los microorganismos y su dependencia del carbono. Estos compuestos son vitales tanto para la producción de energía como para los procesos estructurales de la célula

Nitrógeno: todos los agentes microbianos necesitan nitrógeno. El nitrógeno entra a formar parte de ácidos nucleicos, proteínas mediante una metabolización, haciendo parte también de polímeros de la pared celular. Los microorganismos pueden usar distintas fuentes de nitrógeno, entre ella se destaca N_2 atmosférico, nitratos, nitritos o sales de amonio, quienes utilizan compuestos inorgánicos, mientras que otros requieren de aminoácidos o péptidos catalogados como compuestos nitrogenados orgánicos

Hidrógeno y Oxígeno: Los dos son componentes importantes que hacen parte de un número considerable de compuestos orgánicos y están presentes en el agua (H₂O) como en diversos nutrientes; de la misma manera, en la atmósfera estos elementos presentan un rol importante, especialmente el oxígeno molecular (O₂) utilizado como aceptor final de electrones de la respiración aeróbica.

4.2.1.1.2. Micronutrientes

Fósforo: Es denominado un micronutriente que forman parte de polímeros a nivel de pared celular y fosfolípidos, además son necesario en el proceso de síntesis de ácidos nucleicos y ATP.

Potasio: Su funcionalidad es como las coenzimas y posiblemente desempeña un papel como catión en algunas estructuras aniónicas celulares y en estructuras de RNA

Azufre: Es un componente clave en coenzimas A, ferredoxina y biotina; además, es crucial para el proceso biosintético de cisteína, cistina, metionina, aminoácidos.

Magnesio: Es utilizado como un cofactor de reacciones bajo la acción del ATP, generado por enzimas.

4.3. Donares y aceptores de electrones

En todas las bacterias y células en general, se llevan a cabo procesos bioquímicos dentro de ellas que implican un constante intercambio de electrones, en este proceso de intercambio participan 2 sustancias diferentes, Por un lado se encuentran las donadoras de electrones y por otro los aceptores de los electrones ya mencionados, este intercambio se presenta recurrentemente en la respiración de la celular, de forma particular en la etapa transportadora de electrones alrededor de la cadena transportadora. En esta fase, el donante de electrones experimenta un proceso de oxidación y el aceptor de electrones se enfrenta a un proceso de reducción (Cardellá, 2007).

4.4. Clasificación microbiana según sus fuentes de carbono y energía

Según Montenegro (2015) los requerimientos de carbono de las bacterias permiten clasificarlas en dos grupos principales. Un grupo está formado por bacterias litotróficas o autótrofas, mientras que el otro grupo está formado por bacterias organotróficas o heterótrofas. La generación de energía en las bacterias está estrechamente relacionada con las relaciones entre las fuentes de energía, las fuentes de carbono y los donantes de electrones. Teniendo en cuenta lo anterior, las fuentes de carbono y energía obtenidas por las bacterias se clasifican en:

- a) Cuando se considera el suministro de energía, existen dos tipos de organismos: los **litotrofos**, que únicamente necesitan sustancias inorgánicas básicas, y los **organotrofos**, que dependen de compuestos orgánicos.

- b) En términos de biosíntesis:

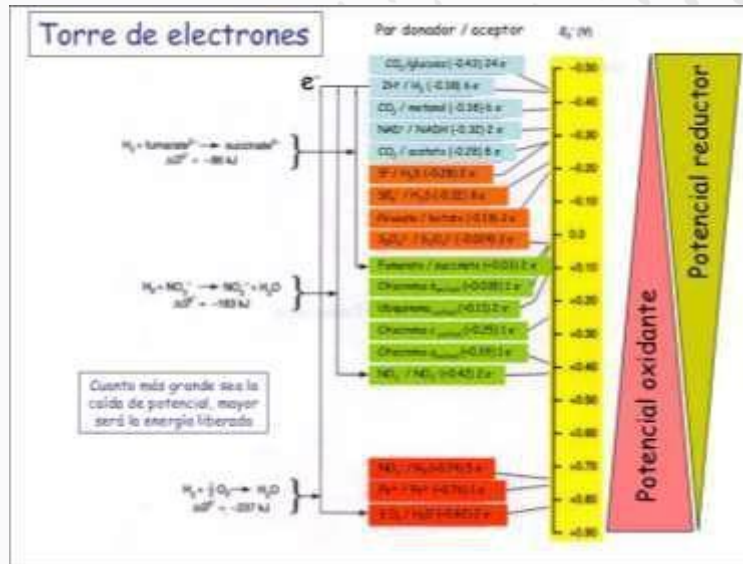
- c)
 - Los autótrofos tienen la capacidad de crear sus propios compuestos utilizando elementos inorgánicos básicos.
 - Los heterótrofos, por otro lado, dependen de fuentes orgánicas para satisfacer sus necesidades de carbono.
 - Los autótrofos estrictos son bacterias que no pueden utilizar la materia orgánica como fuente de carbono para su crecimiento.
 - Los mixótrofos son bacterias que obtienen energía del metabolismo litotrófico pero dependen de sustancias orgánicas para su metabolismo biosintético.

4.5. Torre de electrones

Esta torre, representada en la figura 8 como una estructura vertical es una herramienta visual que facilita la comprensión de la transferencia de electrones que se realiza en los sistemas biológicos. Esta estructura organiza en escala los pares redox desde los más

negativos ubicados en la parte superior, hasta los más positivos situados en la parte inferior. Las sustancias reducidas en la parte de arriba tienden a donar electrones, en cambio, quienes aceptan los electrones son las sustancias que se oxidan, las cuales se encuentran ubicadas abajo (Rivas, 2015).

Figura 8
Torre de electrones



Fuente: Hoyos, 2012

4.6. Compuestos de alto rendimiento energético

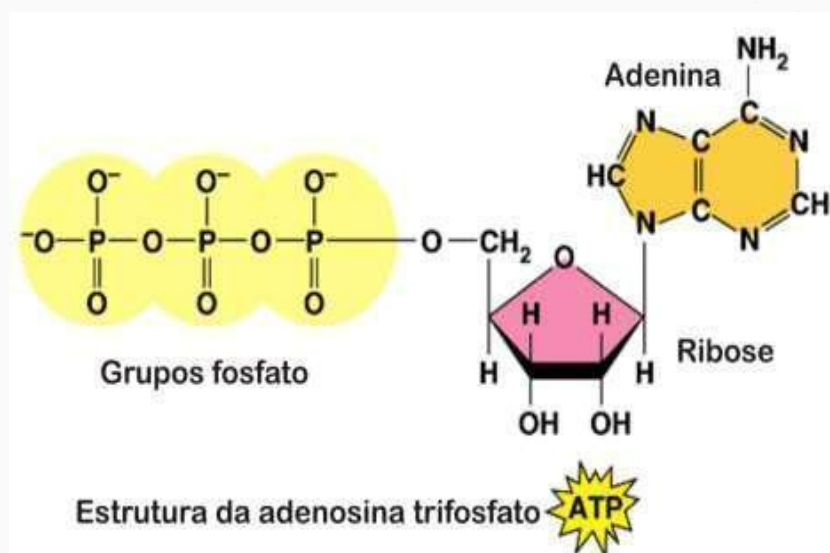
Según Serna (2009), los compuestos que se clasifican como de alta energía poseen uno o más enlaces químicos que liberan cantidades importantes de energía durante el catabolismo. Estos enlaces se denominan de alta energía porque retienen más energía en comparación con los enlaces estándar y se forman principalmente entre residuos de ácido fosfórico y diversos compuestos orgánicos. En estos fosfatos macroenergéticos el fósforo es siempre un componente.

