

TEMA 9 CATABOLISMO

ÍNDICE de CONTENIDOS

0. La nutrición celular y metabolismo
1. El catabolismo
2. El catabolismo de los glúcidos
3. El catabolismo de los lípidos
4. El catabolismo de las proteínas



José Manuel Huertas Suárez

CRITERIOS de EVALUACIÓN

- B.2.7. Comprender los procesos de catabolismo y anabolismo estableciendo la relación entre ambos.
- B.2.8. Describir las fases de la respiración celular, identificando rutas, así como productos iniciales y finales.
- B.2.9. Diferenciar la vía aerobia de la anaerobia.

Metabolismo

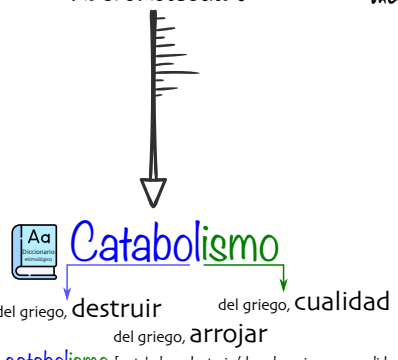
"Conjunto de reacciones bioquímicas que ocurren dentro de la células"



El **metabolismo** [metabole = cambio, ismo = cualidad] es la cualidad que tiene los organismos de cambiar químicamente la naturaleza de ciertas sustancias

Catabolismo

"Conjunto de reacciones bioquímicas degradan macromoléculas"



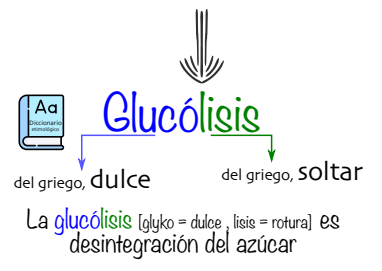
El **catabolismo** [catabole = destruir/demoler e ismo = cualidad] es un proceso metabólico que destruye moléculas complejas para formar una molécula sencillas

Respiración celular

"Conjunto de reacciones bioquímicas que utilizan macromoléculas para obtener energía"

Glucólisis

"Conjunto de reacciones bioquímicas generan rompen la glucosa"



La **glucólisis** [glyko = dulce, lisis = rotura] es desintegración del azúcar

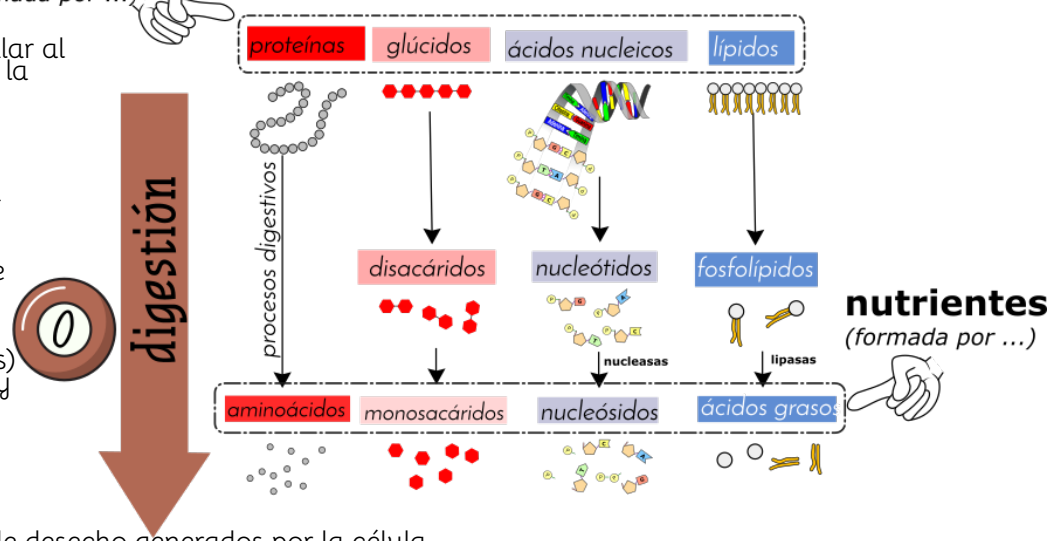
La célula es un conjunto altamente organizado de macromoléculas y orgánulos capaces de realizar todas las actividades asociadas a la vida (nutrición, relación y reproducción). Mediante la función de nutrición la célula toma materia y energía del exterior, y la transforma en: (1) materiales celulares y (2) energía para realizar trabajos de diversa índole. Pues bien, en este tema vamos a ver cómo la célula transforma unos componentes en otros y cómo obtiene energía al hacerlo.

0 Nutrición celular y metabolismo

La nutrición celular es el proceso biológico de intercambio y de la transformación de materia y energía. Para un mejor estudio y comprensión se divide este proceso en tres grandes procesos biológicos: ingestión, metabolismo y excreción

comida
(formada por ...)

- **Ingestión** o incorporación de nutrientes del medio extracelular al medio intracelular a través de la membrana plasmática.
- **Metabolismo** [del griego "metabole-" = cambio y "-ismo" = cualidad; es decir la cualidad que tienen los seres vivos para cambiar unas sustancias por otras] es el conjunto de reacciones bioquímicas encadenadas que ocurren dentro de una célula donde unas biomoléculas (reactivos) se transforman en otras biomoléculas (productos) con el fin de obtener materia y energía. Esto permite que la célula pueda realizar las tres funciones vitales: nutrición, reproducción y relación.
- **Excreción** es la expulsión al medio externo los productos de desecho generados por la célula.



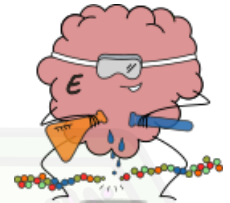
De los tres procesos antes descritos, vamos a estudiar solo el metabolismo.



1 Catabolismo

El catabolismo [del griego kato 'hacia abajo', y ballein 'lanzar'] es el conjunto de reacciones químicas metabólicas encadenadas donde moléculas orgánicas complejas (reactivos como glucosa, aminoácidos, proteínas o ácidos nucleicos) se degradan/rompen en otras moléculas más sencillas (productos como átomos, aminoácidos, nucleósidos, etc.) para obtener energía. Cuando esto ocurre se libera energía y se generan agentes reductores.

El anabolismo [del griego ana 'hacia arriba, y ballein 'lanzar'] es el conjunto de reacciones químicas metabólicas encadenadas donde moléculas orgánicas simples (reactivos como átomos, aminoácidos, nucleósidos, etc.) se juntan/ unen en una/s molécula/s más compleja/s (productos como glucosa, aminoácidos, proteínas o ácidos nucleicos) para obtener materia. Cuando esto ocurre se gasta energía y se consumen agentes reductores.



Rutas catabólicas, las reacciones bioquímicas encadenadas y reguladas por enzimas que degradan biomoléculas complejas

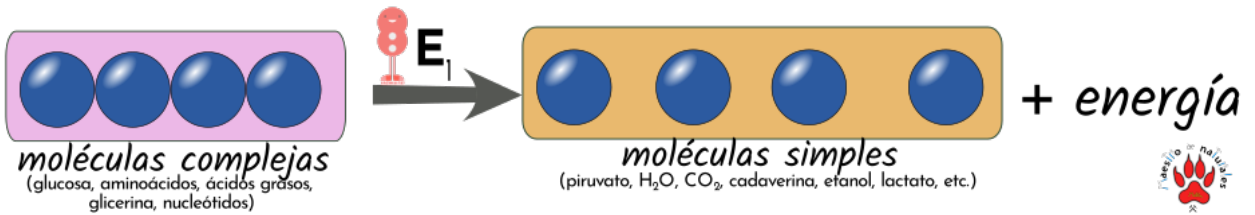
1.1 Tipos de rutas metabólicas

Las rutas metabólicas se clasifican, en función de si se forman moléculas grandes o pequeñas, en: rutas catabólicas, rutas anabólicas y rutas anfibólicas.

Rutas catabólicas: Son rutas oxidativas donde se destruyen moléculas orgánicas complejas para formar biomoléculas sencillas en las que se liberando energía y parte de la energía liberada se vuelve a almacenar en energía química en los enlaces del ATP. Es el caso de las rutas catabólicas de la respiración celular y la fermentación. Gráficamente se representa así:

Catabolismo,

La enzimas degradan **grandes moléculas a moléculas más pequeñas** y, al hacerlo, se **libera energía**



Rutas anabólicas: Son rutas reductoras donde se sintetiza moléculas orgánicas complejas a partir de biomoléculas sencillas en las que se consume energía (ATP) producidas en la rutas catabólicas. Por ejemplo, gluconeogénesis y el ciclo de Calvin (en la fotosíntesis). Gráficamente se representa así:

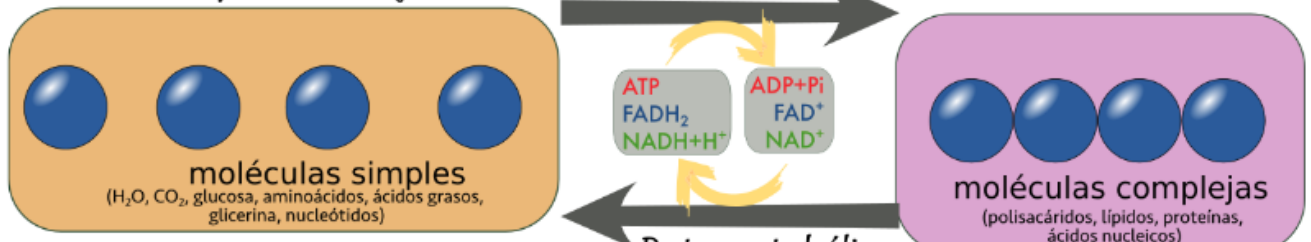
Anabolismo,

pequeñas moléculas se juntan para formar una molécula más grande. Para ello necesitamos energía



Rutas anfibólicas: Son rutas mixtas, donde ocurren a la vez la rutas catabólicas y anabólicas. Un ejemplo sería el ciclo de Krebs, donde existe un acoplamiento (= nudos en común) entre las rutas catabólicas y las anabólicas. Gráficamente se representa así:

Ruta anabólica: pequeñas moléculas se juntan para formar una molécula más grande. Para ello requerimos energía



Ruta catabólica: una molécula grande se rompe en otras más pequeñas.

Liberando energía

José Manuel Huertas Suárez

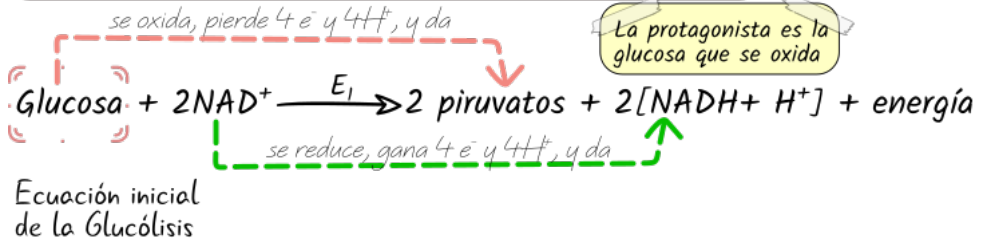


1.2 Características de las reacciones catabólicas

Los reacciones catabólicas presentan las siguientes características:

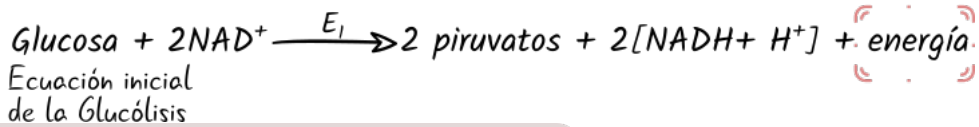
➤ Son reacciones de oxidación donde las moléculas complejas (monosacáridos, aminoácidos, nucleótidos, etc.) pierden electrones y, en ocasiones, hidrógenos (deshidrogenaciones); mientras que, otras moléculas, como las coenzimas en forma oxidada, ganan esos electrones e hidrógenos reduciéndose y transformándose en su forma reducida. Por ejemplo, la coenzima NAD⁺ ("nicotinamida adenina dinucleótido en su forma oxidada") toma dos átomos de hidrógeno y se reduce a NADH + H⁺ ("nicotinamida adenín dinucleótido en su forma reducida").

Rutas catabólicas son reacciones de oxidación



La protagonista es la glucosa que se oxida

Rutas catabólicas son exergónicas



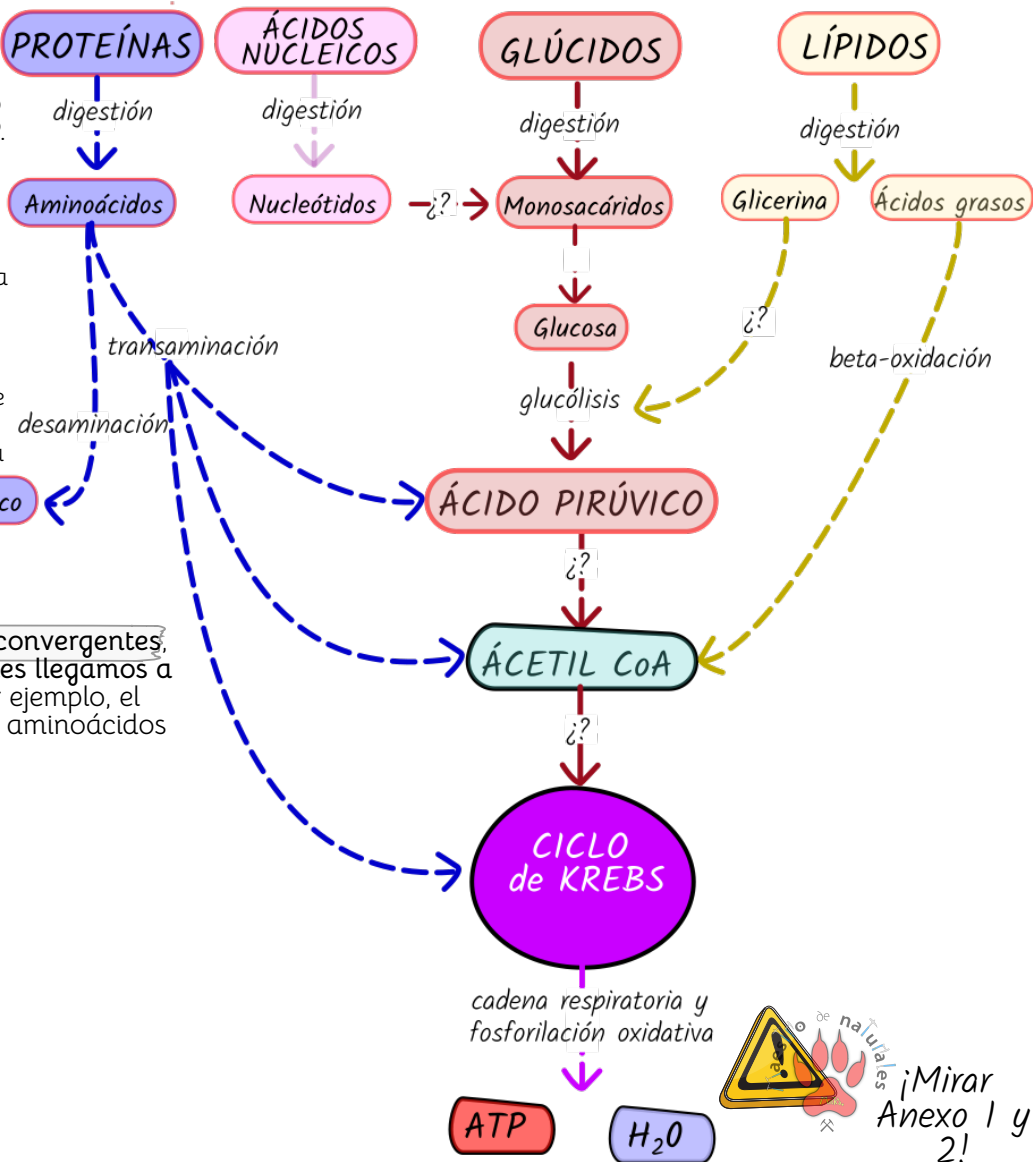
El protagonista es la energía que se libera

➤ Son reacciones exergónicas pues se libera energía tras reaccionar los reactivos; por tanto, la energía que guardan los reactivos es mayor que la que poseen los productos. De toda la energía liberada una pequeña parte vuelve a almacenarse como energía química en forma de ATP. En verdad, la energía química liberada se utiliza para:

Rutas catabólicas son convergentes

Distintos reactivos dan mismos productos

- (1) almacenarse en otra forma de energía química en los enlaces químicos de las sustancias de reserva energética como el Adenosín trifosfato (ATP) y/o se
- (2) transforma en otras energías como la energía mecánica que mueve moléculas o células moverse, la energía calorífica que manteniendo la temperatura corporal, la energía eléctrica que genera impulso nervioso, en energía luminosa que emite luz, etc.



