

1. INTRODUCCIÓN

Este tema aborda una de las características fundamentales de la vida: su incesante **necesidad de energía**. Las células, unidades básicas de los seres vivos, son sistemas termodinámicamente abiertos que requieren un flujo constante de energía para mantener su organización, sintetizar macromoléculas, realizar transporte activo y generar movimiento. En un universo regido por la segunda ley de la termodinámica, que dicta una tendencia natural hacia el desorden, la vida se opone a esta entropía mediante la inversión constante de energía para mantener su complejidad.

En este tema exploraremos los mecanismos esenciales que las células han desarrollado para captar y transformar la energía de su entorno. Comenzaremos analizando la **respiración celular**, un proceso catabólico fundamental para organismos heterótrofos, que estudiaremos en sus variantes **aerobia** y **anaerobia**, diferenciando sus rendimientos y sus contextos biológicos. Posteriormente, nos centraremos en los procesos anabólicos clave que actúan como "puertas de entrada" de energía en la biosfera: la **fotosíntesis**, principal vía de entrada de energía luminosa en la biosfera para los organismos autótrofos fotosintéticos, y la **quimiosíntesis**, una estrategia vital para ciertos microorganismos en ambientes quimio-litotróficos extremos. Profundizaremos en cada una de estas vías, destacando sus componentes moleculares clave y su impacto ecológico.

Este tema tiene una gran relevancia en el currículo de Biología y Geología, como se establece en los **Decretos 109/2022 y 110/2022** de Extremadura. Permite al alumnado comprender la interconexión de los ecosistemas, los ciclos biogeoquímicos (carbono, nitrógeno) y la base molecular de la vida, fomentando la **competencia científica** y el pensamiento crítico sobre la sostenibilidad energética y la adaptación de los seres vivos a diferentes nichos ecológicos.

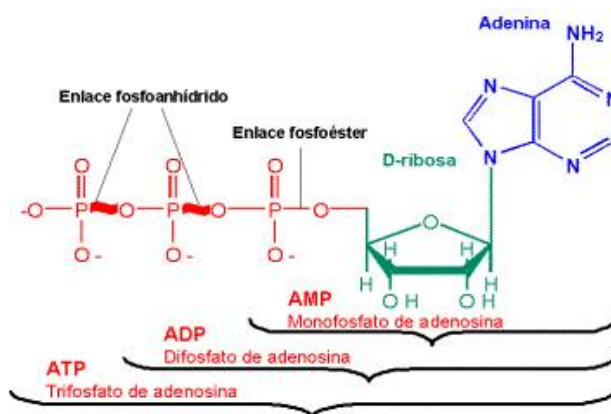
2. NECESIDADES ENERGÉTICAS DE LA CÉLULA

Las células son máquinas bioquímicas que necesitan un suministro constante de energía para realizar trabajo. Este trabajo incluye la síntesis de macromoléculas (anabolismo), el transporte activo de iones y moléculas a través de membranas, la generación de movimiento (motilidad celular) y el mantenimiento de la temperatura corporal. La energía para estos procesos se canaliza principalmente a través de una molécula universal: el **ATP (adenosín trifosfato)**.

- **ATP (Adenosín Trifosfato): La Moneda Energética Universal:**

El ATP es un nucleótido compuesto por una base nitrogenada (adenina), una pentosa

(ribosa) y tres grupos fosfato. Los enlaces entre los dos últimos grupos fosfato son enlaces fosfoanhídrido de alta energía. La hidrólisis de estos enlaces ($\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{P}_i$ o $\text{ADP} \rightarrow \text{AMP} + \text{P}_i$) libera una cantidad significativa de energía libre que puede ser utilizada para impulsar reacciones endergónicas. Este ciclo ATP-ADP es fundamental para el acoplamiento energético en la célula.



- **Metabolismo Celular: Catabolismo y Anabolismo:**

El conjunto de todas las reacciones químicas que ocurren en la célula se denomina metabolismo. Es un proceso altamente coordinado y regulado.