El trifosfato de adenosina (ATP) es un compuesto energético crucial que suministra directamente energía para todas las reacciones celulares que la necesitan. Las células generan este compuesto utilizando nutrientes derivados tanto de plantas como de

animales. Durante el catabolismo, el ATP se descompone en ADP (difosfato de adenosina), liberando energía esencial para diversas funciones corporales críticas, incluida la digestión, la síntesis de compuestos químicos, la reparación de tejidos y la circulación.

A través del desdoblamiento de los nutrientes provenientes de los alimentos, se forma ATP mediante la reacción de ADP con una molécula de fósforo que se encuentre libre. Mediante los hidratos de carbono, grasas y proteínas se lleva a cabo la síntesis de ATP, ya que la energía que es absorbida por el ADP se libera mediado por una descomposición tal como se observa en la figura 9, enlazada con la molécula de fósforo que se encuentre libre.

Figura 9
Trifosfato de adenosina



Fuente: Moreno, 2015.

4.7. Fuerza protón motriz

En 1961, Peter Mitchell (citado por Berg et al., 2007) introdujo la hipótesis quimiosmótica, sugiriendo que la síntesis de ATP y el transporte de electrones se producen a través de un gradiente de protones a través de la membrana mitocondrial interna. El movimiento de electrones a través de la cadena respiratoria da como resultado el bombeo de protones desde el lado de la matriz hacia el lado citoplasmático de la membrana mitocondrial interna. Como consecuencia, los niveles de H⁺ disminuyen en

la matriz, generando un campo eléctrico negativo en ese lado. Para restablecer el equilibrio, los protones regresan y, según Mitchell, este flujo de protones facilita la síntesis de ATP. Esta distribución desigual y rica en energía de los protones se denomina fuerza motriz del protón.

4.8. Respiración

4.8.1. Mecanismos de respiración celular

El proceso de respiración de la célula se describe como un proceso metabólico o de combustión, donde las moléculas con alto contenido energético se descomponen en moléculas mucho más simples, durante este proceso de degradación, se libera la energía almacenada dentro de las moléculas. Generalmente, la respiración celular se categoriza en dos tipos: aeróbica, que ocurre en presencia de oxígeno, y anaeróbica, que ocurre en ausencia de oxígeno.

4.8.1.1. Respiración aerobia

“Proceso por el cual se oxida un compuesto usando O_2 como aceptor de electrones” tal como se visualiza en la figura 10, (Bastardo y Pedrique, 2008).

Figura 10

Respiración aerobia

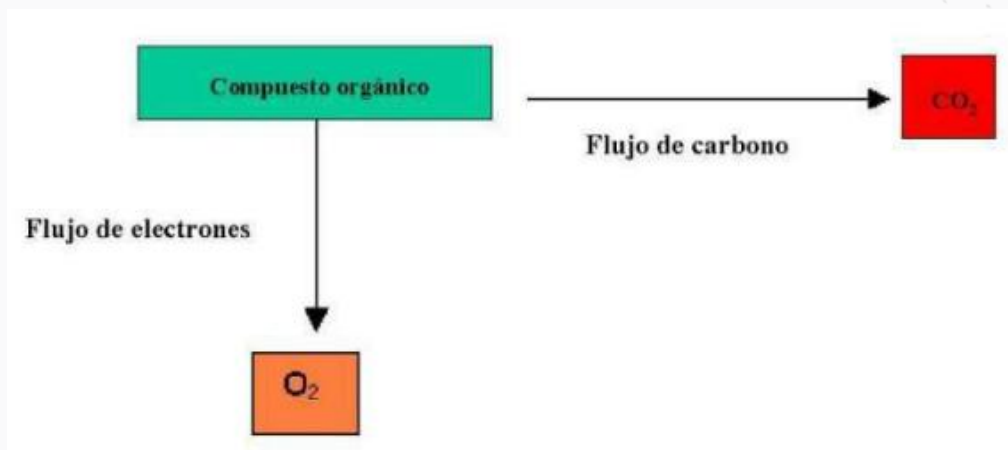


Fuente: Bastardo y Pedrique, 2008.

