

PAU 2026

Tema 11. Metabolismo I. Catabolismo



Academia de Ciencias Lógica

www.academiadecienciaslogica.com

1.El catabolismo.

1.1. Tipos de catabolismo.

2. El catabolismo de glúcidos.

2.1. La glucólisis.

2.2. Las fermentaciones

2.3. Respiración celular

3. Catabolismo de lípidos.

4. Catabolismo de proteínas.

5. Catabolismo de ácidos nucleicos.

AUTOEVALUACIÓN

TEMA 11. METABOLISMO I.

CATABOLISMO

1. Catabolismo

El metabolismo celular se define como el conjunto de reacciones químicas altamente reguladas que ocurren en el interior de la célula. Dentro de este, el catabolismo constituye la fase degradativa y oxidativa. Su finalidad biológica es doble: obtener energía útil para la célula y generar precursores metabólicos para la biosíntesis.

Desde un punto de vista termodinámico, el catabolismo comprende procesos exergónicos. Las grandes moléculas orgánicas (glúcidos, lípidos, proteínas), que poseen una elevada energía potencial en sus enlaces covalentes (C-C y C-H), son degradadas a moléculas más simples con menor contenido energético (CO_2 , H_2O , NH_3). La energía libre liberada durante esta ruptura no se disipa totalmente como calor, sino que se acopla a la síntesis de enlaces fosfato de alta energía, principalmente en forma de ATP (adenosín trifosfato).

Además de energía química, el catabolismo genera poder reductor. Las oxidaciones biológicas implican la pérdida de electrones (y protones) de los sustratos orgánicos. Estos electrones son captados por coenzimas oxidadas (NAD^+ , FAD, NADP^+), que se reducen (NADH , FADH_2 , NADPH) y conservan la energía de los electrones transferidos para su uso posterior.

1.1. TIPOS DE CATABOLISMO

La clasificación metabólica del catabolismo se fundamenta en la naturaleza del aceptor final de los electrones liberados durante la oxidación del sustrato:

1. Respiración: Es el proceso catabólico en el que el aceptor final de electrones es una molécula inorgánica. Esta característica permite una oxidación completa del sustrato hasta materia inorgánica, liberando la máxima cantidad de energía posible.

- Respiración aerobia: El aceptor final es el oxígeno molecular (O_2), que al reducirse forma agua (H_2O). Es la ruta predominante en eucariotas y la más eficiente energéticamente.
- Respiración anaerobia: El aceptor final es una molécula inorgánica distinta del oxígeno, como el nitrato (NO_3^-), el sulfato (SO_4^{2-}) o el carbonato. Es exclusiva de ciertos grupos de procariotas y no debe confundirse con la fermentación.

2. Fermentación: Es un proceso catabólico en el que el aceptor final de electrones es una molécula orgánica (generalmente un derivado del propio sustrato). Al no intervenir una cadena de transporte de electrones externa, la oxidación del sustrato es incompleta y el rendimiento energético es bajo.

2. EL CATABOLISMO DE GLÚCIDOS

Los glúcidos, y específicamente la glucosa, constituyen el combustible metabólico primario de la mayoría de las células. La degradación completa de un mol de glucosa ($C_6H_{12}O_6$) hasta CO_2 y agua libera una energía libre de $\Delta G^0 = -686 \text{ kcal/mol}$.

2.1 LA GLUCÓLISIS (RUTA DE EMBDEN-MEYERHOF)

Una molécula de glucosa (6C) se oxida parcialmente para dar lugar a dos moléculas de **piruvato** (3C). Se consume ATP en la fase preparatoria, pero se obtiene un beneficio neto de 2 ATP mediante fosforilación a nivel de sustrato.

Localización: Citosol (en todas las células).

Tipo: anaerobia.