- **Catabolismo:** Son rutas de degradación. Moléculas orgánicas complejas (ej., glucosa, ácidos grasos) son oxidadas y descompuestas en moléculas más simples. Estas reacciones son **exergónicas** (liberan energía), parte de la cual se captura en forma de ATP y poder reductor (NADH , FADH_2).
- **Anabolismo:** Son rutas de síntesis. Moléculas simples (precursores) se combinan para construir moléculas complejas (proteínas, ácidos nucleicos, polisacáridos). Estas reacciones son **endergónicas** (requieren un aporte de energía), que generalmente proviene de la hidrólisis del ATP y del poder reductor generado en el catabolismo.

La vida se sostiene mediante este delicado equilibrio entre catabolismo (generación de energía) y anabolismo (uso de energía), siendo el ATP el puente molecular entre ambos.

3. LA RESPIRACIÓN CELULAR AEROBIA Y ANAEROBIA

La respiración celular es el principal proceso catabólico mediante el cual las células liberan la energía almacenada en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas, principalmente glucosa, para sintetizar ATP.

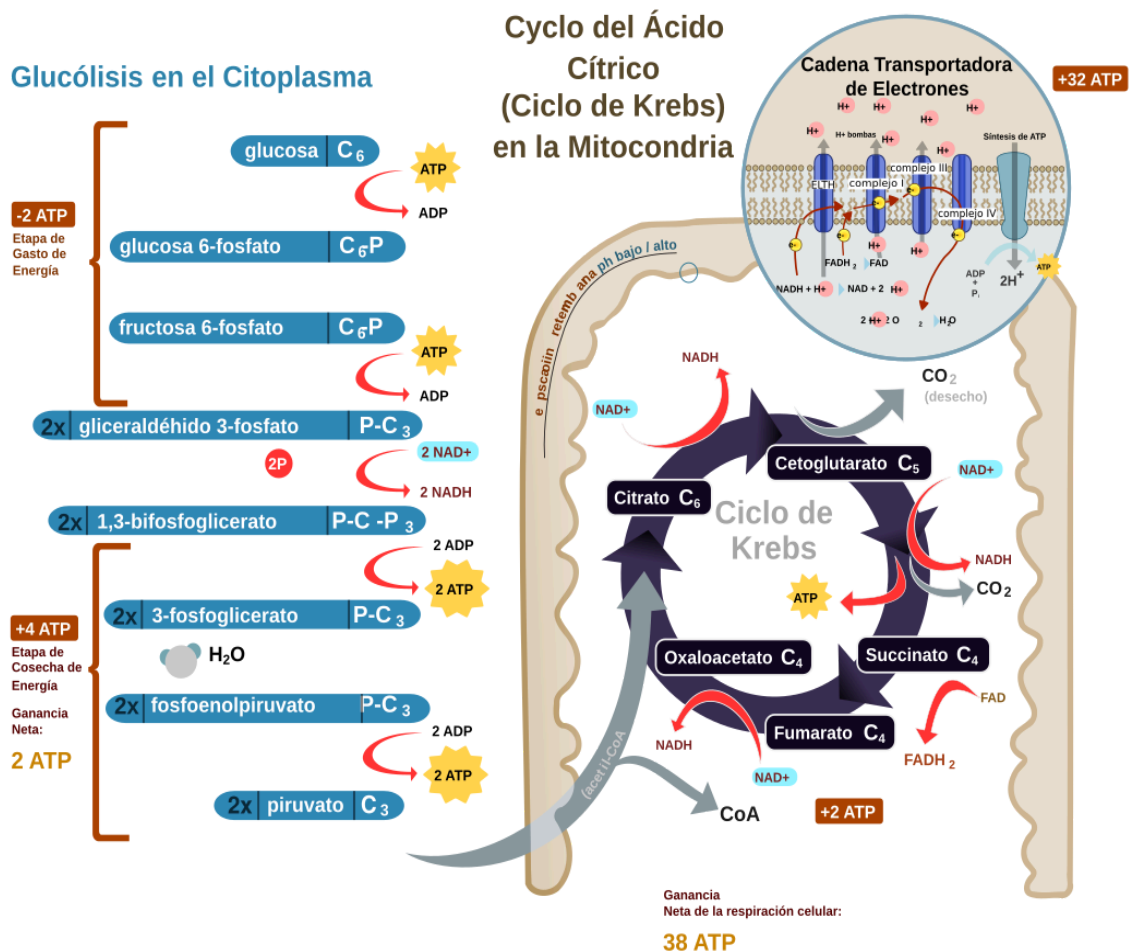
3.1. Respiración Celular Aerobia

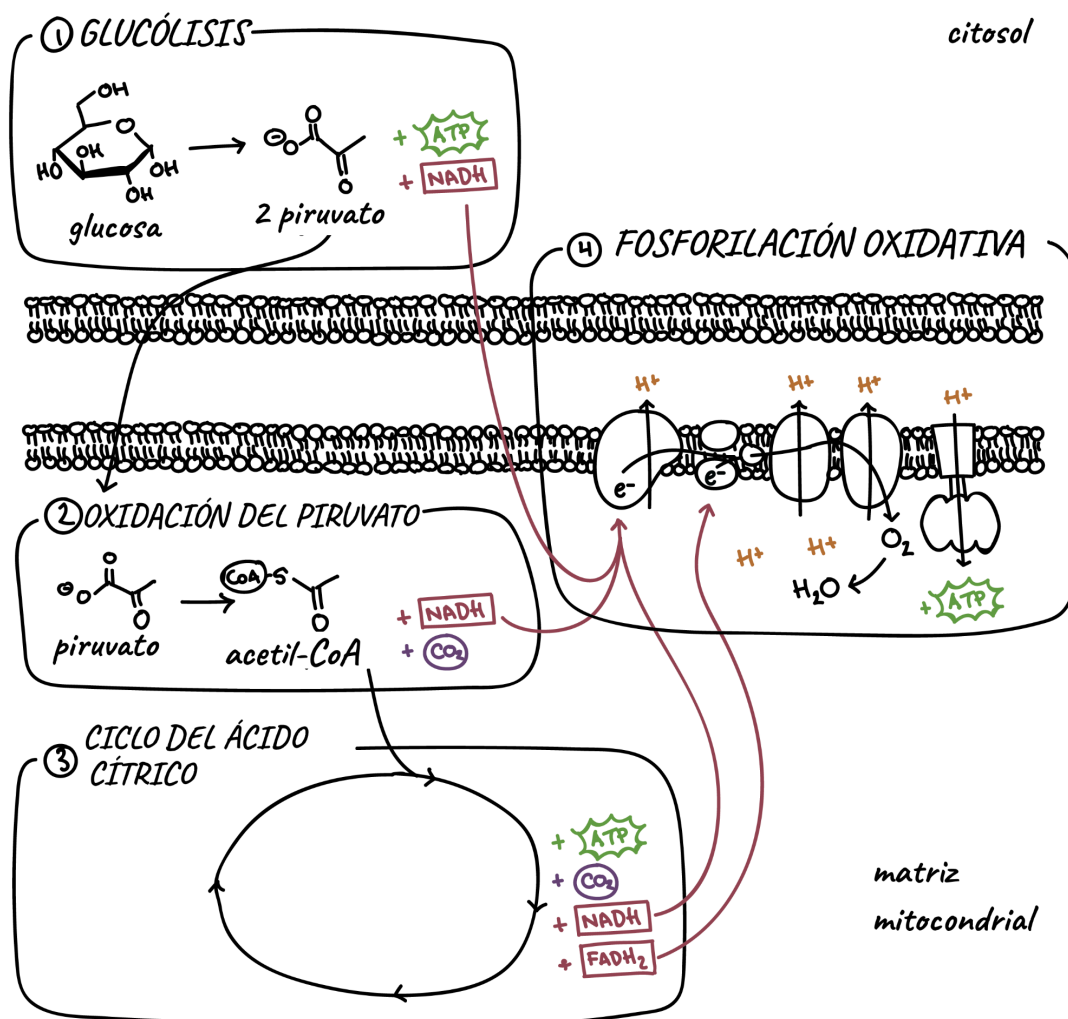
Es el proceso más eficiente de obtención de energía, ya que **requiere oxígeno (O₂)** como aceptor final de electrones. Ocurre en la mayoría de las células eucariotas (principalmente en las mitocondrias) y en muchas procariotas.