➤ Forman rutas metabólicas convergentes, pues de distintos reactivos iniciales llegamos a los mismos productos finales. Por ejemplo, el catabolismo de glúcidos, lípidos y aminoácidos convergen en el ciclo de Krebs.

¡Mirar Anexo 1 y 2!



1.3 Tipos de rutas catabólicas

Las rutas catabólicas se pueden clasificar según dos criterios de clasificación: en función de la biomolécula orgánica de partida o en función del aceptor final de los electrones

TIPOS de CATABOLISMOS según la BIOMOLÉCULA de PARTIDA

TIPO de CATABOLISMO	BIOMOLÉCULA de PARTIDA	RUTA METABÓLICA
Catabolismo de GLÚCIDOS	GLÚCIDOS (glucosa)	GLUCÓLISIS CICLO de KREBS / FERMENTACIÓN
Catabolismo de LÍPIDOS	GRASAS (glicerina y ácidos grasos)	BETA OXIDACIÓN (hélice de Lynen)
Catabolismo de PROTEÍNAS	PROTEÍNAS (aminoácidos)	TRANSAMINACIÓN
		DESAMINACIÓN OXIDATIVA
		CICLO de KREBS

TIPOS de CATABOLISMOS según ACEPTOR FINAL de ELECTRONES

TIPO de CATABOLISMO	ACEPTOR FINAL de ELECTRONES	RUTA METABÓLICA
Animales, Protocistas, Plantas Respiración AERÓBICA La mayoría de bacterias La mayoría de hongos	INORGÁNICO (O ₂)	CADENA Transportadora de electrones FOSFORILACIÓN OXIDATIVA
Respiración ANAERÓBICA Algunas bacterias	INORGÁNICO (S ₂ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻)	CADENA Transportadora de electrones FOSFORILACIÓN OXIDATIVA
Algunas bacterias, Algunos hongos FERMENTACIONES Células musculares, esqueléticas de vertebrados	ORGÁNICO (piruvato)	FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA FERMENTACIÓN LÁCTICA

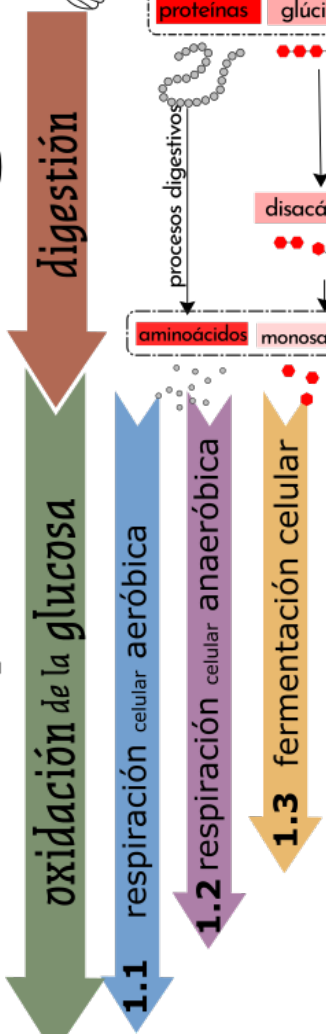
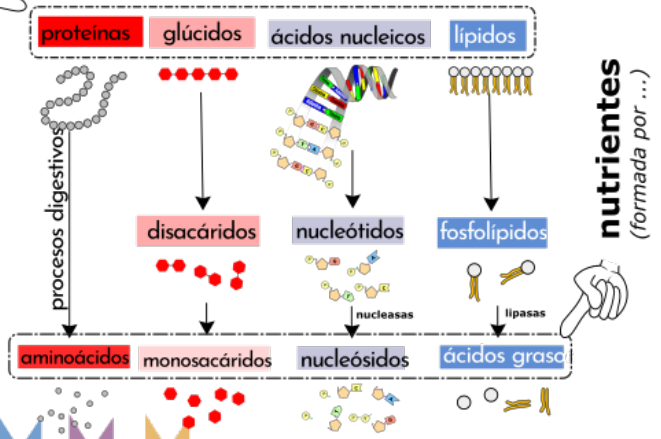
1.2 Rutas catabólicas más importantes

Las rutas catabólicas más importantes son la **degradación** (oxidación) de los **glúcidos** (estudiaremos la glucosa), **oxidación** (degradación) de los **lípidos** (estudiaremos los ácidos grasos), **catabolismo** (oxidación) de las **proteínas**. Date cuenta que he utilizado los vocablos degradación, oxidación y catabolismo como sinónimos, pero no los son. ¿Por qué los utilizo? Porque se utilizan para describir una parte en concreto del proceso de catabolismo. Algunas veces nos centramos en la pérdidas de electrones y por eso se utiliza oxidación; otras veces, nos enfocamos en cómo la biomolécula se rompe en dos y utilizamos degradación; [...]

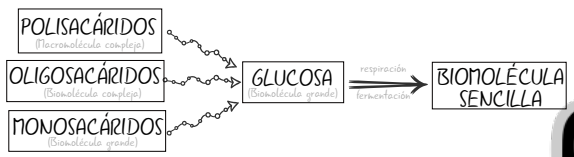
La primera ruta que se estudia en biología es el catabolismo de los glúcidos. La molécula de referencia de los glúcidos es la glucosa, la cual se puede oxidar de tres maneras diferentes y se le conoce como los mecanismos de oxidación de la glucosa que son: respiración celular aeróbica (oxidación completa), la respiración celular anaeróbica (oxidación incompleta) y la fermentación (oxidación incompleta).

Ruta catabólica 1

comida (formada por ...)



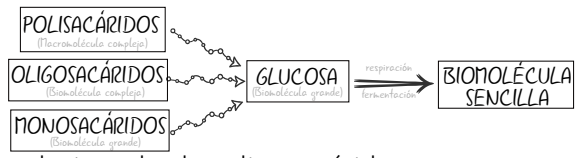
Rutas catabólicas en los glúcidos



José Manuel Huertas Suárez



2 Catabolismo de los glúcidos

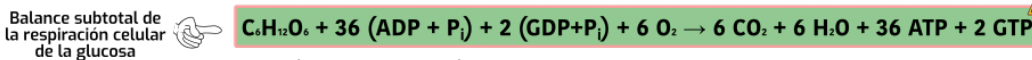
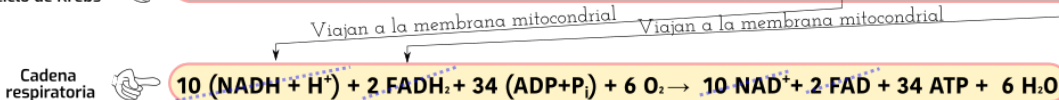
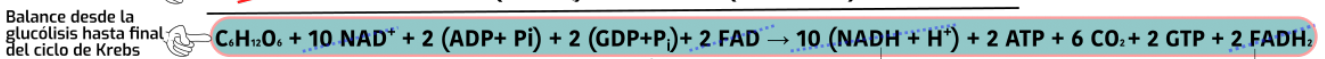
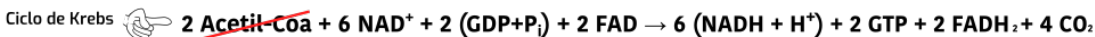
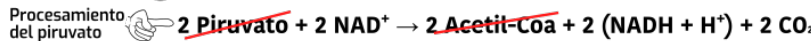
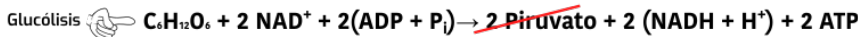
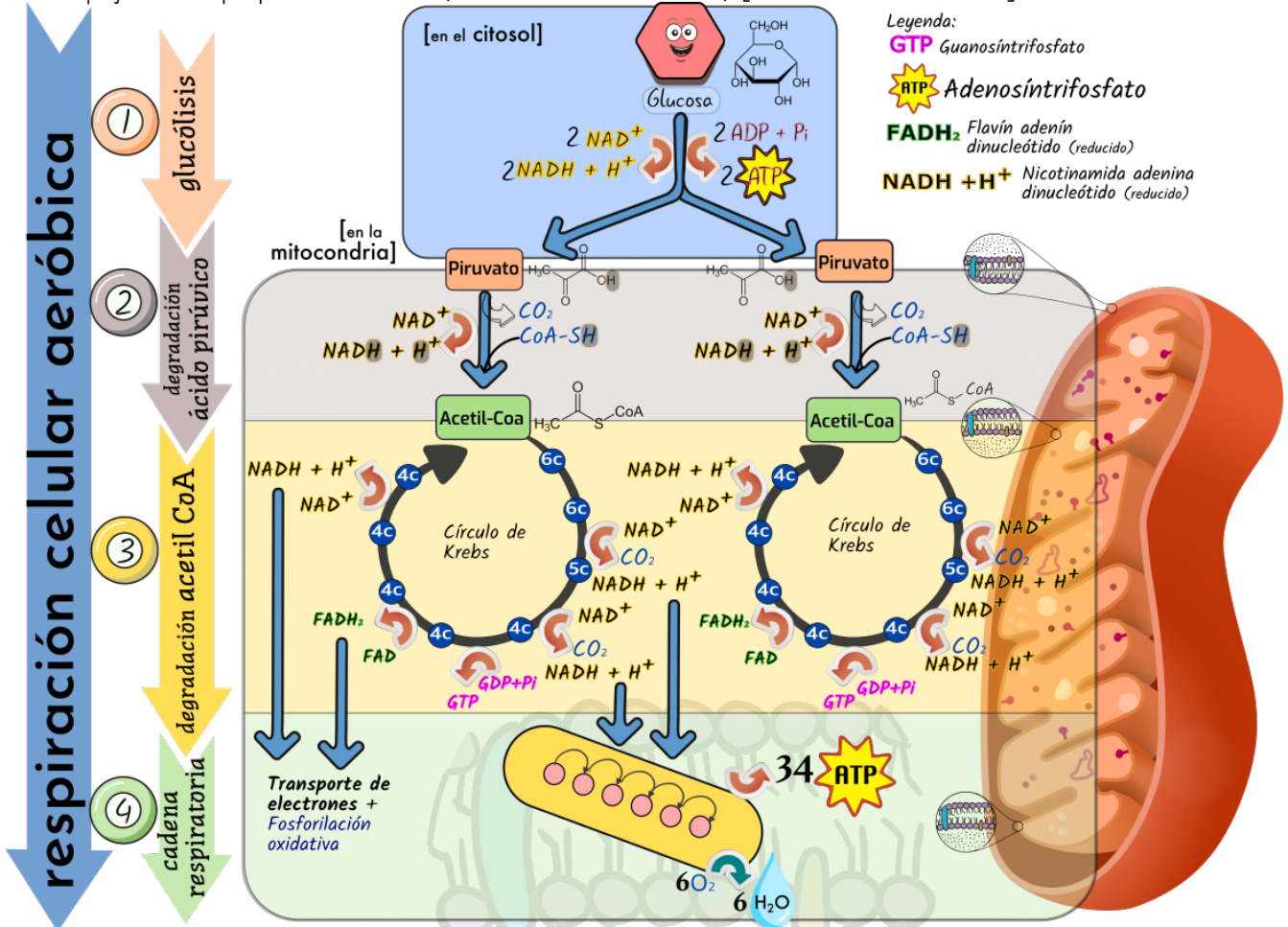


Todos los glúcidos se transforman de una manera u otra en **glucosa**; es decir, todos los oligosacáridos y polisacáridos se transforman directa o indirectamente en glucosa. ¿Por qué la glucosa? Porque es el monosacárido más abundante y del que más energía química se obtiene. ¿De dónde se obtiene? (1) del glucógeno presente en el hígado, (2) de las inclusiones de glucógeno que hay en el citosol y (3) de la digestión.

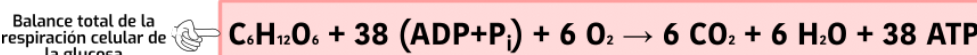
La glucosa sufre catabolismo cuando se **oxida** (si pierde electrones, suele perder átomos, ergo la glucosa se hace más pequeña y se transforma en otra biomolécula) puede ser **oxidación completa**, si sigue la ruta catabólica de la respiración; o bien, **oxidación incompleta**, si sigue la ruta catabólica de la fermentación.

2.1 Catabolismo de los glúcidos por respiración de rutas catabólicas

La degradación de la glucosa por respiración aeróbica y anaeróbica (solo algunas bacterias) se lleva a cabo mediante un conjunto de reacciones químicas que podemos agrupar en cuatro etapas: (1) **glucólisis**, [del griego, glycos, azúcar y lysis, ruptura] degradación de la glucosa a un compuesto de tres carbonos llamado piruvato; (2) **procesamiento del piruvato** o **descarboxilación oxidativa**, el piruvato se convierte en acetil-CoA; (3) **oxidación del acetil-CoA a CO₂**; y (4) **fosforilación oxidativa**, primero tiene lugar la oxidación de las coenzimas [NADH + H⁺] y FADH₂ (= vamos a quitarles los hidrógenos) en el proceso llamado **cadena respiratoria** y luego **quimiósmosis**, donde la ATP sintetasas gracias al flujo de H⁺ fosforiliza el ADP (34 ADP + Pi → 34 ATP) [Todo ocurre en el citosol]



En términos energéticos, ATP=GTP

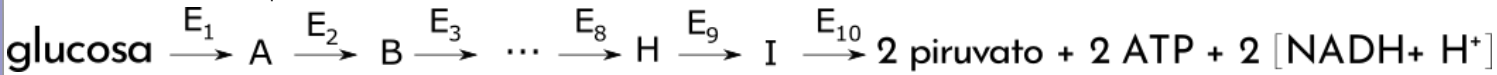


· Por cada NADH + H⁺ se forman 3 ATP
· Por cada FADH₂ se forman 2 ATP

¿Recuerdas cómo se lee esto [NADH + H⁺]?
Se lee nicotinamina adenina dinucleótido en su forma reducida"

2.1.1 Glucólisis [en el citosol]

La glucólisis o glicólisis [del griego glycos, azúcar y lysis, ruptura] es el conjunto de diez reacciones químicas, catalizadas por enzimas, que oxidan la glucosa (un compuesto de seis carbonos) a 2 moléculas de piruvato (un compuesto de tres carbonos), 2 ATP y 2 [NADH + H⁺]. Estas reacciones ocurren en el citosol de todas las células, ya sean eucariotas o procariotas.



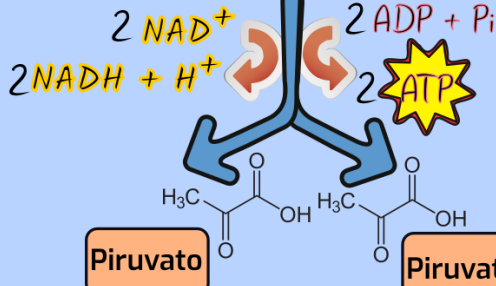
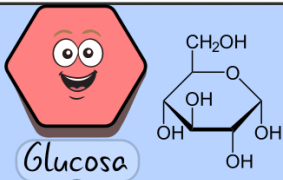
Cuando se oxida la glucosa se libera pequeñas cantidades de energía. Parte de esa energía, solo el 7 %, se captura en forma de energía química (ATP y [NADH + H⁺]) y el resto se disipa en forma de calor.