Balance global:



Etapas:

Consta de 10 reacciones enzimáticas que se agrupan en dos fases funcionales:

1. **Fase preparatoria o de inversión energética:** La glucosa es activada mediante fosforilación. Se consumen 2 moléculas de ATP para aumentar la inestabilidad de la molécula y facilitar su ruptura. La glucosa se transforma en fructosa-1,6-bisfosfato, que posteriormente se rompe en dos triosas fosfato (gliceraldehído-3-fosfato).
2. **Fase de beneficios o rendimiento energético:** Las dos moléculas de triosa sufren oxidaciones y reordenamientos que liberan energía. En esta fase se generan:
 - 4 ATP mediante fosforilación a nivel de sustrato.
 - 2 NADH procedentes de la oxidación del gliceraldehído-3-fosfato.
 - 2 moléculas de Piruvato como producto final.

2.2 LAS FERMENTACIONES

En condiciones de anaerobiosis (ausencia de O_2), la cadena de transporte de electrones mitocondrial no funciona. Esto plantea un problema crítico para la célula: el NADH formado en la glucólisis se acumula y el NAD^+ se agota. Sin NAD^+ , la glucólisis se detiene por falta de coenzima oxidada. La fermentación soluciona este bloqueo. Su objetivo biológico no es producir más ATP, sino reoxidar el NADH a NAD^+ . De esta forma, se asegura que la glucólisis pueda continuar generando sus modestos 2 ATP por molécula de glucosa. El rendimiento energético es bajo porque el producto final (etanol, lactato) es una molécula orgánica que todavía conserva gran cantidad de energía en sus enlaces.

Localización: Citosol.

Tipo: Anaerobio.

1. Fermentación Alcohólica

Es propia de levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* y ciertas bacterias. El piruvato sufre dos transformaciones:

1. **Descarboxilación:** El piruvato libera una molécula de CO_2 y se convierte en acetaldehído (2C).
2. **Reducción:** El acetaldehído acepta los electrones del NADH, reduciéndose a etanol. Este proceso es la base de la industria de bebidas alcohólicas (vino, cerveza) y la panadería (donde el CO_2 es el agente leudante).

2. Fermentación Láctica

Realizada por bacterias del género *Lactobacillus* y por el tejido muscular esquelético en hipoxia. El piruvato se reduce directamente a lactato (3C) aceptando los electrones del NADH. No hay producción de gas (CO_2). Es fundamental en la producción de derivados lácteos (yogur) y causa la fatiga muscular transitoria (agujetas se atribuyen a microlesiones, no a la cristalización del lactato como se creía antiguamente).

2.3 RESPIRACIÓN CELULAR

En presencia de oxígeno, las células eucariotas transportan el piruvato al interior de la mitocondria para completar su oxidación. Este proceso consta de tres etapas secuenciales:

DESCARBOXILACIÓN OXIDATIVA DEL PIRUVATO

Localización: Matriz mitocondrial

Tipo: aerobia.

Balance global:

$\text{Piruvato} + \text{NAD}^+ + \text{CoA-SH} \rightarrow \text{Acetil-CoA} + \text{NADH} + \text{H}^+ + \text{CO}_2$ (Por molécula de Piruvato. Por molécula de Glucosa, es el doble)

Etapas:

El piruvato llega a la matriz. Allí, un complejo multienzimático (la Piruvato Deshidrogenasa) cataliza una reacción irreversible en la que:

1. Se elimina el grupo carboxilo del piruvato como CO_2 (primera descarboxilación).
2. Se oxida el resto de la molécula, reduciendo NAD^+ a NADH.
3. El grupo acetilo (2C) resultante se une a la Coenzima A, formando **Acetil-CoA**.

CICLO DE KRES

Localización: Matriz mitocondrial

Tipo: Aerobia.