4.8.1.2. Respiración anaerobia

Esta forma de respiración celular se limita a organismos procarióticos específicos, como bacterias o arqueas, particularmente aquellos que prosperan en ambientes con oxígeno mínimo o nulo. A diferencia de la respiración aeróbica, que necesita oxígeno para la descomposición de las moléculas de azúcar, como se ilustra en la figura 11, la respiración anaeróbica utiliza diferentes elementos químicos o incluso compuestos orgánicos más complejos a través de una cadena de transporte de electrones. Es importante distinguir este proceso de la fermentación, ya que en esta última no interviene la cadena de transporte de electrones. Sin embargo, tanto la respiración anaeróbica como la fermentación comparten la característica de ocurrir sin presencia de oxígeno (Raffino, 2020).

Figura 11. Respiración Anaerobia.



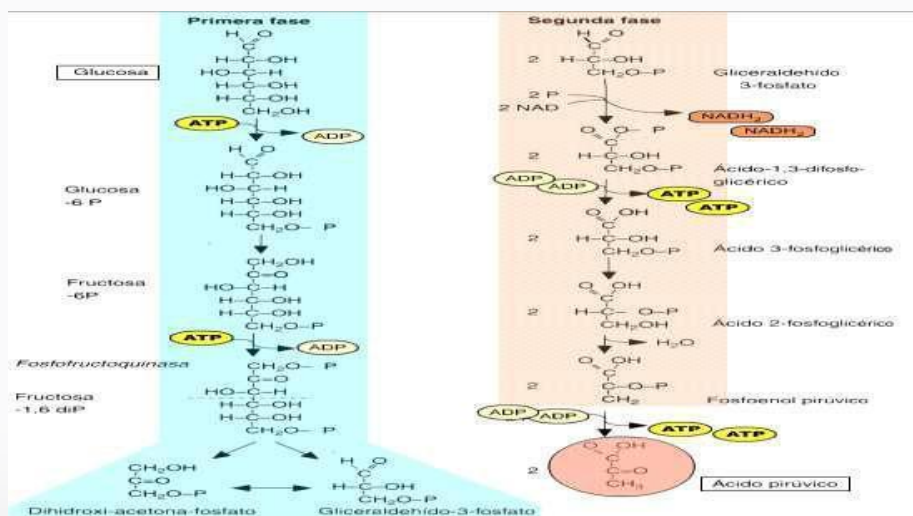
Fuente: Bastardo y Pedrique (2008).

4.9. Proceso de la Glucólisis

Según lo mencionado por Ángeles (2012) el ATP es uno de los transportadores más importantes de energía encaminado hacia los ciclos de vida producida por la glucólisis, como se visualiza en la figura 12, constituyendo una vía que se enfoca en las fases metabólicas que realizan gran número de organismos vivos. La combustión de la glucosa requiere de un ambiente aeróbico, sin embargo, algunas células deben sobrevivir en ambientes donde el oxígeno es escaso o no está continuamente disponible. Según

argumentos sólidos, se sugiere que las primeras células en aparecer en la tierra evolucionaron en una atmósfera sin la presencia de este gas. En consecuencia, tuvieron que encontrar la forma para extraer y encontrar energía de fuentes de combustibles sin ser dependientes del oxígeno. De igual manera, actualmente las células mantienen la capacidad enzimática para realizar la glucólisis, catabolizando la glucosa sin necesidad de oxígeno, en un proceso denominado como la ruptura anaeróbica de la glucosa. Un claro ejemplo es la fermentación alcohólica para la producción de Etanol (Alcohol etílico) y bióxido de carbono, mediante la glucólisis, las células de levadura en una botella de champaña taponada obtienen energía en la ausencia de oxígeno y se mantienen con vida. La glucólisis es utilizada por las células musculares que tienen sobrecarga para cubrir sus necesidades de energía, llevando a cabo un proceso de fermentación láctica para generar ácido láctico. No obstante, estas células en su mayoría tienen la capacidad de utilizar oxígeno para degradar la glucosa. De esta manera, los resultados finales son los que se dan al combustionar o quemar la glucosa en lugar de llevar a cabo su proceso de fermentación, al igual que la producción de CO₂ y H₂O. Teniendo en cuenta la ruptura anaeróbica de la glucosa, se requiere de una serie de once reacciones enzimáticas que se encuentran catalizadas secuencialmente, las cuales son llevadas a cabo en el citosol y se requiere de ATP y NAD como reguladores.