El gráfico que tienes abajo es una simplificación de la ruta de glucólisis; es decir, representa lo que entra en la ruta y los productos finales de la glucólisis.

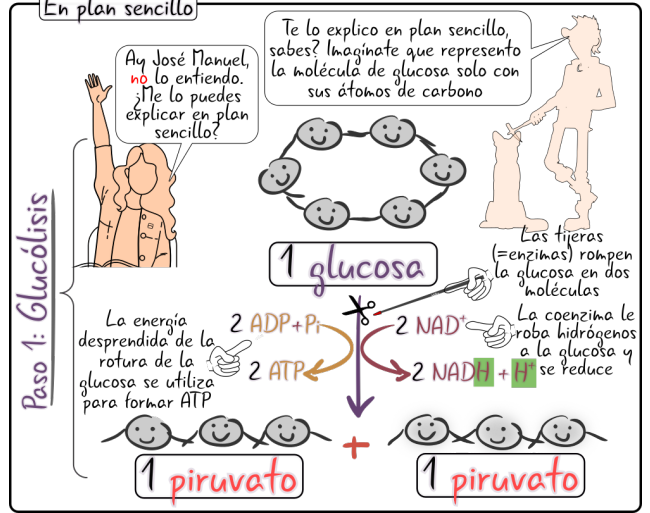
[en el citosol]

Legenda:

ATP Adenosíntrifosfato
NADH + H⁺ Nicotinamida adenina dinucleótido (reducido)



En plan sencillo



2.1.2 Procesamiento del piruvato o descarboxilización oxidativa [en la mitocondria]

¿Qué sucede con el piruvato producido por la glucólisis?

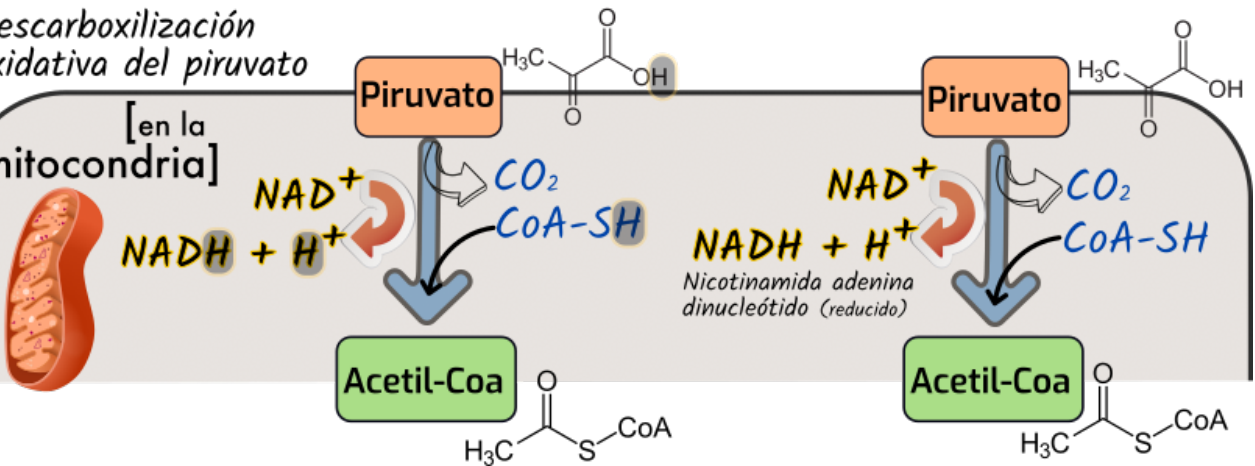
El procesamiento del piruvato o descarboxilización oxidativa es el conjunto de unas reacciones metabólicas donde el piruvato (H₃C-CO-COOH) pierde un grupo carboxilo (descarboxilación) en forma de CO₂ y un hidrógeno (deshidrogenación) que son aceptados por un NAD⁺ y se convierte a [NADH + H⁺].

El grupo acetilo resultante (H₃C-CO-) que tiene dos carbonos se une a la coenzima A (CoA-SH) pierde un hidrógeno y lo acepta [NADH + H⁺] y se convierte [NADH + H⁺] y forma acetil-CoA. Todo esto ocurre en la matriz mitocondrial.

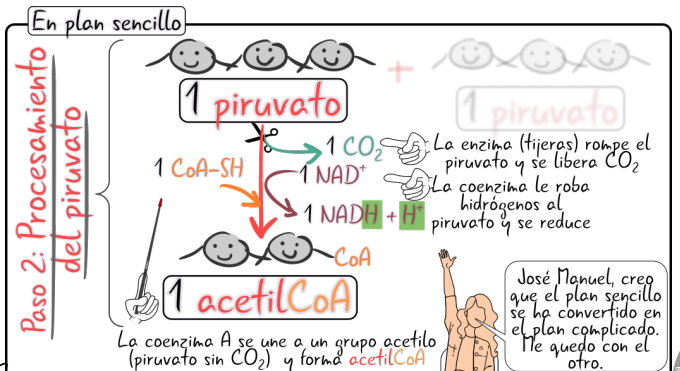


Descarboxilización oxidativa del piruvato

[en la mitocondria]



En plan sencillo

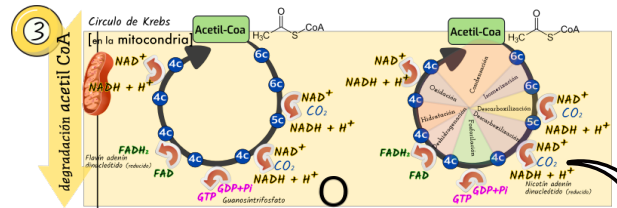


En resumen, los 2 piruvatos se transforman, al oxidarse, en 2 acetil-CoA y se generan 2 [NADH + H⁺]

Si recapitulamos desde la glucólisis, por cada glucosa se forman 2 piruvatos, que se transforman al oxidarse en 2 acetil-CoA y se generan 2 [NADH + H⁺]



¿Qué sucede con el piruvato producido por la glucólisis?



2.1.3 Ciclo de Krebs o ácido cítrico [en la matriz mitocondrial]

El ciclo de Krebs es un conjunto de ocho reacciones cíclicas que tienen lugar en la matriz mitocondrial. Allí las coenzimas se reducen y se genera GTP gracias a los siguientes procesos:

1. Condensación

El acetil-CoA (una molécula de 2 carbonos (2C)) al juntarse con el oxacetato (una molécula de 4 carbonos (4C)) forma citrato (6C).

2. Isomerización. El citrato (6C) reestructura sus átomos y se convierte en isocitrato (6C)

3. Descarboxilación oxidativa y se origina alfaetoglutarato (5C) cuando el isocitrato (6C) se oxida y se desprende un grupo carboxilo en forma de CO₂

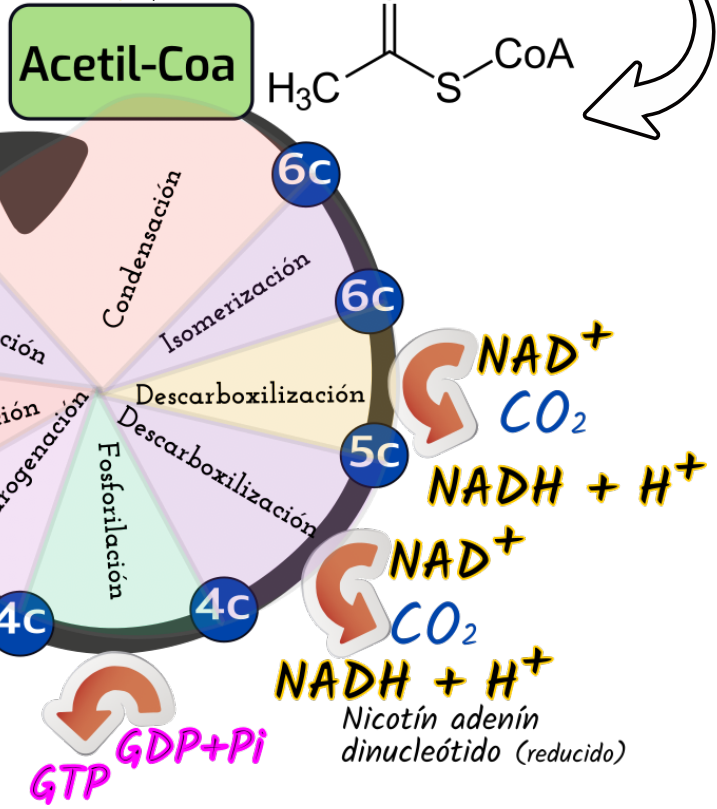
4. Descarboxilación oxidativa. El alfaetoglutarato (5C) se oxida y se desprende CO₂, se produce un [NADH+H⁺] y se forma una molécula de 4C

5. Fosforilación. La molécula de 4C (succinil-CoA) se transforma en otra molécula de 4C (succinato) y se forma un GTP.

6. Deshidrogenación. La molécula de 4C sufre una deshidrogenación se genera otra molécula de 4C (fumarato) y FADH₂

7. Hidratación. La molécula de 4C (fumarato) sufre una adición de agua y se forma otra molécula de 4C (malato)

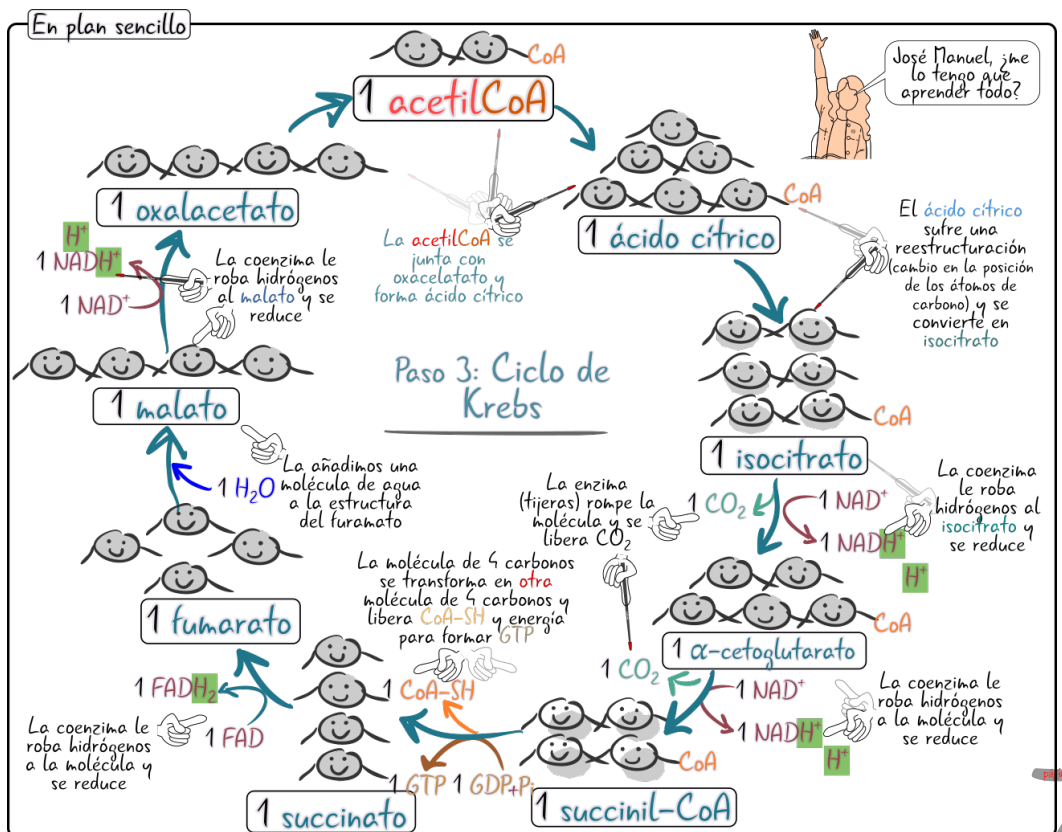
8. Oxidación. La molécula de 4C (malato) se oxida y se genera [NADH+H⁺] y otra molécula de 4C (oxalacetato)



En cada vuelta del ciclo de Krebs se: (1) genera una molécula de GTP, tres de [NADH+H⁺] y una de FADH₂; (2) se consume un grupo Acetil-CoA y (3) se regenera un ácido oxalacético, que puede iniciar otro nuevo ciclo.

Recuerda que por cada molécula de glucosa se forma dos acetil-CoA. Por tanto, por cada molécula de glucosa en el ciclo de Krebs se forman 2 moléculas de GTP, 6 de NADH + H⁺ y 2 FADH₂.

Si recapitulamos desde la glucólisis tenemos lo siguiente: por cada glucosa se forman 2 piruvatos, que se transforman, al oxidarse, en 2 acetil-CoA y se generan 2 [NADH + H⁺]. Por cada 2 acetil-CoA que entra en el ciclo de Krebs se forman 2 moléculas de GTP, 6 de NADH + H⁺ y 2 FADH₂.



2.1.4 Cadena respiratoria [en la membrana mitocondrial interna]

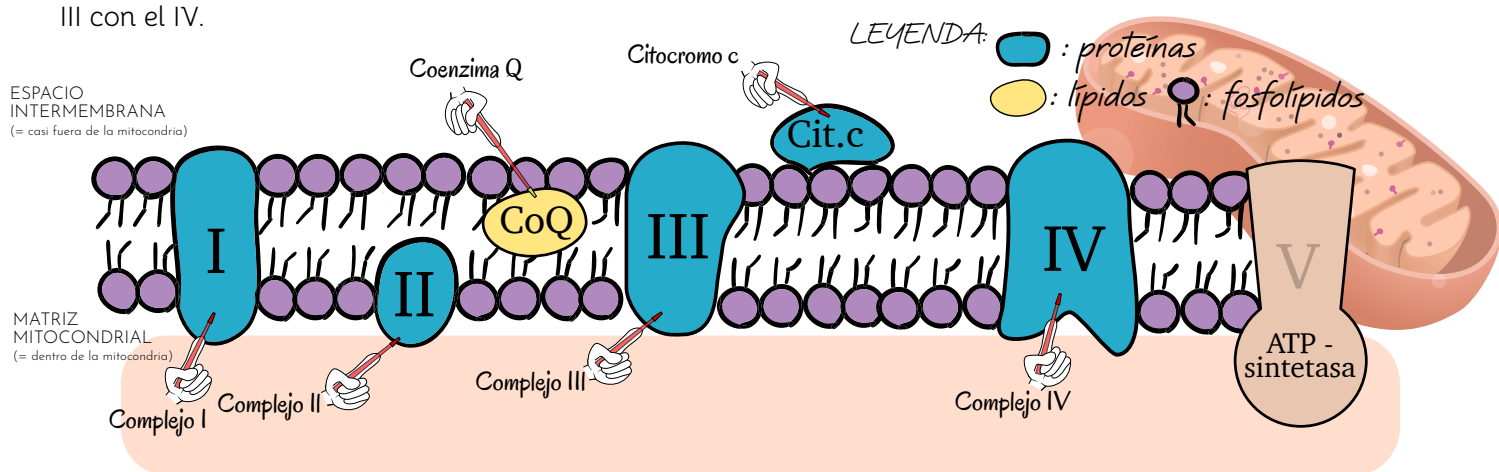
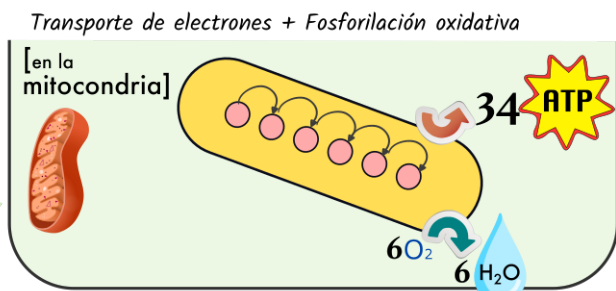
¿Dónde va a parar los electrones que ceden las moléculas?



La cadena respiratoria o cadena transportadora de electrones es un conjunto de moléculas que se encuentran embebidas de forma ordenada en la membrana mitocondrial interna.