Balance global:

$\text{Acetil-CoA} + 3\text{NAD}^+ + \text{FAD} + \text{GDP} + \text{P}_i + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{GTP} + 2\text{H}^+ + 3\text{NADH} + \text{FADH}_2 + 2\text{CO}_2 + \text{CoA-SH}$ (Por molécula de Acetil-CoA. Por molécula de Glucosa, es el doble)

Etapas:

El ciclo de Krebs consta de 8 reacciones enzimáticas: El ciclo comienza cuando el Acetil-Co (2C) transfiere su grupo acetilo al Oxalacetato (4C) para formar Citrato (6C). A través de una serie de reacciones, el citrato se degrada nuevamente hasta oxalacetato, cerrando el ciclo.

1. **Formación de Citrato:** El ciclo comienza cuando la **citrato sintasa** une el grupo acetilo (2 carbonos) del Acetil-CoA con el oxalacetato (4 carbonos) para formar citrato (6 Carbonos).
2. **Formación de Isocitrato:** La enzima aconitasa reorganiza los átomos del citrato. Primero lo deshidrata y luego lo rehidrata para convertirlo en su isómero, el isocitrato.
3. **Oxidación del Isocitrato:** La isocitrato deshidrogenasa oxida el isocitrato. Aquí perdemos el primer CO_2 y generamos el primer NADH. El resultado es el α -cetoglutarato.
4. **Oxidación del α -cetoglutarato:** La α -cetoglutarato deshidrogenasa vuelve a hacer de las suyas: libera el segundo CO_2 y produce otro NADH. Al final, se une una Coenzima A para formar Succinil-CoA.
5. **Fosforilación a nivel de sustrato:** La succinil-CoA sintetasa rompe el enlace con la Coenzima A. La energía liberada se usa para fabricar GTP (que la célula convierte fácilmente en ATP). Nos queda el succinato.
6. **Oxidación del Succinato:** La succinato deshidrogenasa (que también forma parte de la cadena de transporte de electrones) oxida el succinato a fumarato. En este paso se produce FADH_2 .
7. **Hidratación del Fumarato:** La enzima fumarasa añade una molécula de agua al fumarato, transformándolo en malato.
8. **Oxidación del Malato:** Finalmente, la malato deshidrogenasa oxida el malato para regenerar el oxalacetato. En este último suspiro, se genera el tercer y último NADH.

FOSFORILACIÓN OXIDATIVA

Al terminar el Ciclo de Krebs, si miraras dentro de la mitocondria, solo encontraríamos 4 ATP (o GTP) en efectivo. El resto de la energía (los otros 34 ATP) no son ATP todavía, son "vales" o "cheques" llamados NADH y FADH₂. La cadena de transporte sirve para **convertir** los 10 NADH y 2 FADH₂ en los **34 ATP** restantes.

Localización: membrana mitocondrial interna

Tipo: Aerobia.

Etapas: Es la etapa final donde se sintetiza la mayor parte del ATP. Tiene lugar en la e integra dos procesos acoplados:

1. **Cadena respiratoria:** Los electrones de alto nivel energético del NADH y FADH₂ son cedidos a una serie de transportadores proteicos (Complejos I, II, III y IV). Los electrones fluyen "cuesta abajo" energéticamente hasta el oxígeno molecular, que se reduce captando protones para formar agua.
2. **Quimiósmosis:** La energía liberada por el flujo de electrones es utilizada por los complejos I, III y IV para bombear protones (H⁺) desde la matriz hacia el espacio intermembrana contra gradiente. Esto genera una fuerza protón-motriz (gradiente electroquímico). Los protones regresan a la matriz fluyendo a través del canal de la ATP- sintasa, cuya rotación impulsa la fosforilación del ADP a ATP.