- **Balance general:** $\text{Glucosa} + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{Energía (38 ATP)}$
- **Etapas detalladas:**
 - **Glucólisis (Vía de Embden-Meyerhof-Parnas):**
 - **Localización:** Ocurre en el **citósol**.
 - **Descripción:** Es una ruta de 10 reacciones en las que una molécula de glucosa (6 carbonos) se oxida parcialmente y se escinde en dos moléculas de **piruvato** (3 carbonos). No requiere oxígeno.
 - **Productos netos por molécula de glucosa:** - **2 ATP** (por fosforilación a nivel de sustrato) y **2 NADH** (poder reductor).
 - **Oxidación del Piruvato (Formación de Acetil-CoA):**
 - **Localización:** En eucariotas, el piruvato (generado en el citósol) es transportado activamente a la **matriz mitocondrial**. En procariotas, en el citoplasma.
 - **Descripción:** Cada molécula de piruvato sufre una descarboxilación oxidativa, en la que pierde un grupo carboxilo en forma de CO₂ y se oxida. El grupo acetilo restante (2C) se une a la Coenzima A, formando **acetil-CoA**.
 - **Productos netos por glucosa:** **4 ATP**, **2 CO₂** y **2 NADH**.
 - **Ciclo de Krebs (Ciclo del Ácido Cítrico):**
 - **Localización:** Ocurre en la **matriz mitocondrial**.
 - **Descripción:** Es una ruta cíclica de 8 reacciones. El grupo acetilo del acetil-CoA se une al oxalacetato (4C) para formar citrato (6C). A lo largo del ciclo, el citrato se regenera en oxalacetato, liberando dos moléculas de CO₂ por cada grupo acetilo. Es el punto de convergencia metabólica de glúcidos, lípidos y proteínas.
 - **Productos netos por glucosa (dos vueltas del ciclo):** **2 ATP** (o 2 GTP, equivalentes), **6 NADH** y **2 FADH₂**.
 - **Fosforilación Oxidativa:**
 - **Localización:** Ocurre en la **membrana interna mitocondrial** (crestas mitocondriales), donde se encuentran los complejos de la cadena de transporte de electrones y la ATP sintasa.
 - **Descripción:**
 - **Cadena de Transporte de Electrones (CTE):** Los **NADH** y **FADH₂** (generados en las etapas anteriores) donan sus electrones de alta energía a una serie de complejos proteicos y transportadores (citocromos, coenzima Q)

embebidos en la membrana. A medida que los electrones se "mueven" por la cadena hacia el O_2 (el aceptor final), su energía se libera gradualmente.

- **Quimiósmosis:** La energía liberada por el transporte de electrones se utiliza para bombear protones (H^+) desde la matriz al espacio intermembrana, creando un **gradiente electroquímico de protones** (fuerza protón-motriz). Este gradiente representa una forma de energía potencial.
- **Síntesis de ATP:** Los protones fluyen de regreso a la matriz a favor de su gradiente, a través de la enzima **ATP sintasa**. El flujo de protones impulsa la rotación de un componente de la ATP sintasa, que cataliza la síntesis de grandes cantidades de **ATP** a partir de $ADP + P_i$. El **oxígeno** es finalmente reducido a agua al aceptar los electrones y protones.
- **Rendimiento:** Es la etapa que produce la mayor cantidad de ATP, aproximadamente **30-32 ATP** por glucosa, dependiendo de cómo se transporten los NADH citosólicos a la mitocondria.





3.2. Respiración Celular Anaerobia (Fermentación)

Es un proceso de obtención de energía en ausencia de oxígeno, mucho menos eficiente que la respiración aerobia. Ocurre completamente en el **citosol**. Aquí solo tiene lugar la glucólisis, y el piruvato se metaboliza de otras formas para regenerar el NAD⁺, que es necesario para que la glucólisis continúe.

- **Características:**

- **Localización:** Exclusivamente en el **citosol**.
- **Ausencia de O₂:** No hay cadena de transporte de electrones.
- **Aceptor final de electrones:** Una molécula orgánica (no el O₂).
- **Rendimiento energético:** Muy bajo, un neto de solo **2 ATP** por glucosa.

- **Tipos principales:**

- **Fermentación láctica:** El piruvato es reducido directamente a **lactato** (ácido láctico) por la enzima lactato deshidrogenasa, regenerando NAD⁺. Ocurre en el

músculo humano durante el ejercicio intenso (cuando no llega suficiente O₂) y en bacterias que producen yogur y queso.