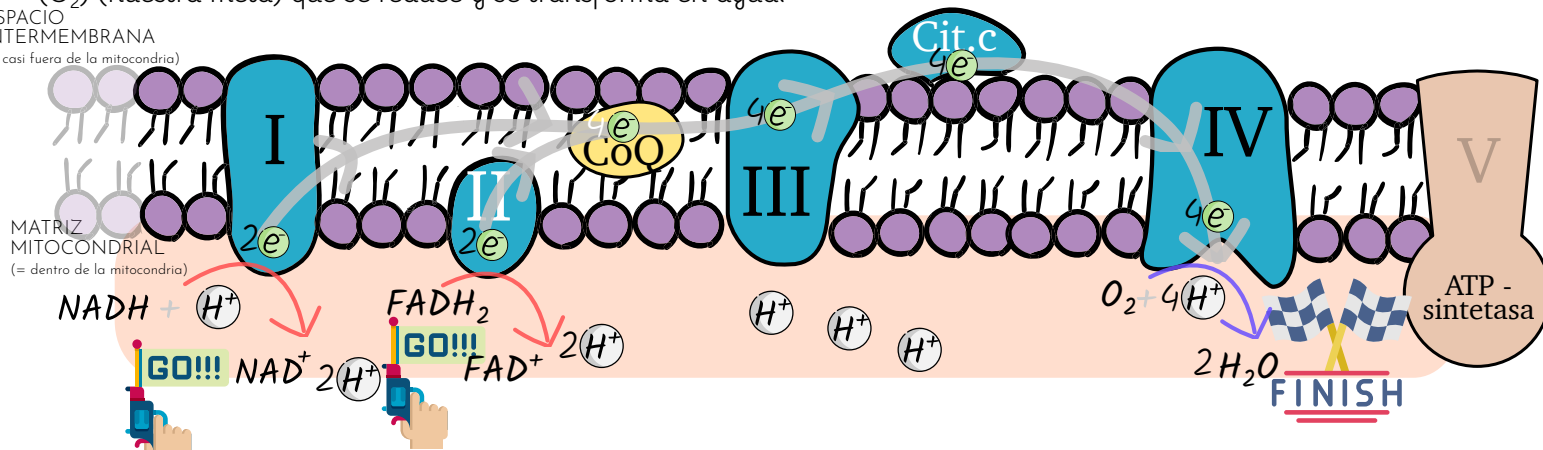
La cadena respiratoria está constituida por seis componentes:

- #1 complejos proteicos I (NADH deshidrogenasa),
- #2 complejos proteicos II (succinato deshidrogenasa),
- #3 complejos proteicos III (complejo bc1)
- #4 complejos proteicos IV (citocromo oxidasa)
- #5 una pequeña molécula lipídica, la ubiquinona (también recibe el nombre de coenzima Q o simplemente Q), capaz de trasladarse por la doble bicapa lipídica y transportar electrones del complejo I y II al III, y
- #6 una pequeña proteína, la citocromo C que está en la cara interna de la membrana y que comunica el complejo III con el IV.



En la cadena respiratoria, las coenzimas reducidas de la glucólisis, procesamiento del piruvato y del ciclo de Krebs se van a oxidar de nuevo (reoxidación) para producir ATP. Por eso, en la cadena respiratoria distinguimos dos procesos acoplados (la una sin la otra no funcionarían): transporte de electrones y fosforilación oxidativa.

Transporte de electrones consiste en una secuencia de reacciones redox, donde los electrones procedentes del $\text{NADH} + \text{H}^+$ inician su recorrido en el complejo I; mientras que, los procedentes del FADH_2 lo hacen en el complejo II. [Ergo hay dos salidas o inicio de ruta de transporte de electrones y una sola meta o fin de ruta (recuerda que hay dos salidas, pues esto tiene una consecuencia que te explicaré en la fosforilación oxidativa)]. Los electrones continúan su recorrido, de manera progresiva (poco a poco), a la coenzima Q (ubiquinona); posteriormente, al complejo III; a continuación, al citocromo c; más tarde, al complejo IV; y, por último, el complejo IV transfiere los electrones al oxígeno molecular (O_2) (nuestra meta) que se reduce y se transforma en agua.



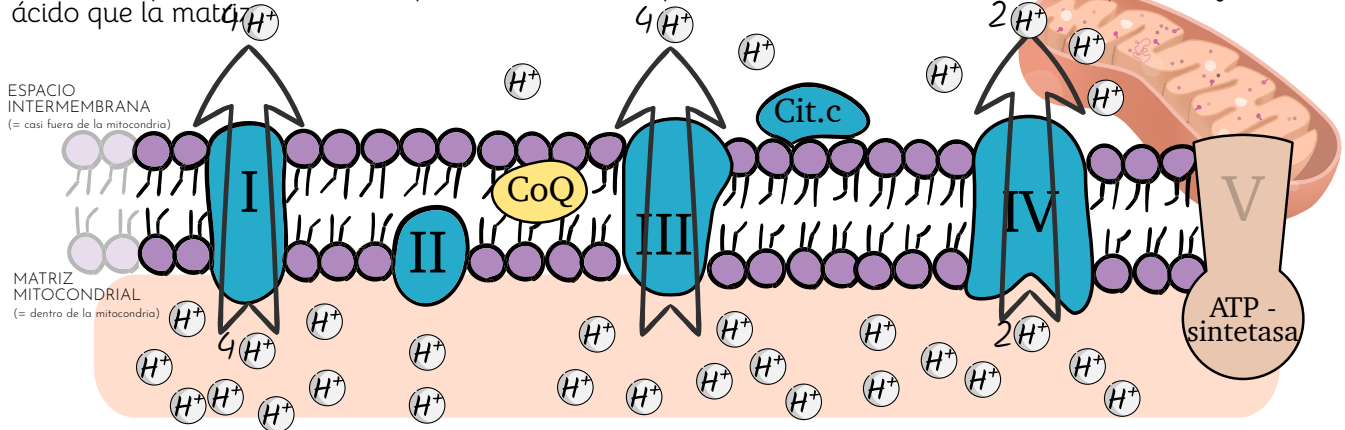
(*) ¿Por qué poco a poco?

Si la oxidación se realizaría directamente, se liberaría una enorme cantidad de energía que se desaprovecharía (recuerda que solo aprovechamos el 7 %) y que, incluso, provocaría una elevación de temperatura peligrosa para la célula. Por ello los electrones fluyen "cuesta abajo", desde el $\text{NADH} + \text{H}^+$ hasta el O_2 , a través de la cadena respiratoria liberando la energía en pequeñas proporciones



Fosforilación oxidativa ocurre según dos fases acopladas (la una no se puede dar si no ocurre la otra): formación de gradientes de protones y uso de gradientes de protones para sintetizar ATP.

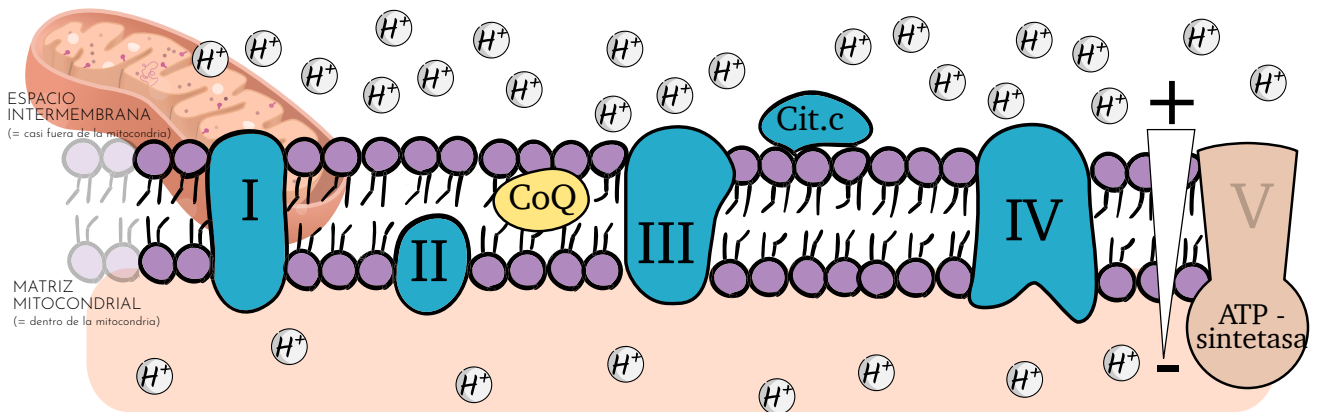
Formación de gradientes de protones ocurre cuando los complejos I, II y III, bombean protones (gracias a la energía liberada en el transporte de electrones) desde la matriz mitocondrial hasta el espacio intermembrana. A medida que se bombean más protones hacia el espacio intermembrana, se hace más positivo y más ácido que la matriz.



Se cree que por cada par de electrones que recorre la cadena desde el $[NADH + H^+]$ hasta el oxígeno molecular, se podría bombear diez protones (4 protones en el complejo I, 4 protones en el complejo III y 2 protones en el complejo IV). Ver dibujo de arriba que corresponde a una de las dos salidas.

Se cree que por cada par de electrones que recorre la cadena desde el $FADH_2$ hasta el oxígeno molecular, se podría bombear seis protones (4 protones en el complejo II y 2 protones en el complejo IV). No está representado la segunda salida.

En resumen, de 4 electrones que entran en la cadena respiratoria se bombean 16 protones (10 protones del $[NADH + H^+]$ y 6 protones del $FADH_2$)

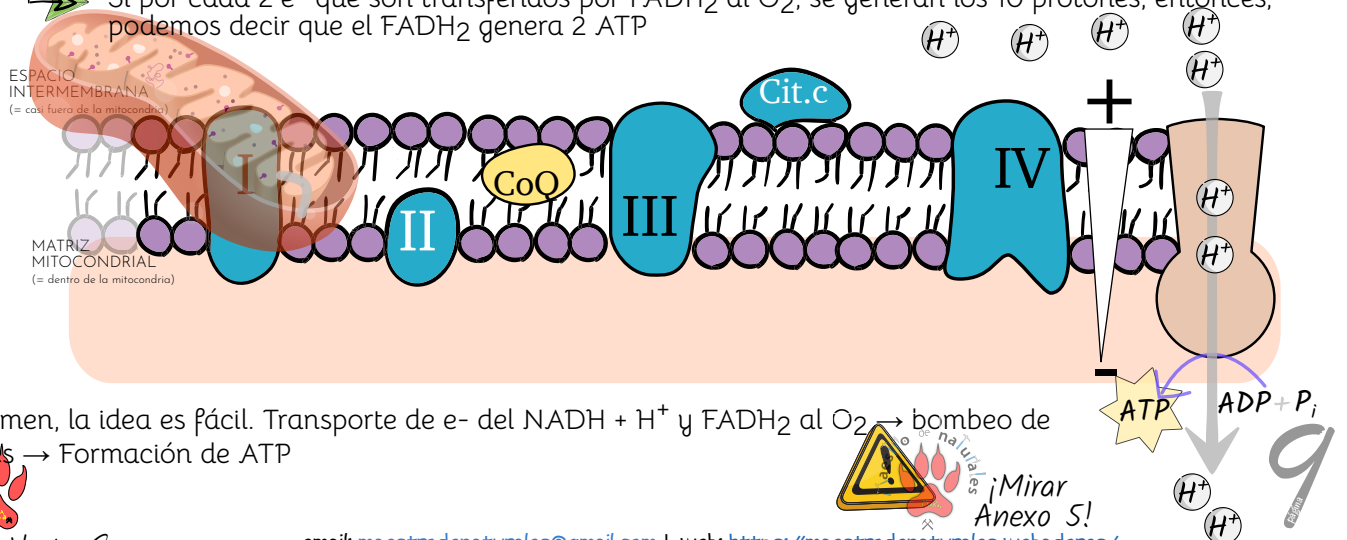


Uso del gradiente de protones para sintetizar ATP El desequilibrio de cargas a ambos lados de la membrana provoca que los protones vuelvan a la matriz mitocondrial a través de unas proteínas constituidas por cuatro partes, cada una de ellas se mueven entre sí, como si fueran las piezas de un molino hidráulico llamadas ATP-sintetasas. Cuando los protones pasan por la ATP sintetasa se libera energía que se emplea para fabricar ATP a partir de ADP y fosfato inorgánico (Pi).

La ATP-sintetasa necesita 3 protones para fabricar 1 ATP, luego el balance resultante es el siguiente:

Si por cada 2 e- que son transferidos por $[NADH + H^+]$ al O_2 , se generan los 10 protones; entonces podemos decir que el $[NADH + H^+]$ genera 3 ATP.

Si por cada 2 e- que son transferidos por $FADH_2$ al O_2 , se generan los 6 protones; entonces, podemos decir que el $FADH_2$ genera 2 ATP.



En resumen, la idea es fácil. Transporte de e- del $NADH + H^+$ y $FADH_2$ al O_2 → bombeo de protones → Formación de ATP

2.2 Catabolismo de la glucosa por fermentación

La fermentación de la glucosa es la degradación de la glucosa lleva a cabo mediante un conjunto de reacciones químicas que podemos agrupar en tres etapas: (1) glucólisis, [del griego, glycos, azúcar y lysis, ruptura] degradación de la glucosa a un compuesto de tres carbonos llamado piruvato; (2) procesamiento del piruvato o descarboxilación oxidativa, el piruvato se convierte en acetaldehídos (fermentación alcohólica y láctica) o lactatos y (3) oxidación del acetaldehído a etanol (en fermentación alcohólica) o lactatos (fermentación láctica). Todo ocurre en el citosol.

La fermentación es un proceso anaeróbico en el que no participa ninguna cadena transportadora de electrones y el aceptor final de electrones es siempre una molécula orgánica (una molécula derivada del piruvato: etanol, lactato, ...). El paso del piruvato al subproducto de la fermentación permite a la célula regenerar NAD* para la glucólisis. Según la naturaleza del aceptor final, se distingue varios tipos de fermentaciones: fermentación alcohólica, fermentación láctica, fermentación butírica y fermentación pútrida.

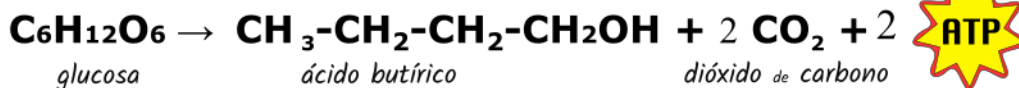
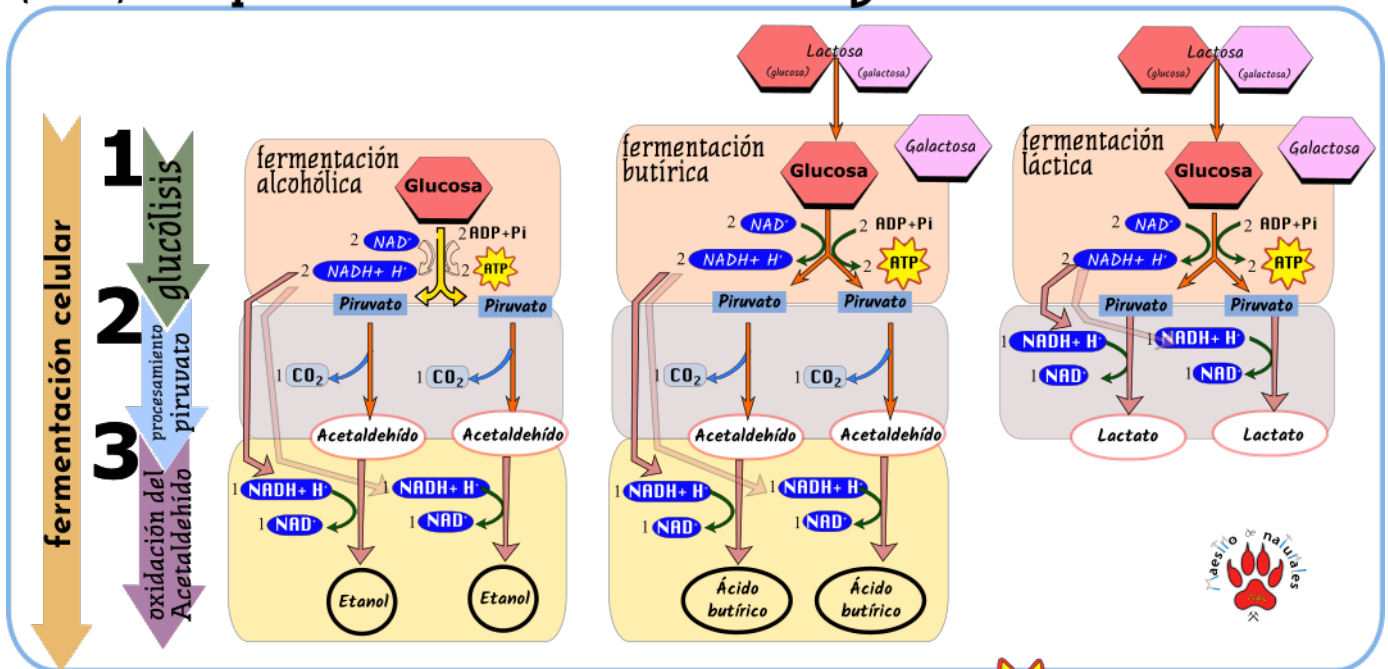
- fermentación alcohólica, si el producto final es alcohol etílico (glucosa → piruvato → alcohol etílico). Realizada por ciertas bacterias y hongos (levaduras: Saccharomyces cerevisiae, levadura de cerveza o fermento de pan), empleado para la fabricación de vino, cerveza y pan;
- fermentación láctica, si es ácido láctico (glucosa → piruvato → ác. láctico).
- fermentación butírica, si es ácido butírico (glucosa → piruvato → ác. butírico), y
- fermentación pútrida o putrefacción, si son productos orgánicos malolientes (aminoácido → moléculas malolientes).