Figura 12 *Glucolisis*



Fuente: Gonzales y Raisman, 2005.

4.9.1. Vías metabólicas alternas para generar energía

En la composición de los alimentos, predominan hidratos de carbono, grasas y proteínas, las cuales son combinaciones de compuestos químicos y cada uno es sometido a procesos metabólicos que se conectan con el ciclo de Krebs, centrado en el metabolismo celular. Por ejemplo, los polisacáridos se desintegran en monosacáridos y luego se fosforila para formar glucosa-6-fosfato, siendo este un paso inicial en la vía celulítica; dentro de los polisacáridos principales se destaca el almidón. Mientras tanto, las grasas se descomponen inicialmente en ácidos grasos y glicerol. En el proceso conocido como oxidación, tanto en las mitocondrias como en los peroxisomas, los ácidos grasos son descompuestos en moléculas de dos carbonos; estas moléculas ingresan al ciclo de Krebs como acetil-CoA. Paralelamente, las proteínas pasan por un proceso de desintegración en sus aminoácidos constituyentes, quienes luego experimentan la diseminación. El esqueleto restante de carbono se convierte en uno de los compuestos del ciclo de Krebs de la vía celulítica y también se puede transformar en un grupo acetil, facilitando su posterior procesamiento en esta fase central del metabolismo. Por otra parte, los grupos aminos son eventualmente excretados como compuestos nitrogenados, si no son reciclados y la mayor parte de los procesos catabólicos es constituida por un conjunto de vías encargadas de los procesos de degradación.

4.9.1.1. Vía metabólica de Entner-Doudoroff.

Esta vía metabólica sirve como una ruta alternativa donde la glucosa se descompone en piruvato mediante una secuencia de reacciones enzimáticas distintas de las vías de la glucólisis y de las pentosas fosfato. Representa el método principal de catabolismo de la glucosa para microorganismos aeróbicos obligados que no poseen fosfofructocinasa, lo que los hace incapaces de producir fructosa-1,6-bifosfato. Los microorganismos notables que utilizan esta vía incluyen: *Azotobacter sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Neisseria sp.*, *Rhizobium sp.*, y *Agrobacterium sp.*

4.9.1.2. Vía de las pentosas fosfato o vía de las pentosas Deshunt

Conocida como vía del fosfogluconato, esta ruta metabólica está asociada con la glucólisis y utiliza glucosa para generar ribosa, que es esencial para la síntesis de nucleótidos y ácidos nucleicos. Además, es importante reconocer que esta vía no sólo aprovecha la glucosa para obtener energía, sino que también emplea la fermentación de hexosas, pentosas y varios carbohidratos. En ciertos microorganismos, por ejemplo, en los fermentadores heterolácticos, esta vía sirve como fuente de energía primaria; no obstante, su uso primordial se enfoca en generar NADPH en la mayoría de los microorganismos, brindando el poder de reducción para las reacciones que se producen de manera biosintética. La vía pentosa se comprende en el citosol celular y se clasifica en las siguientes fases:

Fase oxidativa: el NADPH es generado

Fase no oxidativa: pentosas-fosfato y otros monosacáridos- fosfato pasan a ser sintetizados