- **Fermentación alcohólica:** El piruvato se descarboxila a acetaldehído, y éste se reduce a **etanol**, regenerando NAD⁺ y liberando **CO₂**. Realizada por levaduras y algunas bacterias, es crucial en la producción de pan, cerveza y vino.



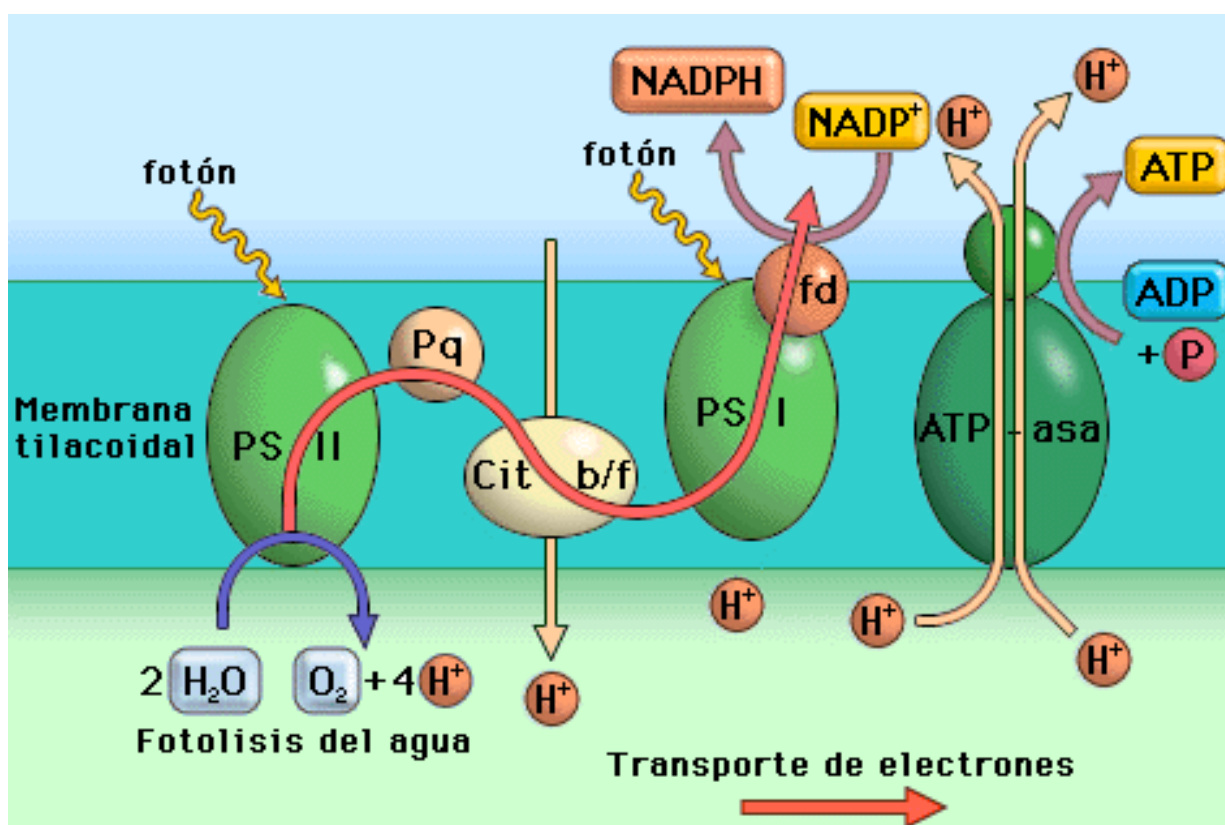
4. LA FOTOSÍNTESIS

Es el proceso anabólico por excelencia, mediante el cual los organismos autótrofos (plantas, algas y cianobacterias) transforman la energía luminosa en energía química, sintetizando compuestos orgánicos (principalmente glucosa) a partir de sustancias inorgánicas (CO₂ y H₂O). Es el principal motor de la vida en la Tierra.