Todas estas fermentaciones tienen en común que realizan la glucólisis y forman piruvato, el cual se oxida y da otras moléculas que son las que dan el nombre al tipo de fermentación. Al no existir cadena respiratoria, la síntesis de ATP ocurre solo a nivel de sustrato.

Por ejemplo, en la respiración una glucosa produce 38 ATP; mientras que, por fermentación solo produce 2 ATP. Estas fermentaciones se dan a nivel de microorganismo (levaduras, bacterias) y a nivel pluricelular en la fibra muscular estriada de los vertebrados (fermentación láctica) y en muchas células vegetales cuando escasea el oxígeno (fermentación etílica). Por tanto, la respiración celular anaeróbica y la fermentación solo tiene en común el no ser dependientes del oxígeno.

(Tres) etapas de la fermentación de la glucosa



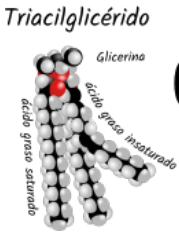
3 Catabolismo de los lípidos

Los lípidos con mayor reserva energética son las grasas o triglicéridos. La enzimas digestivas del intestino delgado transforma las grasas en glicerol y ácidos grasos. Luego son absorbidas por el intestino y pasan a la linfa y de ésta a la sangre que las transporta a todas las células. Dentro de la célula, cada molécula sigue una ruta distinta. Vamos a explicar lo que le ocurre a la glicerina y a los ácidos grasos.

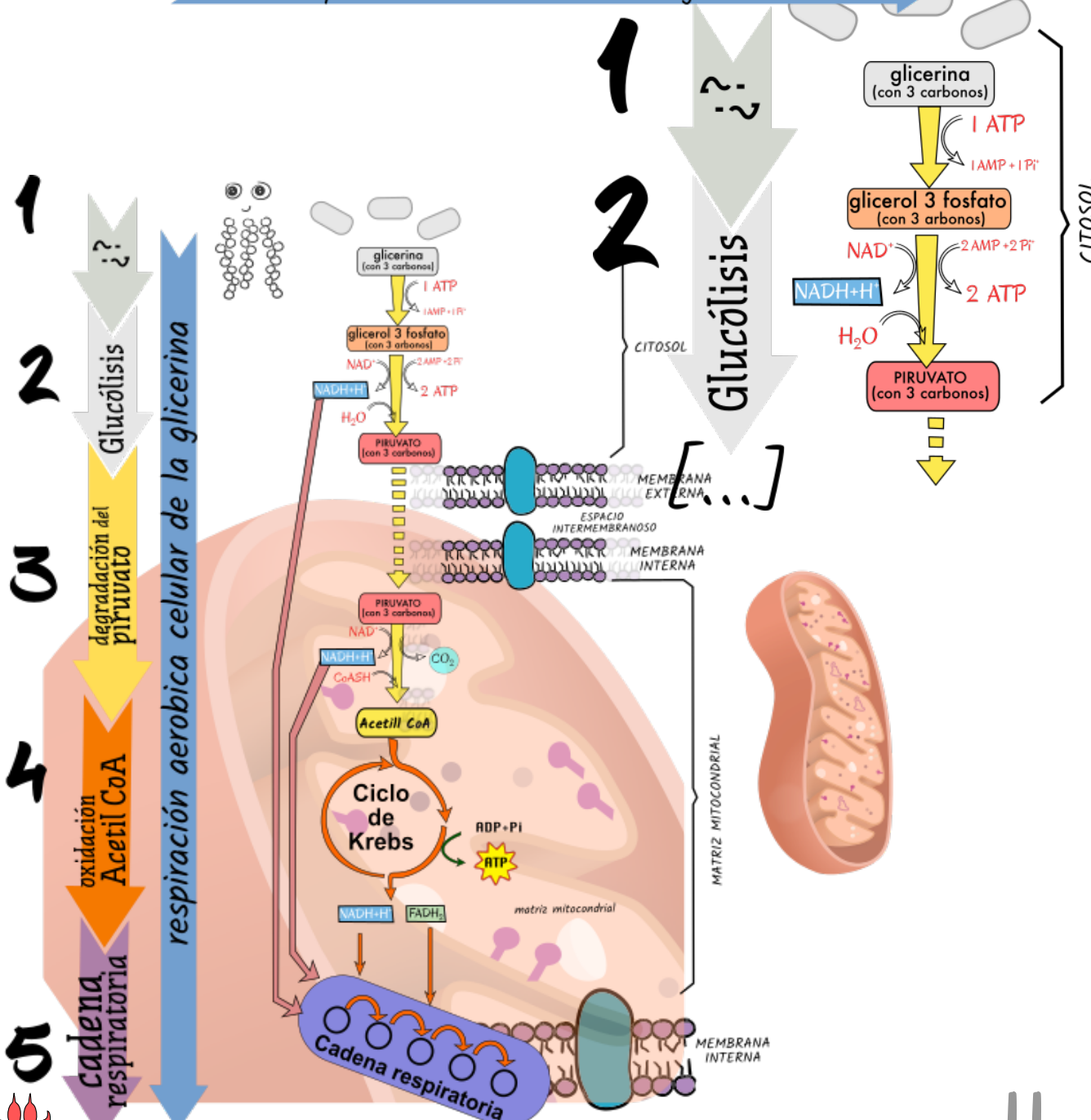
3.1 Catabolismo de la glicerina

El glicerol o glicerina se transforma en dihidroxiacetona fosfato y se incorpora a la ruta de la glucólisis. La dihidroxiacetona fosfato se transforma en glicerol 3-fosfato que se oxida y da como resultado $\text{NADH} + \text{H}^+$ y piruvato. El piruvato se ... (bueno esta historia ya la conoces, porque es lo mismo que se explicó en la respiración con la glucosa).

Ruta catabólica de la respiración de la glicerina



Rutas catabólicas de la respiración de los glicerina



3.2 Catabolismo de los ácidos grasos

Los ácidos grasos se activan y se introducen en las mitocondrias o peroxisomas, donde sufren una ruta metabólica cíclica y repetitiva: la beta-oxidación o hélice de Lynen. La beta-oxidación genera acetyl-CoA, el cual se introduce en el ciclo de Krebs y genera acetyl-CoA y FADH₂ y [NADH+ H⁺] que van a parar a la cadena respiratoria.

La ruta catabólica de los ácidos grasos suele estudiar en cinco procesos encadenados: activación del ácidos grasos, transporte del ciclo grado, beta-oxidación, ciclo de Krebs y cadena respiratoria.

Ruta catabólica de la respiración de los ácidos grasos

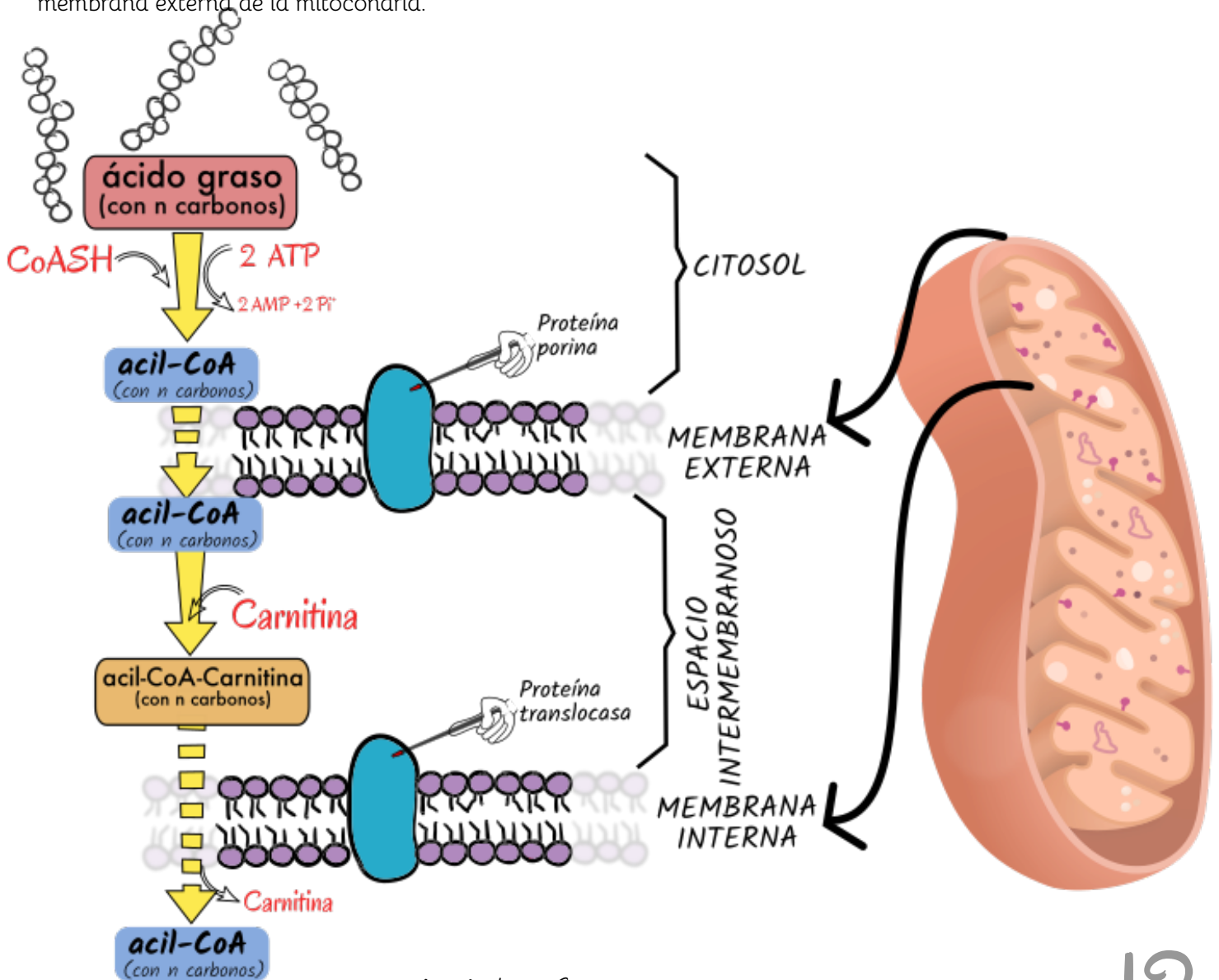


ACTIVACIÓN del ácido graso [en el citosol]

La activación del ácido graso consiste en unir un ácido graso con la coenzima A, mediante un enlace tiéster, y formar un acil-CoA. Esta activación es un requisito indispensable para que el ácido graso pueda atravesar la membrana externa de la mitocondria.

TRANSPORTE al INTERIOR de la MITOCONDRIA [en la mitocondria]

El transporte al interior de la membrana interna de la mitocondria ocurre cuando el acil-CoA se une a una molécula llamada carnitina y forma el acil-carnitina, que es capaz de atravesar la membrana mitocondrial interna y de este modo llegar a la matriz mitocondrial.



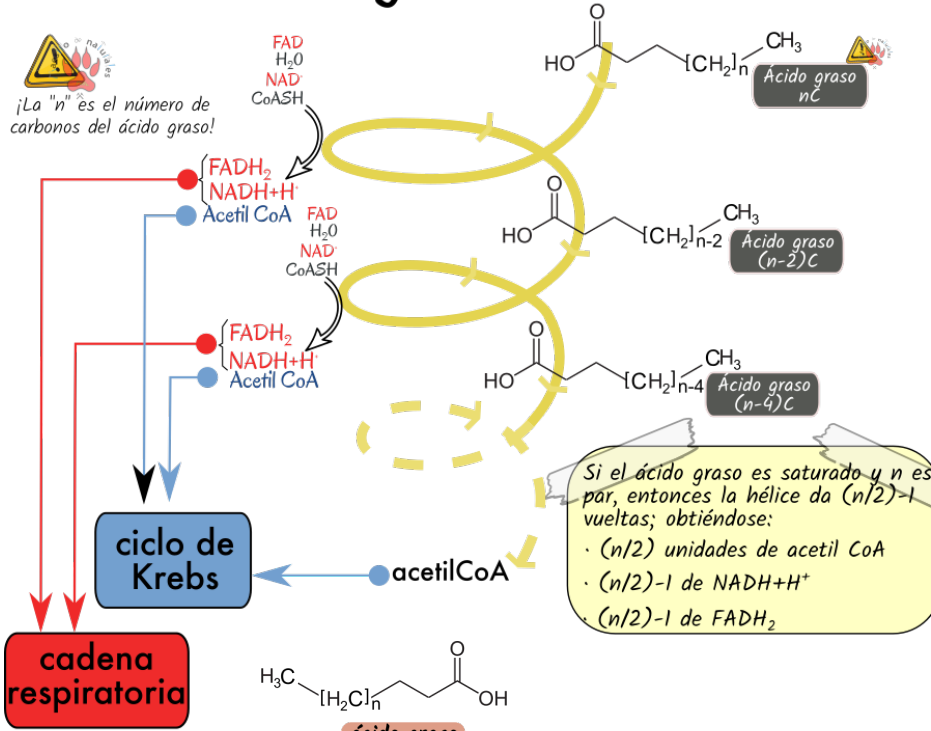
β-oxidación [en el matriz mitocondrial o peroxisomas]

La betaoxidación (β-oxidación) es un proceso catabólico donde los ácidos grasos sufren cuatro reacciones recurrentes cuyo producto final es acetil-CoA, molécula que pueden ingresar en el ciclo de Krebs, y coenzimas reducidos (NADH y FADH₂) que ingresan en la cadena respiratoria. Recibe el nombre de betaoxidación, porque el carbono beta del ácido graso se oxida a carbonilo.