Estado del proceso	ATP en "Efectivo"	"Cheques" (NADH/FADH ₂)
Antes de la Cadena	4 ATP	10 NADH + 2 FADH ₂
Después de la Cadena	38 ATP (4 + 34 convertidos)	0 (ya se canjearon)

Balance Energético de la Respiración Celular Aeróbica (Glicólisis + Descarboxilación oxidativa del Piruvato + ciclo de Krebs, después de canjear NADH y FADH₂ por ATP en la cadena de transporte de electrones)

Etapa	Productos por Glucosa	Total por Etapa
Glucólisis (Citosol)	2 ATP (netos)	2 ATP
	2 NADH	6 ATP
Descarboxilación Oxidativa del Piruvato (Matriz)	2 NADH	6 ATP
Ciclo de Krebs (Ciclo del Ácido Cítrico)	2 ATP	2 ATP
	6 NADH	18 ATP
	2 FADH ₂	4 ATP
TOTAL MÁXIMO TEÓRICO		38 ATP

3. EL CATABOLISMO DE LÍPIDOS

Los lípidos, específicamente los triglicéridos, son reservas energéticas altamente eficientes debido a que sus carbonos están más reducidos que los de los glúcidos y se almacenan en forma anhidra.

Activación y transporte

Antes de su oxidación, los ácidos grasos deben activarse en el **citosol** uniéndose a la Coenzima A (consumiendo el equivalente a 2 ATP) para formar Acil-CoA. Dado que la membrana mitocondrial interna es impermeable a los ácidos grasos de cadena larga, estos son transportados a la matriz mediante la lanzadera de **carnitina**.

β-oxidación de los ácidos grasos (Hélice de Lynen)

Ya en la **matriz mitocondrial**, el Acil-CoA experimenta una secuencia cíclica de cuatro reacciones (oxidación, hidratación, oxidación, tiólisis) conocida como β-oxidación. Se denomina así porque la oxidación ocurre en el carbono β (el carbono 3).

En cada vuelta del ciclo se produce:

1. La liberación de un fragmento de dos carbonos en forma de Acetil-CoA.
2. La formación de 1 NADH y 1 FADH₂.
3. Un Acil-CoA acortado en dos carbonos, que reinicia el ciclo.

Todos los Acetil-CoA producidos ingresan al Ciclo de Krebs para su oxidación total, y las coenzimas reducidas (NADH, FADH₂) van a la cadena respiratoria. El rendimiento energético es muy superior al de los glúcidos (ej. un ácido graso de 16C (Ac. Palmítico) produce 129 ATP brutos, frente a los 38 de la glucosa).

Un ácido graso de 16 carbonos pasa por el proceso de "corte" varias veces. El número de vueltas es $n / 2 - 1$, donde n es el número de carbonos.

- Vueltas: $16 / 2 - 1 = 7$ vueltas
- En cada vuelta se produce 1 NADH y 1 FADH₂.
- Producción: 7 NADH por 3 ATP = 21 ATP
- 7 FADH₂ por 2 ATP = 14 ATP
- Subtotal: 35 ATP

Oxidación de los Acetil-CoA (Ciclo de Krebs): Al final de la β -oxidación, la cadena de 16 carbonos se ha dividido en fragmentos de 2 carbonos.

- **Acetil-CoA producidos:** $16 / 2 = 8$ moléculas
- Cada Acetil-CoA que entra al Ciclo de Krebs produce **12 ATP**
- **Producción:** 8 Acetil-CoA por 12 ATP = 96 ATP

Balance Total (Rendimiento Neto)

Sumamos todo lo generado y restamos la inversión inicial:

Concepto	Cálculo	ATP
Activación	Gasto inicial	-2
β -oxidación (7 vueltas)	7 NADH + 7 FADH ₂	+35
Ciclo de Krebs (8 Acetil-CoA)	8 por 12 ATP	+96
TOTAL NETO		129 ATP

4. EL CATABOLISMO DE PROTEÍNAS

El catabolismo de proteínas no es la ruta preferente para la obtención de energía, reservándose para situaciones de ayuno prolongado, inanición o dieta hiperproteica.

Catabolismo de aminoácidos

Los aminoácidos no se degradan intactos; primero deben separarse de su grupo amino (nitrogenado).