- **Balance general:** $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{Energía lumínica} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$
- **Localización:** En eucariotas, ocurre en los **cloroplastos**. En procariotas fotosintéticos (ej., cianobacterias), en el citoplasma y en membranas tilacoidales internas.
- **Pigmentos Fotosintéticos:** Moléculas capaces de absorber la energía de la luz. Los principales son las **clorofilas** (verdes) y los **carotenoides** (amarillos, naranjas). Se organizan en complejos proteicos llamados **fotosistemas** (Fotosistema I y Fotosistema II).
- **Etapas:**

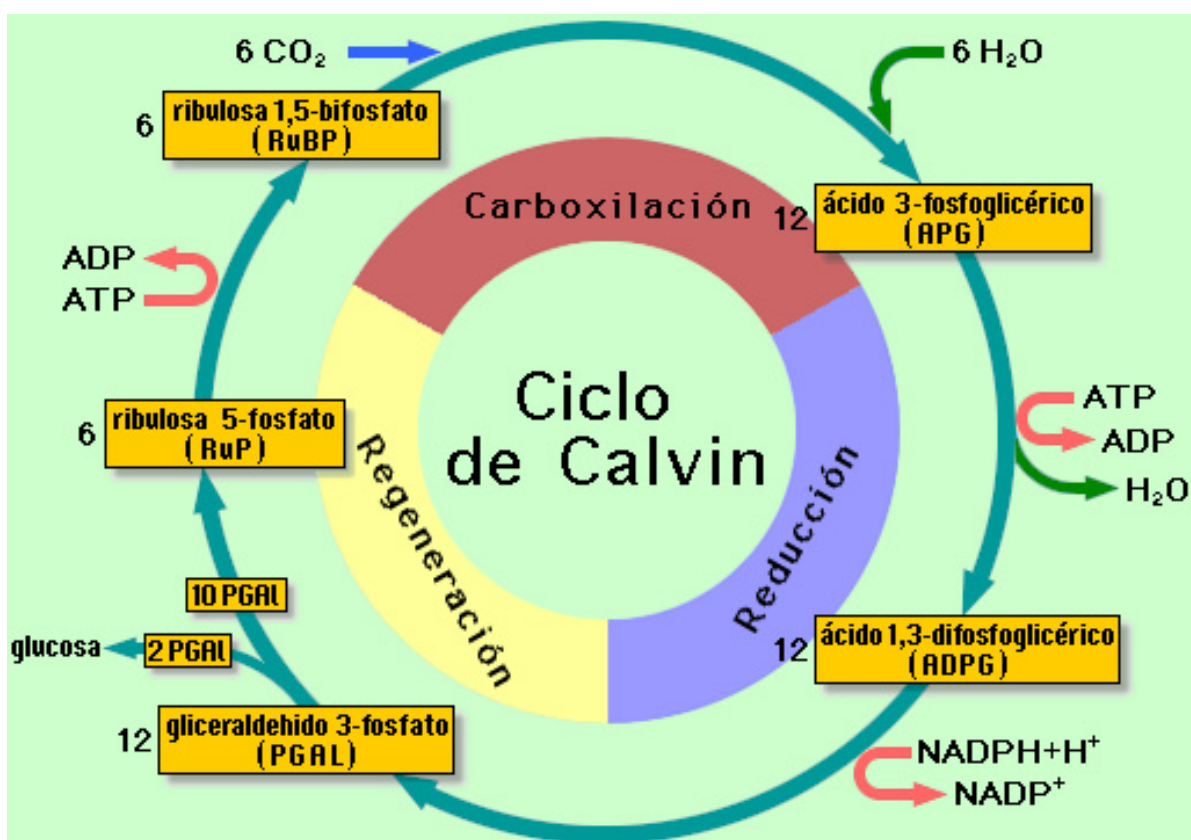
1. Fase Luminosa (o Fotoquímica):

- **Localización:** Ocurre en las **membranas de los tilacoides** de los cloroplastos.
- **Descripción:** La energía de la luz es captada por los pigmentos fotosintéticos de los fotosistemas. Los electrones excitados se transfieren a una cadena de transporte de electrones.
- **Fotólisis del agua:** En el Fotosistema II, el agua se escinde ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + 1/2\text{O}_2$), liberando **oxígeno (O₂)** a la atmósfera y reemplazando los electrones perdidos por la clorofila.
- **Transporte de electrones y fotofosforilación:** Los electrones se mueven por la cadena, liberando energía que se utiliza para bombear protones (H^+) desde el estroma hacia el lumen del tilacoide. Este gradiente de protones impulsa la síntesis de **ATP** por la ATP sintasa (fotofosforilación).
- **Reducción de NADP⁺:** Los electrones llegan al Fotosistema I y, tras ser reexcitados por la luz, son transferidos a la NADP⁺ reductasa, que reduce el NADP⁺ a **NADPH**.
- **Productos netos:** ATP, NADPH y O₂.