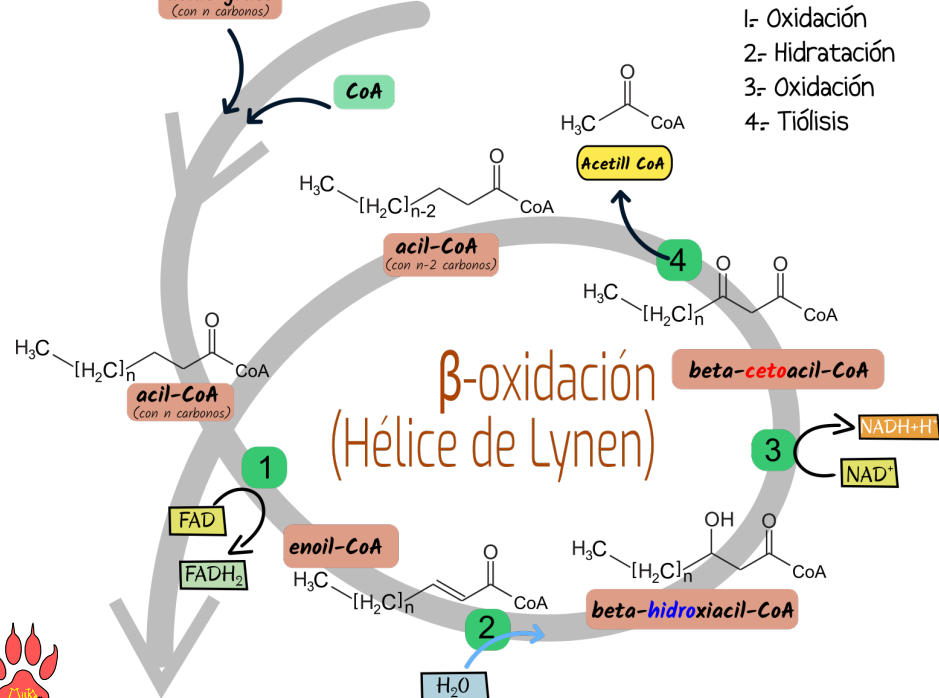
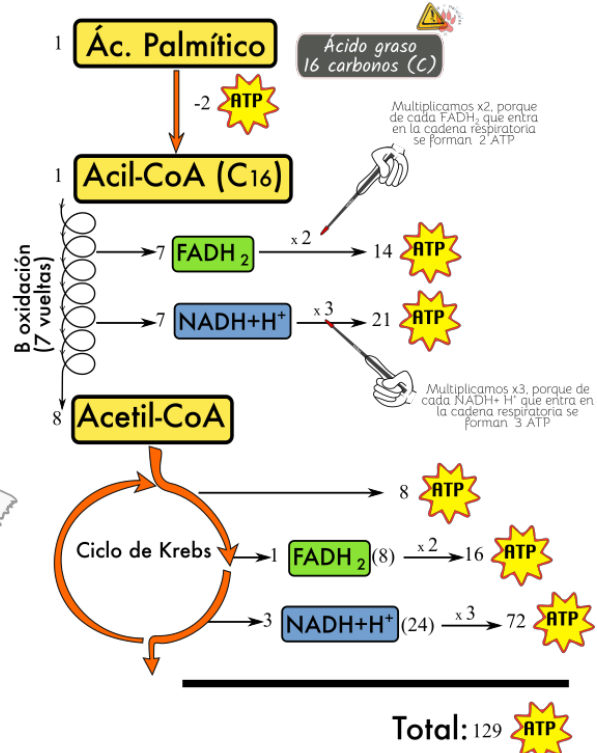
- 1. Deshidrogenación. El acetil-CoA se oxida entre carbono alfa y beta. Los electrones eliminados reducen al FAD y forman FADH₂ y da enoil-CoA.
- 2. Hidratación. La enoil-CoA se hidrata y beta-hidroxiacil-CoA.
- 3. Oxidación. La beta-hidroxiacil-CoA se reduce y da beta-cetoacil-CoA
- 4. Tiólisis. El enlace entre el carbono alfa y beta de la beta-cetoacil-CoA se rompe y se libera la coenzima A y se forma una acil-CoA con dos carbonos menos. Puesto que en cada vuelta de la hélice de Lynen se obtiene un ácido graso con dos carbonos menos, cada ácido graso experimenta n/2-1 vueltas de beta oxidación y produce n/2 moléculas de acetil-CoA.

A continuación, aparecen dos gráficos que apoyan lo arriba dicho. ¿Con cuál te quedas?

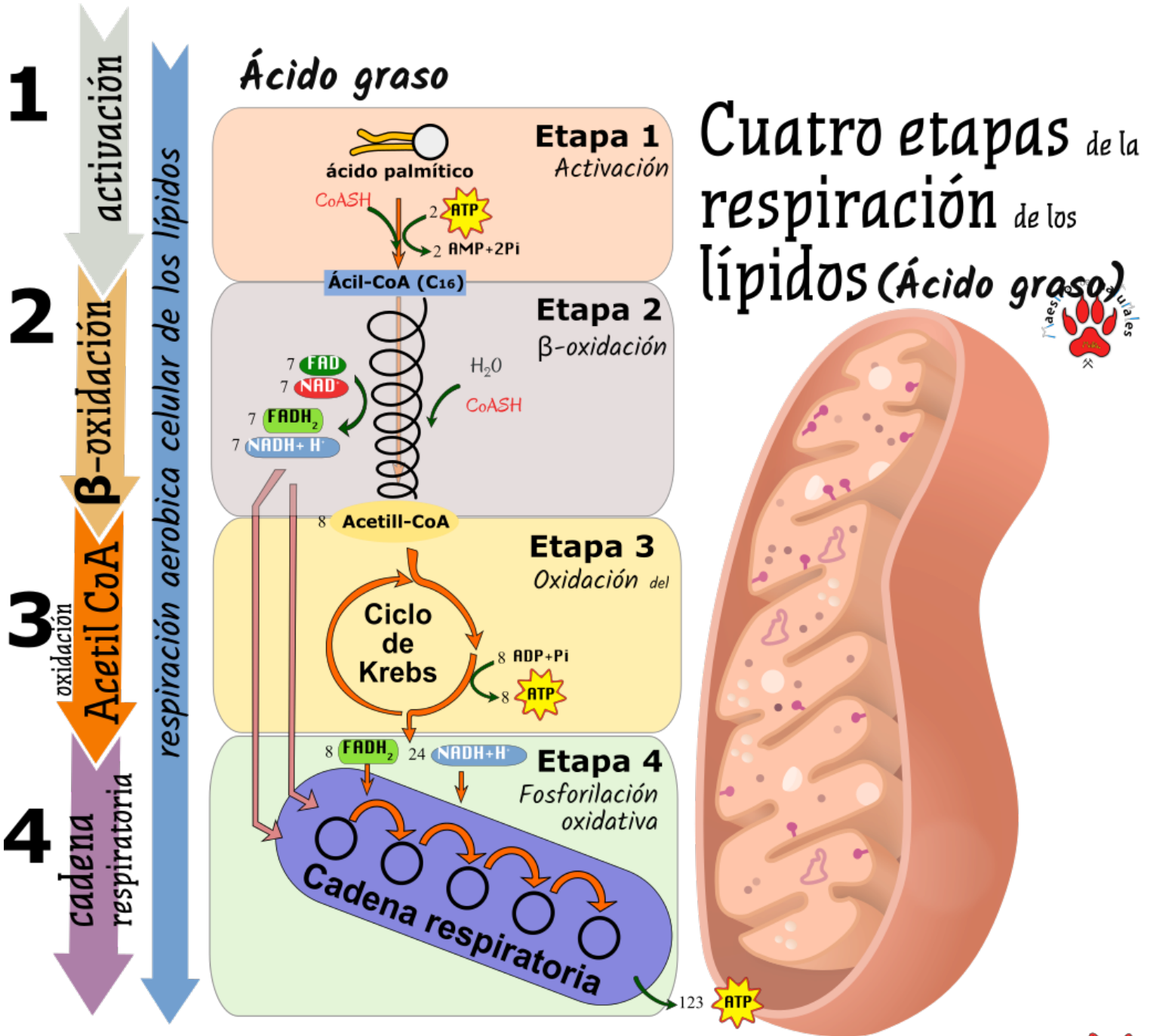
Hélice de Lynen



Ejemplo de Hélice de Lynen



Resumen de la respiración de los lípidos



Se gastan 2 ATP
 Se forman:

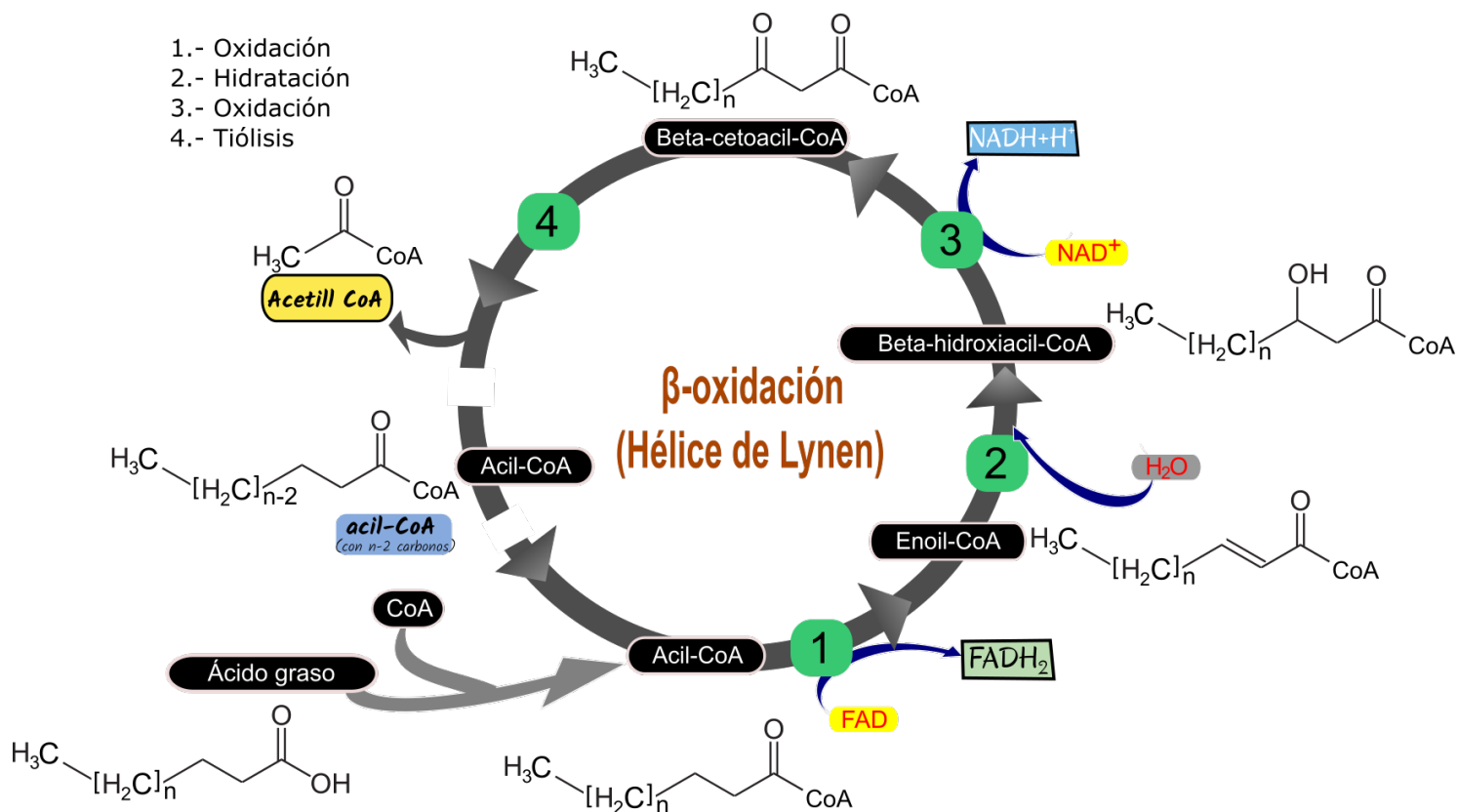
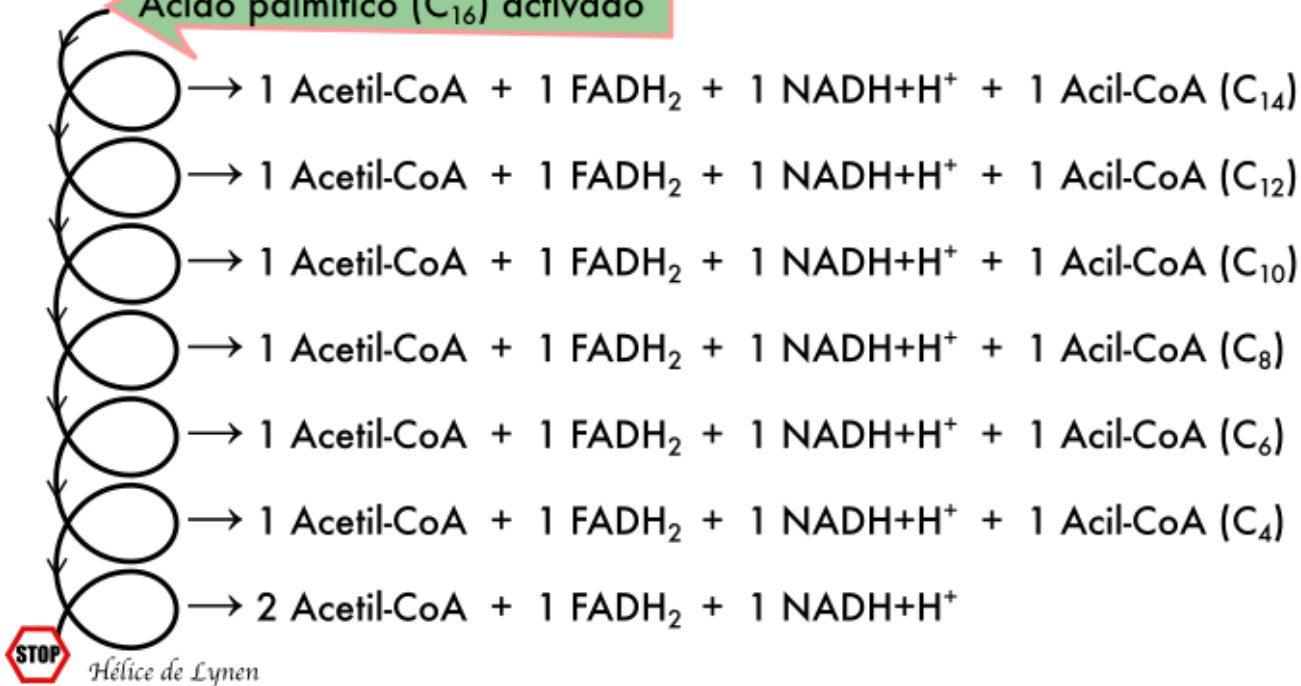
- 8 ATP a nivel de sustrato y
- 123 ATP por ATP sintetasa de esta manera:
 - Por cada FADH₂ se forman 2 ATP → 15 FADH₂ × 2 → 30 ATP
 - Por cada NADH+H⁺ se forman 3 ATP → 31 NADH+H⁺ × 3 → 93 ATP

Total: 123 ATP

¡Mirar Anexo 7!