1. Transaminación: El grupo amino (NH_2) de un aminoácido es transferido a un α -cetoácido (usualmente α -cetoglutarato), transformándose este en glutamato y quedando el esqueleto carbonado libre.
2. Desaminación oxidativa: El glutamato formado libera el grupo amino en forma de ion amonio (NH_4^+) regenerando el α -cetoglutarato. El esqueleto carbonado resultante (cetoácido) se incorpora al metabolismo energético en diversos puntos del Ciclo de Krebs o glucólisis, clasificándose los aminoácidos en glucogénicos o cetogénicos según su punto de entrada. El ion amonio es altamente tóxico para el sistema nervioso. En organismos ureotélicos (como lo mamíferos), el hígado lo procesa a través del Ciclo de la Urea, convirtiéndolo en urea, una molécula neutra e hidrosoluble que se elimina por el riñón.

5. EL CATABOLISMO DE ÁCIDOS NUCLEÍCOS

Aunque los ácidos nucleicos se renuevan constantemente, su aporte energético es marginal. Las nucleasas hidrolizan ADN y ARN hasta nucleótidos.

- El grupo fosfato se reutiliza.
- Las pentosas entran en la vía de las pentosas fosfato o glucólisis.
- Las bases nitrogenadas tienen rutas degradativas específicas: las purinas se degradan a ácido úrico (cuya acumulación produce gota) y las pirimidinas a urea o derivados de Acetil-CoA.

Preguntas competenciales

PAU - 2026

PREGUNTA COMPETENCIAL 1

En una planta de producción de bioetanol se cultivan levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) en un tanque con abundante glucosa. Inicialmente, el tanque se mantiene aireado, pero en una segunda fase se cierra herméticamente para cortar el suministro de oxígeno. a) Explique razonadamente qué ruta metabólica predominará en cada fase del proceso. b) Se observa que, tras cerrar el tanque, el consumo de glucosa por parte de las levaduras aumenta drásticamente aunque su tasa de división no varía. Justifique este fenómeno basándose en el rendimiento energético de ambas rutas.

PREGUNTA COMPETENCIAL 2

Los eritrocitos (glóbulos rojos) son células altamente especializadas que, durante su maduración, pierden las mitocondrias para maximizar el espacio disponible para la hemoglobina. a) Indique qué ruta catabólica utilizan estas células para obtener ATP y cuál es el producto final de carbono que vierten al plasma sanguíneo. b) ¿Podría un eritrocito oxidar ácidos grasos si se le suministrara suficiente oxígeno? Justifique su respuesta basándose en la localización celular de la β -oxidación.

PREGUNTA COMPETENCIAL 3

El cianuro es un potente veneno que actúa inhibiendo irreversiblemente el Complejo IV (citocromo oxidasa) de la cadena de transporte de electrones mitocondrial. a) Explique por qué la intoxicación con cianuro provoca la detención inmediata del Ciclo de Krebs, a pesar de que ninguna enzima de este ciclo utiliza oxígeno directamente. b) ¿Qué ocurrirá con los niveles intracelulares de NADH y NAD⁺ tras la intoxicación?

PREGUNTA COMPETENCIAL 4

Durante una prueba de 400 metros lisos, el aporte de oxígeno a los músculos de las piernas es insuficiente para mantener el ritmo de fosforilación oxidativa demandado. a) Nombre el proceso metabólico alternativo que se activa en el citosol de los miocitos. b) Bioquímicamente, ¿cuál es la finalidad de reducir el piruvato a lactato si este paso no produce ATP adicional?

PREGUNTA COMPETENCIAL 5

Las reservas energéticas de las semillas oleaginosas (como el girasol) son principalmente triglicéridos, mientras que en tubérculos (como la patata) son almidón. a) Si comparamos 1 gramo de ácido graso (ej. ácido palmítico) con 1 gramo de glucosa, el lípido rinde más del doble de energía (ATP). Justifique este hecho basándose en el estado de oxidación de los átomos de carbono de ambas moléculas. b) Indique brevemente qué ruta deben seguir los ácidos grasos antes de incorporarse al Ciclo de Krebs.