4.10. Proceso metabólico del ciclo de los ácidos tricarboxílicos o ciclo de Krebs

En el libro de la autoría de Cardellá (2007) se define el ciclo de Krebs, abarcando un campo general desde su función mínima, hasta sus reacciones más complejas. Este ciclo es metabólico dando inicio por uno de los últimos productos en glúcidos, aminoácidos y lípidos, aminoácidos este producto final es el acetyl-CoA. Este sustrato es el responsable de la liberando energía que se captura en cofactores reducidos (1 FADH₂ y 3 NADH), además de 1 GTP y la producción de 2 moléculas de CO₂, resultado de la degradación del sustrato de manera gradual dentro del ciclo, como se observa en la figura 12. De la misma manera, es una ruta que tiene una relación con distintos procesos con metabolismo anabólico de proteínas, lípidos, glúcidos, porfirinas, ácidos nucleicos, etc., lo que la titula como vía o ruta central del metabolismo.

4.10.1. Fases y proceso claves del ciclo de Krebs.

Es una fase de catabolismo pues, el acetil-CoA, quien es el proveedor de alimentos se desintegra y produce 2 CO₂, en un compuesto un poco más pequeño, y sus H pasan a ser parte de los cofactores reducidos. También, se genera GTP, con una cantidad de energía igual a la del ATP

4.10.2. sitio de acción de los ácidos tricarboxílicos (ciclo de Krebs)

La mayoría de las enzimas necesarias para llevar a cabo este proceso metabólico tiene lugar específicamente en la matriz mitocondrial en donde ocurre el ciclo. Además, las mitocondrias también son responsable de otros procesos, lo que la señala como eje central y su localización asegura una máxima eficiencia conforme a los “principios de la máxima eficiencia” o de la bioquímica; dentro de las responsabilidades mitocondriales también hacen parte los procesos de respiración celular que, mediante la utilización de cofactores reducidos generado por el ciclo, complementan la cadena de respiración. A nivel histológico, el ciclo excluye los glóbulos rojos carentes de mitocondrias, es decir, que se presenta en todos los tejidos que poseen estas organelas celulares.

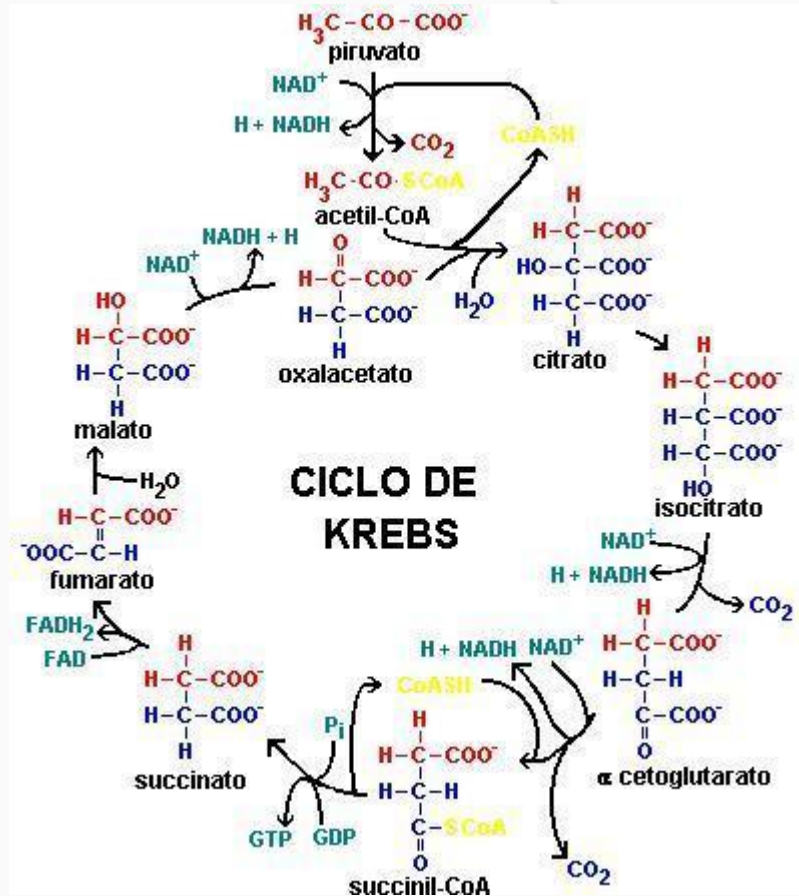
4.10.3. Descripción general de las etapas metabólicas de los ácidos tricarboxílicos