2. Fase Oscura (o Ciclo de Calvin-Benson):

- **Localización:** Ocurre en el **estroma del cloroplasto**.
- **Descripción:** No requiere luz directamente, pero utiliza el **ATP** (como fuente de energía) y el **NADPH** (como poder reductor) producidos en la fase luminosa.
- **Fijación del CO₂:** La enzima **RuBisCO** (ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa) cataliza la incorporación del **CO₂ atmosférico** a una molécula de ribulosa-1,5-bifosfato (RuBP).
- **Reducción y síntesis de glucosa:** Los compuestos resultantes son reducidos utilizando el ATP y el NADPH para sintetizar azúcares de tres carbonos (Gliceraldehído-3-fosfato, G3P). Parte de este G3P se utiliza para regenerar la RuBP, y otra parte se usa para sintetizar **glucosa** y otras moléculas orgánicas.
- **Productos netos:** **Glucosa** (u otros hidratos de carbono).



- **Importancia Ecológica:** La fotosíntesis es la base de las cadenas tróficas, transformando la energía solar en biomasa. Además, es la principal fuente de oxígeno en la atmósfera terrestre, esencial para la respiración aerobia.

5. LA QUIMIOSÍNTESIS

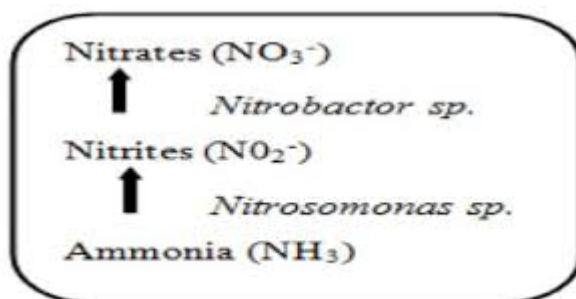
La quimiosíntesis es un proceso anabólico menos conocido pero ecológicamente crucial, realizado por un grupo específico de bacterias (quimioautótrofas) y arqueas. Estos organismos, a diferencia de los fotosintéticos, obtienen la energía necesaria para sintetizar materia orgánica no de la luz, sino de la **oxidación de compuestos inorgánicos reducidos**.

- **Mecanismo General:**

- **Obtención de energía:** La primera fase implica la oxidación de una molécula inorgánica (dador de electrones) a una forma más oxidada. Esta reacción libera energía. Ejemplos de sustratos: amoníaco (NH_3), nitritos (NO_2^-), sulfuro de hidrógeno (H_2S), azufre elemental (S), iones ferrosos (Fe^{2+}).
- **Generación de ATP y poder reductor:** La energía liberada en la oxidación se utiliza, a través de cadenas de transporte de electrones, para generar ATP (por fosforilación oxidativa) y poder reductor (NADH o NADPH).
- **Fijación del CO_2 :** Con el ATP y el poder reductor generados, estas bacterias fijan el **CO_2 atmosférico** (o disuelto) y lo utilizan para sintetizar sus propios compuestos orgánicos, generalmente a través del Ciclo de Calvin, de manera análoga a la fotosíntesis.

- **Tipos de Bacterias Quimiosintéticas (Ejemplos):**

- **Bacterias nitrificantes:** Cruciales en el ciclo del nitrógeno. Incluyen:
 - *Nitrosomonas*: Oxidan amoníaco (NH_3) a nitritos (NO_2^-).
 - *Nitrobacter*: Oxidan nitritos (NO_2^-) a nitratos (NO_3^-).