José Manuel Huertas Suárez

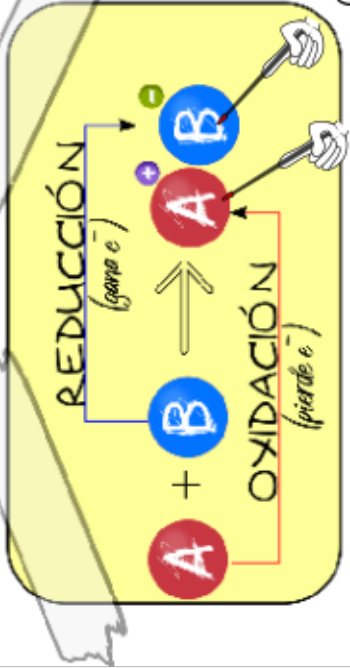
Ácido palmítico (C₁₆) activado



4 Catabolismo de las proteínas

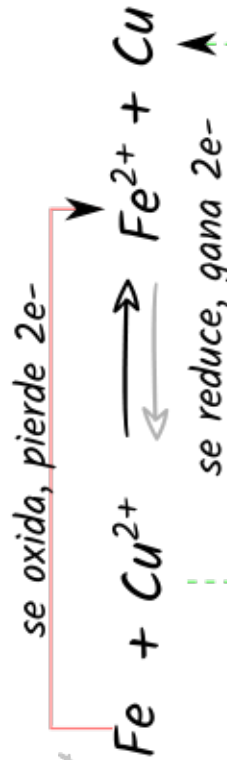
ANEXO 1

Rutas oxidación y reducción en biología



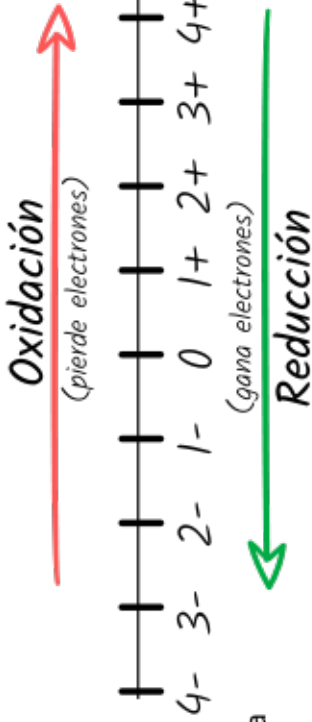
La oxidación es un proceso electroquímico por el cual un átomo o ión **pierde electrones**. Cuando un átomo o ión se oxida:

- Actúa como agente reductor (= aquel átomo o ión que pierde electrones)
- Es reducido por un agente oxidante (= aquel átomo o ión que gana electrones)
- Aumenta su estado o número de oxidación (= carga eléctrica)



La reducción es un proceso electroquímico por el cual un átomo o ión **gana electrones**. Cuando un átomo o ión se reduce:

- Actúa como agente oxidante (= aquel átomo o ión que gana electrones)
- Es reducido por un agente reductor (= aquel átomo o ión que pierde electrones)
- Disminuye su estado o número de oxidación (= carga eléctrica)



La oxidación es un proceso electroquímico por el cual un átomo o ión **pierde electrones**. Cuando un átomo o ión se oxida:

- Actúa como agente reductor (= aquel átomo o ión que pierde electrones)
- Es reducido por un agente oxidante (= aquel átomo o ión que gana electrones)
- Aumenta su estado o número de oxidación (= carga eléctrica)



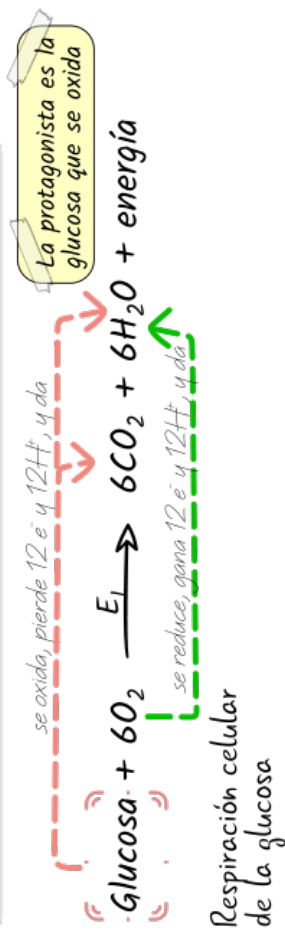
La reducción es un proceso electroquímico por el cual un átomo o ión **gana electrones**. Cuando un átomo o ión se reduce:

- Actúa como agente oxidante (= aquel átomo o ión que gana electrones)
- Es reducido por un agente reductor (= aquel átomo o ión que pierde electrones)
- Disminuye su estado o número de oxidación (= carga eléctrica)

ANEXO 2

Ejemplos de las características de las reacciones catabólicas

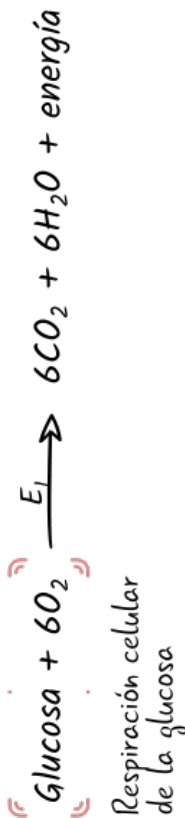
Rutas catabólicas son reacciones de oxidación



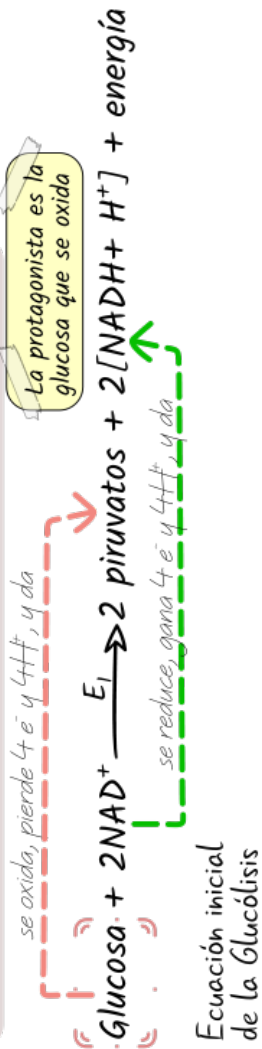
Rutas catabólicas son exergónicas



Rutas catabólicas son convergentes



Rutas catabólicas son reacciones de oxidación



Rutas catabólicas son exergónicas

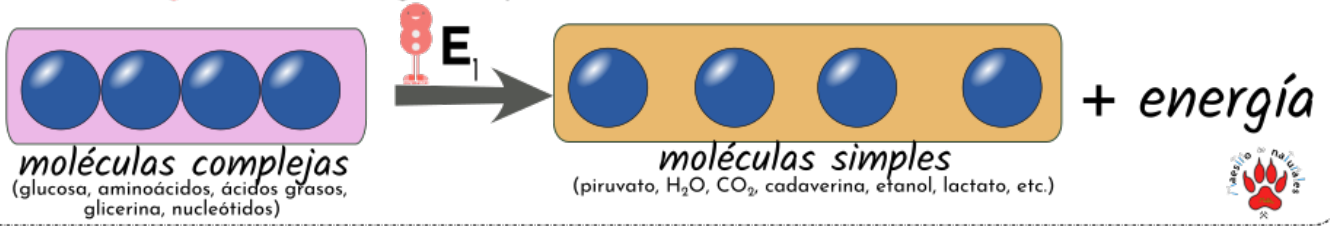


Rutas catabólicas son convergentes

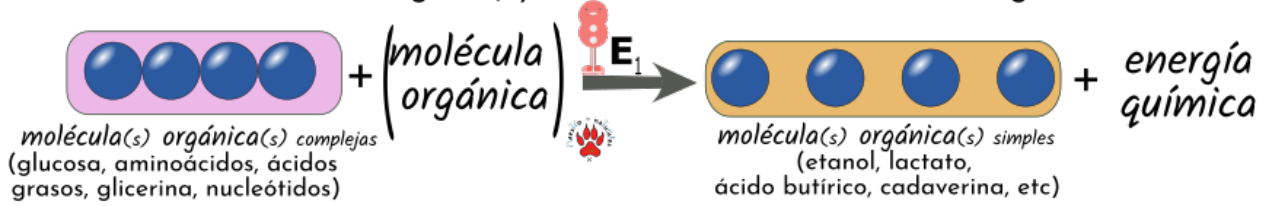


Reacciones básicas del catabolismo

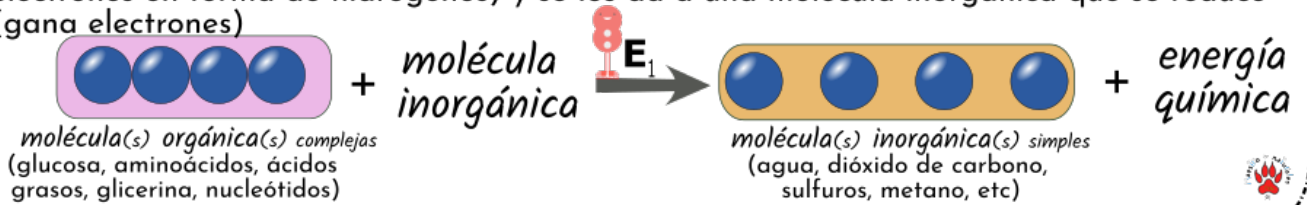
Catabolismo, degradan **grandes moléculas** a **moléculas más pequeñas** y, al hacerlo, se **libera energía**. Todo ello regulado por enzimas



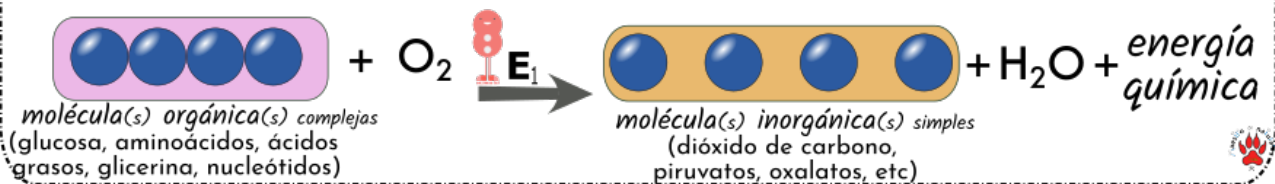
* **Fermentación**, degrada las **moléculas orgánicas complejas** a **moléculas orgánicas simples**. La molécula orgánica compleja puede oxidarse parcialmente (pérdida de algunos electrones en forma de hidrógenos) y la reducción de otra molécula orgánica.



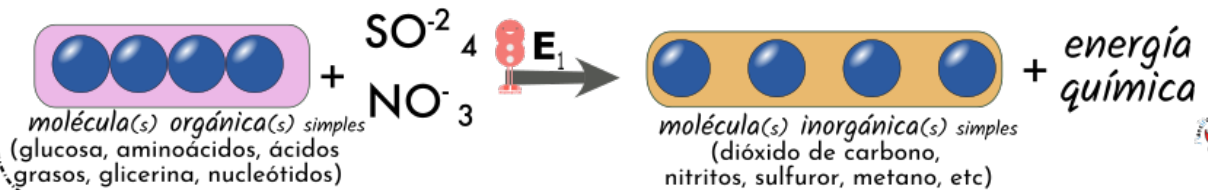
* **Respiración**, degrada las **moléculas orgánicas complejas** a **moléculas inorgánicas simples**. La molécula orgánica compleja se oxida completamente (pérdida total de sus electrones en forma de hidrógenos) y se los da a una molécula inorgánica que se reduce (gana electrones)



* **Respiración aeróbica**, transforma las **moléculas orgánicas complejas** en **moléculas inorgánicas simples** gracias a la **oxidación total** de la **molécula compleja** y la **reducción** de una **molécula de oxígeno (O₂)**



* **Respiración anaeróbica**, transforma las **moléculas orgánicas complejas** en **moléculas inorgánicas simples** gracias a la **oxidación cuasi total** de la **molécula compleja** y la **reducción** de una **molécula distinta del oxígeno (O₂)**



Ojo se suele confundir con la fermentación, porque la fermentación suele definirse de manera general y no rigurosa:

"La fermentación es un proceso anaeróbico (sin presencia de oxígeno) donde las biomoléculas complejas se oxidan parcialmente".

Esta definición también vale para la respiración anaeróbica



CADENA DE TRANSPORTE DE ELECTRONES & FOSFORILACIÓN OXIDATIVA



CADENA DE TRANSPORTE DE ELECTRONES (CTE)

TAMBIÉN CONOCIDA COMO CADENA RESPIRATORIA

Del ciclo de Krebs!!, aunque también se genera un poco de NADH en la glucólisis

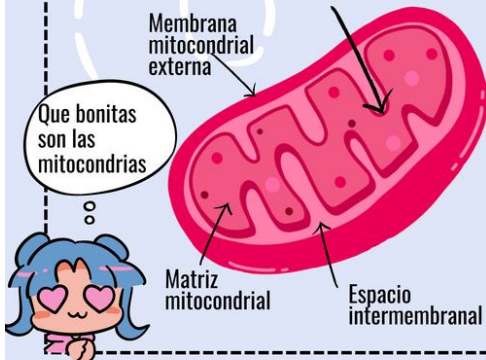
¿QUÉ ES?

Serie de proteínas y moléculas orgánicas que van transportando electrones (por medio de reacciones redox) que provienen de coenzimas reducidas (NADH y FADH₂) hasta llegar al oxígeno (el aceptor final)

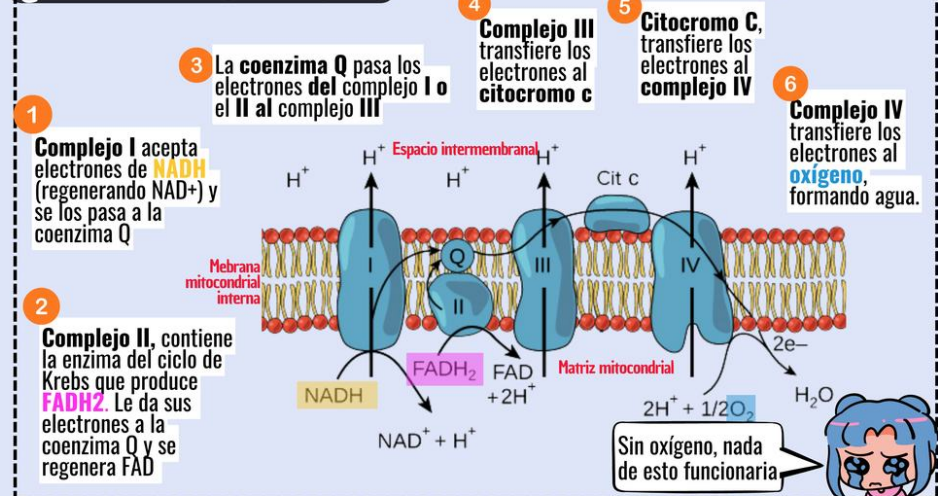
Pero, ¿De dónde vienen el NADH y el FADH₂?

¿DÓNDE?

En la membrana mitocondrial interna



¿CÓMO FUNCIONA?



INTEGRANTES

- COMPLEJO I (NADH OXIDORREDUCTASA)
- COMPLEJO II (SUCCINATO REDUCTASA)
- UBIQUINONA (COENZIMA Q)
- COMPLEJO III (Q-CITOCROMO C OXIDORREDUCTASA)
- CITOCROMO C
- COMPLEJO IV (CITOCROMO C OXIDASA)

BOMBEO DE PROTONES

Como puedes notar los complejos I, III y IV, también son bombas de protones (H⁺)...aprovechan el movimiento de e⁻ para mover H⁺ hacia afuera de la matriz

¿OXÍGENO?

Para eso necesitan el oxígeno nuestras células!...para que sea el aceptor final de la CTE y eventualmente se genere ATP (energía) en la fosforilación oxidativa

FOSFORILACIÓN OXIDATIVA

¿QUÉ ES?

Proceso que permite sintetizar ATP como resultado de la transferencia de electrones en la CTE

¿QUIÉN?

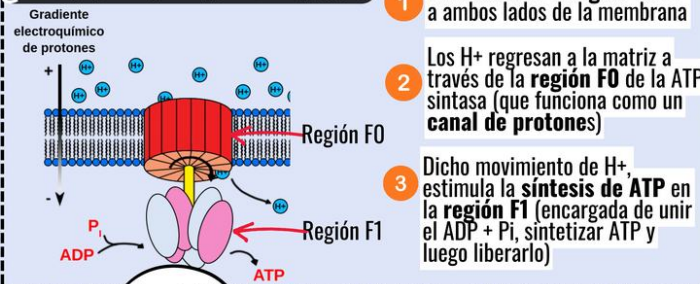
- ATP SINTASA (COMPLEJO V)

¿DÓNDE?

En la membrana mitocondrial interna



¿CÓMO FUNCIONA?



¿QUÉ OBTENEMOS?

La mayoría del ATP (energía) que la célula necesitará para realizar sus tareas

Ya siento el poder!