Consta de un número total de 8 reacciones, cada una de las cuales se cataliza por enzimas, como se ejemplifica en la figura 13. El proceso comienza con la entrada de acetil CoA (a), que se condensa con ácido oxalacético; una reacción esencial implica la formación de GTP mediante la fosforilación a nivel de sustrato. Esta vía es de naturaleza cíclica, ya que el ácido oxalacético, producido en el paso final, la reacción 8, vuelve a servir como sustrato para la reacción inicial. Si bien este ciclo es generalmente irreversible, ciertas reacciones dentro de él pueden revertirse. En el ciclo de Krebs, el grupo acetilo, bicarbonatado, unido a la CoA experimenta una oxidación secuencial, resultando en la producción de 2CO₂ en

cada ciclo; además, los factores de la vía incluyen la formación de un GTP y los cofactores reducidos (3NADH.H+ y 1FADH2).

Figura 13

Ciclo de los ácidos tricarbóxicos



Fuente: Gonzales, 2007.

4.10.4. Funcionalidad de los ácidos tricarbóxicos

Este ciclo cumple con dos funciones vitales. En primer lugar, generan cofactores reducidos que sirven como alimento por medio de sustratos para la cadena respiratoria y contribuyen en la generación de ATP. La fase número dos se lleva a cabo a partir de sus

intermediarios metabólicos, que establecen conexiones fundamentales con el metabolismo de material genético, proteínas, hemoproteínas, lípidos y glúcidos, todo esto mediante la sintetización de compuestos como los ácidos grasos, aminoácidos y grupos hemo; sin dejar de lado, la conexión estrecha que comparte con otros procesos celulares en la cadena respiratoria.

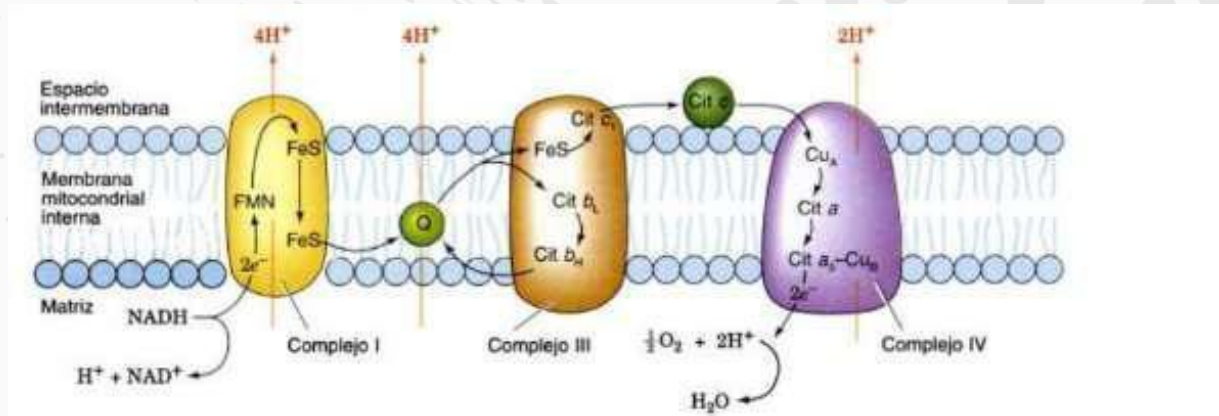
4.11. Cadena transportadora de electrones y fosforilación oxidativa

Según lo mencionado por Voet y Voet (2006), los electrones de alta energía están presentes en el NADH y FADH₂ generados durante la glucólisis, así como en la degradación de ácidos grasos y aminoácidos y en el ciclo del ácido cítrico. El proceso de fosforilación oxidativa implica la oxidación de estas moléculas, transfiriendo sus electrones al O₂, y la energía resultante utilizada para la síntesis de ATP, que ocurre dentro de las mitocondrias.