- **Bacterias del azufre:** Oxidan sulfuro de hidrógeno (H_2S) o azufre elemental (S) a sulfato (SO_4^{2-}). Abundan en ambientes ricos en azufre, como fuentes hidrotermales y respiraderos volcánicos.
- **Bacterias del hierro:** Oxidan iones ferrosos (Fe^{2+}) a férricos (Fe^{3+}).

- **Importancia Ecológica:**

- **Base de Ecosistemas Extremos:** La quimiosíntesis es la base de las redes tróficas en ambientes donde la luz solar no penetra (ej., respiraderos hidrotermales en las profundidades oceánicas), sustentando comunidades enteras de organismos que no dependen de la fotosíntesis.
- **Ciclos Biogeoquímicos:** Juegan un papel indispensable en los ciclos biogeoquímicos de elementos como el nitrógeno, azufre y hierro, transformando compuestos inorgánicos y haciéndolos disponibles para otros organismos o modificando su forma en el ambiente.
- **Biorremediación:** Algunas tienen potencial en la eliminación de contaminantes.

6. CONCLUSIÓN

En síntesis, las células son entidades dinámicas que requieren un suministro constante de energía para mantener su vida y su organización. Hemos analizado los dos grandes bloques metabólicos que regulan este flujo energético en la biosfera.

La **respiración celular**, en sus variantes aerobia y anaerobia, es el mecanismo catabólico fundamental para la obtención de ATP a partir de materia orgánica. Hemos visto cómo la **respiración aerobia** es un proceso altamente eficiente que culmina en la fosforilación oxidativa mitocondrial, aprovechando la energía liberada por el oxígeno. Por contraste, la **respiración anaerobia** (fermentación) es una estrategia de emergencia con un menor rendimiento, pero vital para la supervivencia en ausencia de oxígeno.

Por otro lado, la **fotosíntesis** y la **quimiosíntesis** son los procesos anabólicos primarios que introducen energía en la biosfera, permitiendo la síntesis de materia orgánica a partir de inorgánica. La fotosíntesis, impulsada por la luz solar, es la base de la vida en la superficie terrestre y la principal fuente de oxígeno. La quimiosíntesis, impulsada por la oxidación de compuestos inorgánicos, sustenta ecosistemas enteros en ambientes extremos y es fundamental en los ciclos biogeoquímicos.

Estos procesos no son independientes, sino que forman un ciclo interconectado: la materia orgánica y el O₂ producidos en la fotosíntesis son consumidos en la respiración; los subproductos de la respiración (CO₂, H₂O) son reactivos de la fotosíntesis. La vida en la Tierra es una danza continua de energía y materia, orquestada por estas rutas metabólicas fundamentales.

Didácticamente, este tema ofrece una visión integradora del metabolismo, la fisiología celular y la ecología. Permite al alumnado comprender la interdependencia entre los seres vivos, los ciclos de la materia y la energía en los ecosistemas, y la importancia del ATP como molécula universal de intercambio energético. Además, al estudiar la quimiosíntesis, se amplía la perspectiva sobre la diversidad de la vida y la adaptación a nichos ecológicos aparentemente hostiles.

Muchas gracias por su atención.

7. BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA COMENTADA

- **Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Principios de Bioquímica*. Ediciones Omega.** - Obra de referencia indispensable para un estudio detallado y molecular de todas las rutas metabólicas descritas, incluyendo los mecanismos de la fosforilación oxidativa y la fotosíntesis.
- **Alberts, B. et al. (2022). *Molecular Biology of the Cell*. W. W. Norton & Company.** - Proporciona información rigurosa sobre la localización y los mecanismos de los procesos energéticos a nivel celular, especialmente en eucariotas.
- **Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2018). *Biología*. Editorial Médica Panamericana.** - Un manual general de biología que ofrece una excelente visión global y comparativa de los procesos energéticos, ideal para contextualizar las rutas en el organismo y el ecosistema.
- **Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2005). *Microbiology*. McGraw-Hill.** - Excelente fuente para profundizar en la quimiosíntesis y las particularidades de la respiración en procariotas.
- **Decretos 109/2022 y 110/2022, de 22 de agosto, por el que se establecen la ordenación y el currículo de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato para la Comunidad Autónoma de Extremadura.** - Documento normativo imprescindible para la justificación y contextualización didáctica del tema.