PREGUNTA COMPETENCIAL 6

En la elaboración tradicional del pan, se deja reposar la masa (harina, agua y levadura) antes de hornearla para que "suba" o aumente de volumen. a) Identifique la reacción química concreta responsable del hinchamiento de la masa. Nombre el sustrato, el producto gaseoso y la enzima implicada. b) ¿Por qué el pan resultante no contiene alcohol si este es un producto de la fermentación?

RESPUESTAS DE LAS PREGUNTAS COMPETENCIALES

RESPUESTA COMPETENCIAL 1

a) Fase aireada: Respiración celular aerobia (Glucólisis + Ciclo de Krebs + Cadena Respiratoria). Fase cerrada: Fermentación alcohólica.

b) Este fenómeno se conoce como Efecto Pasteur. La respiración aerobia rinde 30-32 ATP por glucosa, mientras que la fermentación solo rinde 2 ATP. Para mantener la misma cantidad de ATP necesaria para sobrevivir, la levadura debe consumir mucha más glucosa (unas 15-16 veces más) cuando está en anaerobiosis debido al bajo rendimiento de la fermentación.

RESPUESTA COMPETENCIAL 2

a) Utilizan exclusivamente la fermentación láctica. El producto final es lactato (ácido láctico).

b) No. La β -oxidación de los ácidos grasos ocurre estrictamente en la matriz mitocondrial (o peroxisomas). Al carecer de mitocondrias, los eritrocitos no tienen la maquinaria enzimática necesaria para degradar lípidos, dependiendo exclusivamente de la glucosa.

RESPUESTA COMPETENCIAL 3

a) El Ciclo de Krebs necesita coenzimas oxidadas (NAD^+ y FAD) para funcionar. Normalmente, estas se regeneran cuando el NADH y FADH_2 ceden sus electrones a la cadena respiratoria. Si la cadena se bloquea por el cianuro, no hay reoxidación. Sin NAD^+ y FAD disponibles, el Ciclo de Krebs se detiene por falta de sustrato coenzimático (acoplamiento funcional).

b) Aumentarán drásticamente los niveles de NADH (forma reducida) y disminuirán los de NAD^+ (forma oxidada), llevando al colapso energético.

RESPUESTA COMPETENCIAL 4

a) Fermentación láctica.

b) La finalidad no es energética per se, sino reciclar el cofactor redox. Es necesario reoxidar el NADH generado en la glucólisis a NAD^+ para que este pueda volver a ser utilizado en la etapa de oxidación del gliceraldehído-3-fosfato. Si no se regenerara el NAD^+ , la glucólisis se detendría y la célula se quedaría sin ATP.

RESPUESTA COMPETENCIAL 5

a) Los carbonos de los ácidos grasos son cadenas hidrocarbonadas ($-\text{CH}_2-$) muy reducidas (ricos en hidrógeno). Los carbonos de la glucosa (CH_2O) ya están parcialmente oxidados (unidos a oxígeno). Al estar más reducidos, los lípidos tienen más electrones que ceder a las coenzimas (NAD^+/FAD) durante su oxidación, generando más poder reductor y, en última instancia, más ATP.

b) Deben sufrir la β -oxidación (Hélice de Lynen) en la mitocondria, rompiéndose en fragmentos de 2 carbonos (Acetil-CoA), que es la molécula que entra al Ciclo de Krebs.

RESPUESTA COMPETENCIAL 6

a) Es la descarboxilación del piruvato. El sustrato es el piruvato (procedente de la glucólisis), el producto gaseoso es CO_2 (dióxido de carbono) y la enzima es la piruvato descarboxilasa. El gas atrapado en la masa es lo que la hace subir.

b) El etanol generado es un compuesto volátil. Durante la cocción en el horno, las altas temperaturas provocan su evaporación total.