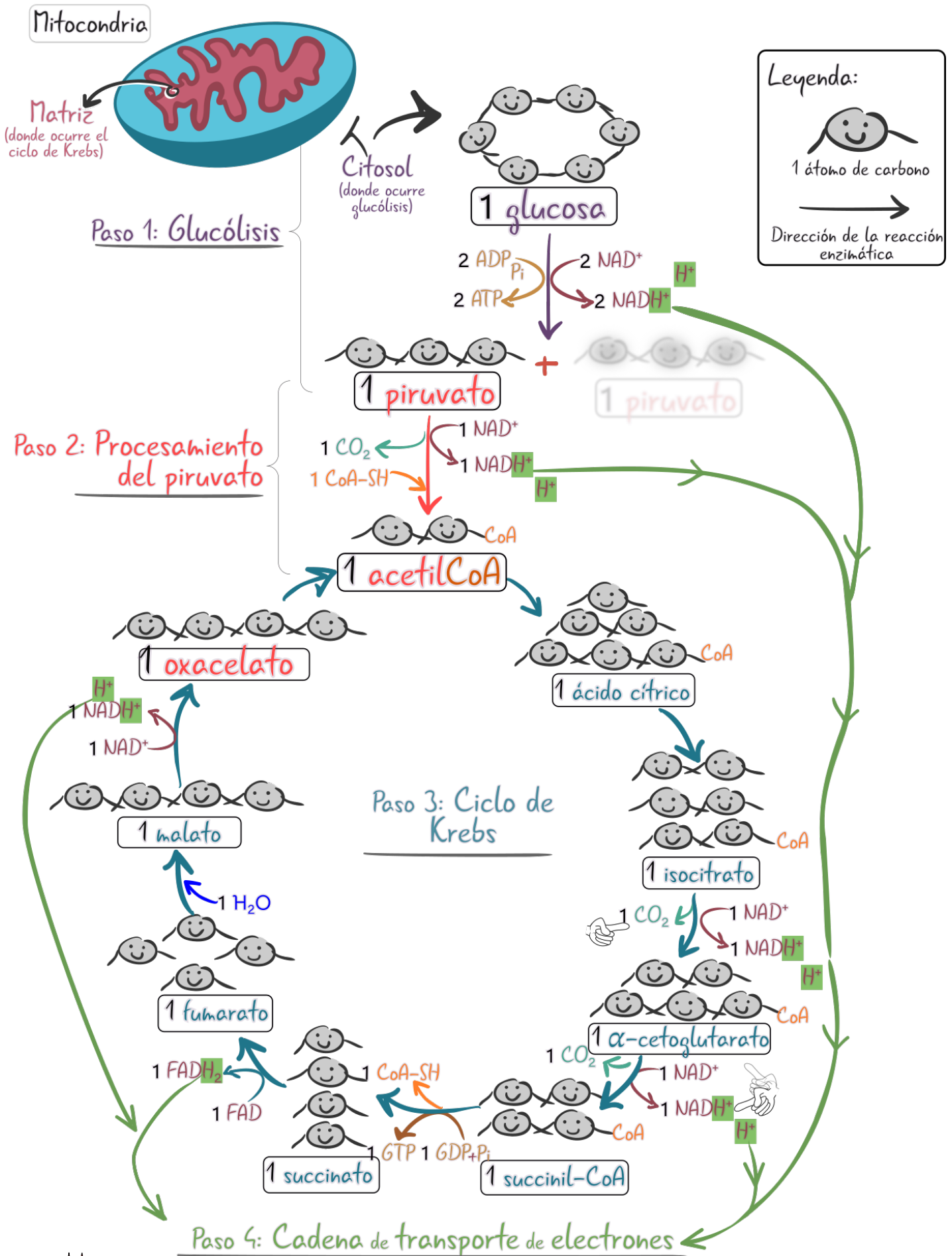
RESUMIENDO...

- Se transfieren e⁻ a la CTE
- Movimiento de e⁻ estimula bombeo de H⁺
- Los e⁻ al final son capturados por el O₂
- H⁺ regresan a la matriz por la ATP sintasa
- Lo que estimula la síntesis de ATP

Bueno, la ATP sintasa es un poco más compleja... pero eso lo veremos en otra infografía



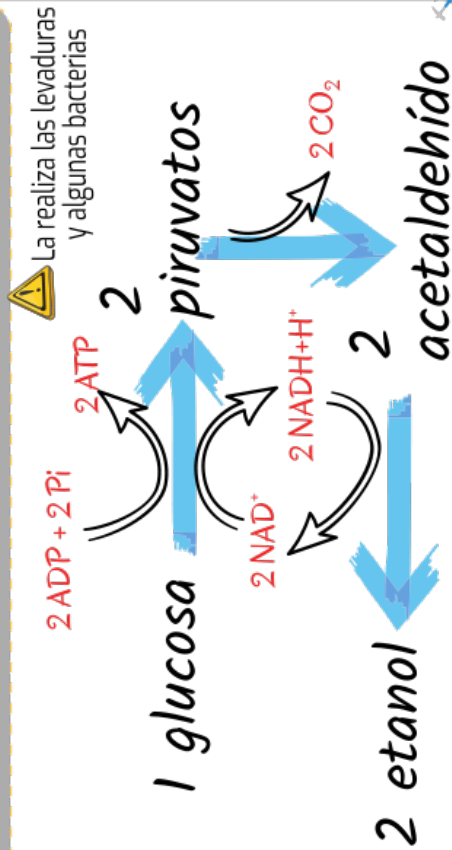
FUENTE Berg, J. M., Tymoczko, J. L., and Stryer, L. Biochemistry. (7ª ed) W.H. Freeman & Co. 2011.



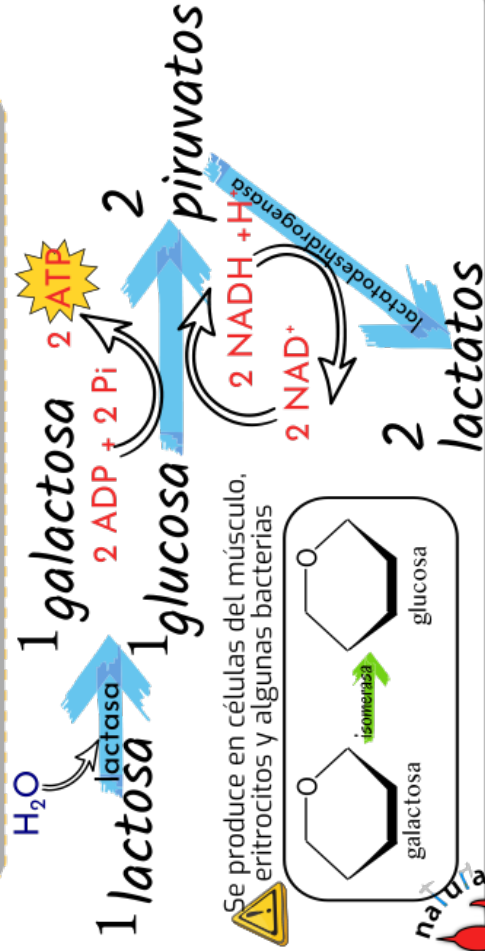
ANEXO 6

Tipos de fermentación

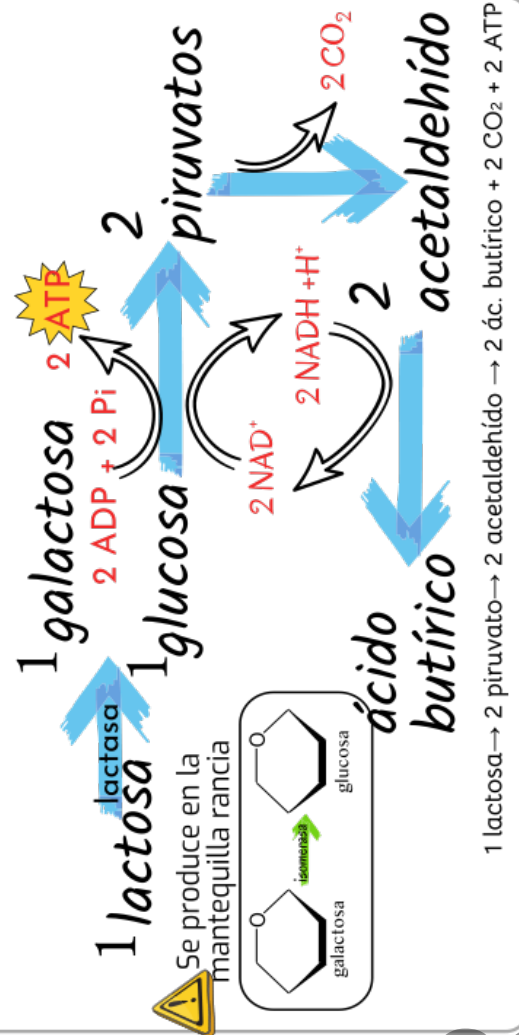
Fermentación alcohólica



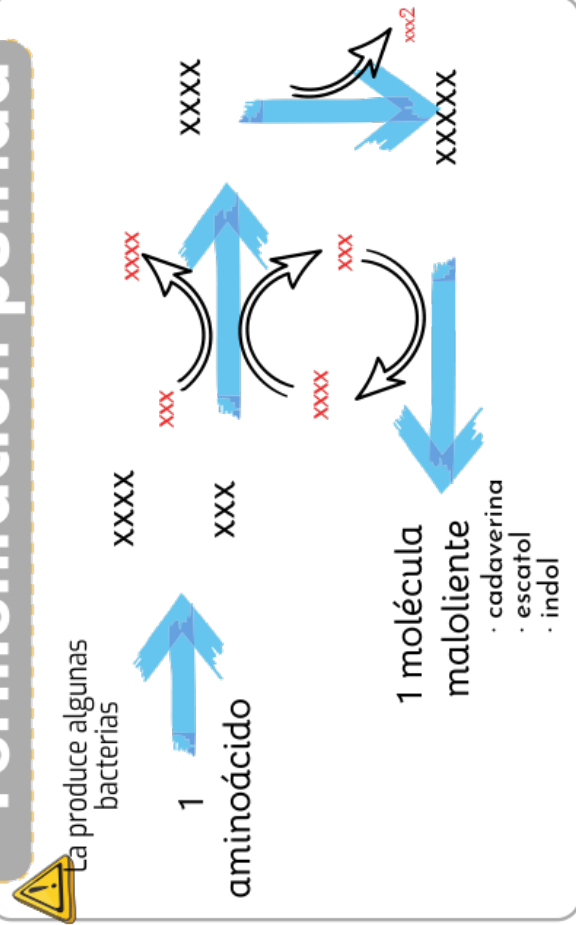
Fermentación láctica



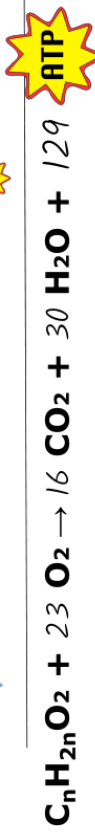
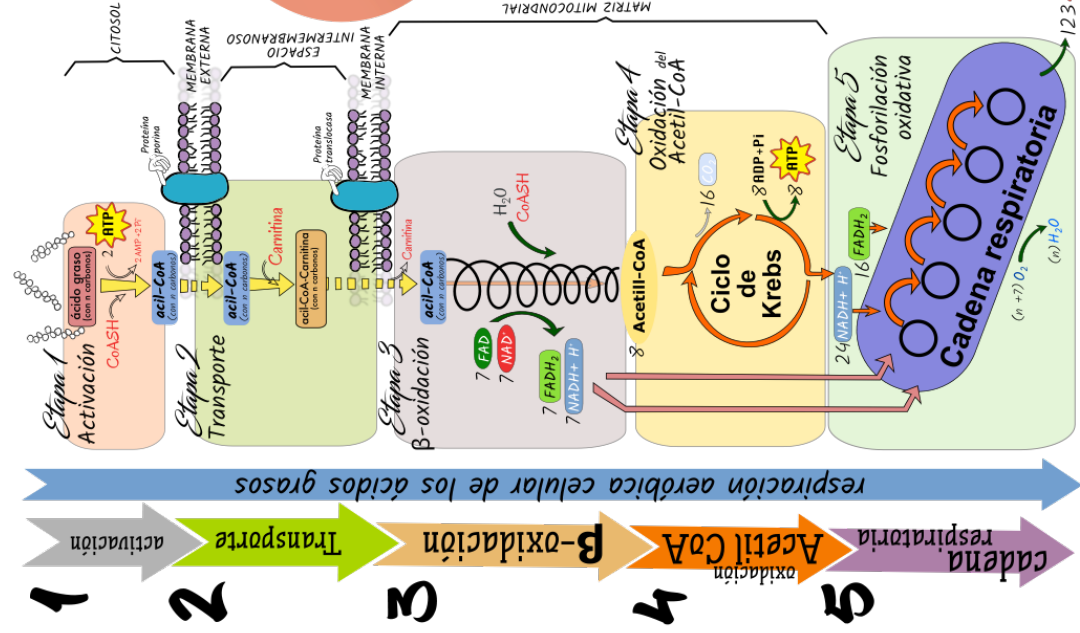
Fermentación butírica



Fermentación putrída



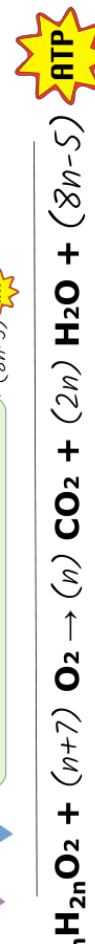
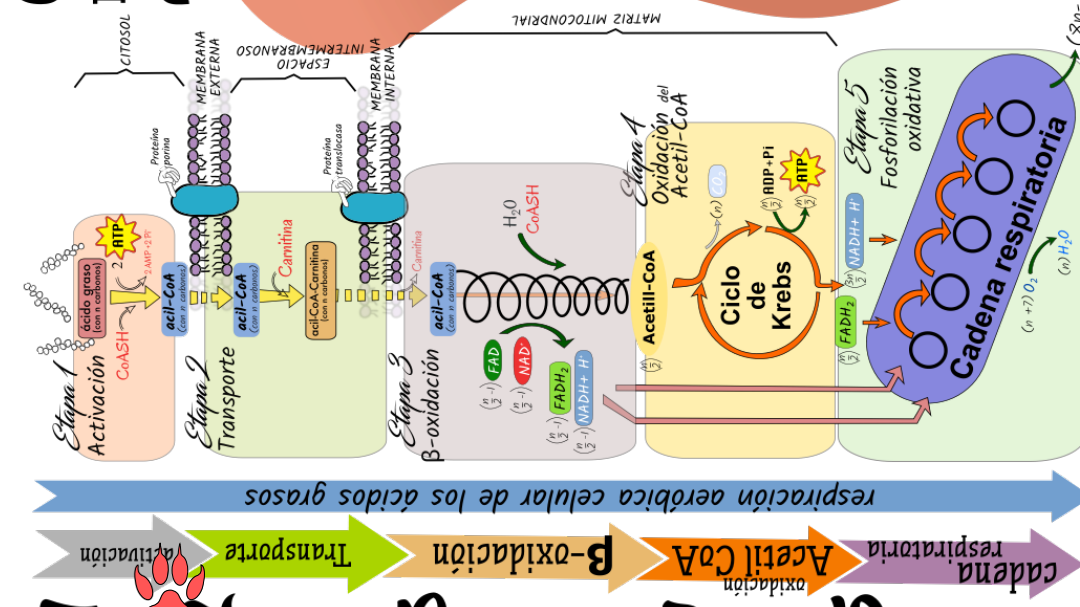
Cinco etapas de la respiración de los ácidos grasos



Se gastan 2 ATP
Se forman:

- 8 ATP en el ciclo de Krebs y
- La ATP sintetasa genera:
 - 15 FADH₂ x 2 = 30 ATP
 - 31 NADH+H⁺ x 3 = 93 ATP
 - Total: 123 ATP

Cinco etapas de la respiración de los ácidos grasos



Se gastan 2 ATP
Se forman:

- n ATP en el ciclo de Krebs y
- La ATP sintetasa genera:
 - (n-1) FADH₂ x 2 = 2 x (n-1) ATP
 - (2n-1) NADH+H⁺ x 3 = 3 x (2n-1) ATP
 - Total: 8n-5 ATP