4.11.1. Cadena transportadora de electrones

Incrustado dentro de la membrana mitocondrial hay una colección de complejos enzimáticos que oxidan NADH y FADH₂, creando un gradiente de protones, como se observa en puede ver en la figura 14. Es importante señalar que la cadena de transporte de electrones mitocondrial está formada por varios transportadores electrónicos, predominantemente proteínas integrales de membrana, que poseen grupos protésicos que pueden aceptar o liberar uno o dos electrones. A medida que los electrones se mueven a través de estos complejos, los protones son bombeados al espacio intermembrana. Este bombeo de protones que se mueve por la cadena de transporte de electrones genera una fuerza motriz de protones, resultante de los efectos combinados de los potenciales químicos y eléctricos.

Figura 14
Cadena transportadora de electrones



Fuente: Voet y Voet, 2006.

En este proceso, se realizan 3 tipos de transferencias por parte de los transportadores:

1. Transferencia de electrones de forma directa (típicamente relacionada con metales)
2. Transferencia de átomo de H, donde se transfiere un protón (H⁺) junto con un electrón (e⁻) → H⁺ + e⁻
3. Transferencia de ion hidruro, formado por la acción de dos electrones (2e⁻) a protón (H⁺) → H⁻ (H⁺ + 2e⁻)

Las moléculas transportadoras de electrones son 5:

1. NAD⁺ y NADP⁺.
2. Flavoproteínas.
3. Ubiquinona.
4. Proteínas Ferro-sulfuradas
5. Citocromos

4.11.1.1 Complejos de la cadena de transporte

4.11.1.1.1. NADH deshidrogenasa o complejo I

NADH deshidrogenasa facilita la catalización acoplada de dos procesos de forma simultánea: la expulsión de un número de 4 protones de la matriz direccionada al espacio intermembrana y la transferencia de un protón e hidruros a la ubiquinona. Funciona como una bomba de protones que los desplaza hacia una dirección definida que es impulsada por la transferencia de electrones para catalizar una reacción vectorial. La transferencia de electrones en los centros Fe-S es bloqueada por los inhibidores de este complejo.

4.11.1.1.2. succinato deshidrogenasa o Complejo II

Es una proteína que está localizada en la cara interna de la membrana mitocondrial, orientada hacia la matriz, y participa en el ciclo del ácido tricarboxílico y es la única proteína periférica en esta fase del ciclo. Su función principal es transferir electrones del succinato a la ubiquinona (Q) utilizando una molécula de FAD, tres centros Fe-S y un citocromo b; Aunque los complejos NADH deshidrogenasa y succinato deshidrogenasa y funcionan de manera no secuencial, ambos tienen el objetivo común de transferir electrones del sustrato reductor a la ubiquinona.

4.11.1.1.3. ubiquinona-citocromo c oxido-reductasa o Complejo III

En el proceso determinado ciclo Q, esta proteína periférica tiene la facultad para transferir electrones desde ubiquinol (QH₂) hasta el citocromo C, mientras que simultáneamente tiene la tarea de transportar protones (H⁺) que van desde la matriz hasta el espacio de la intermembrana.

4.11.1.1.4. citocromo oxidasa O Complejo IV

Esta enzima facilita la transferencia de electrones del citocromo C al oxígeno molecular, resultando en la formación de agua. Durante esta fase, la enzima se gasta 4 protones (H^+) en la matriz para reducir el O_2 a H_2O ; también, utiliza la energía liberada en la reacción para bombear un protón (H^+) a cada espacio intermembrana, participando así en el transporte de electrones. Este mecanismo previene la generación de radicales de oxígeno al mantener el intermedio unido hasta su completa conversión a agua.