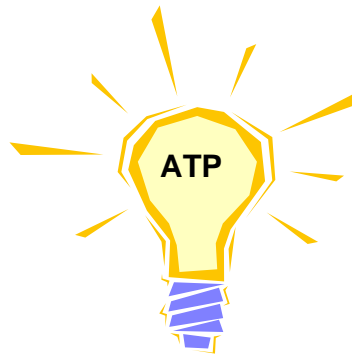


TEMA 4

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN LOS MICROORGANISMOS



PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN LOS MICROORGANISMOS. Principales fuentes de energía utilizados por los microorganismos. Importancia de los procesos metabólicos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

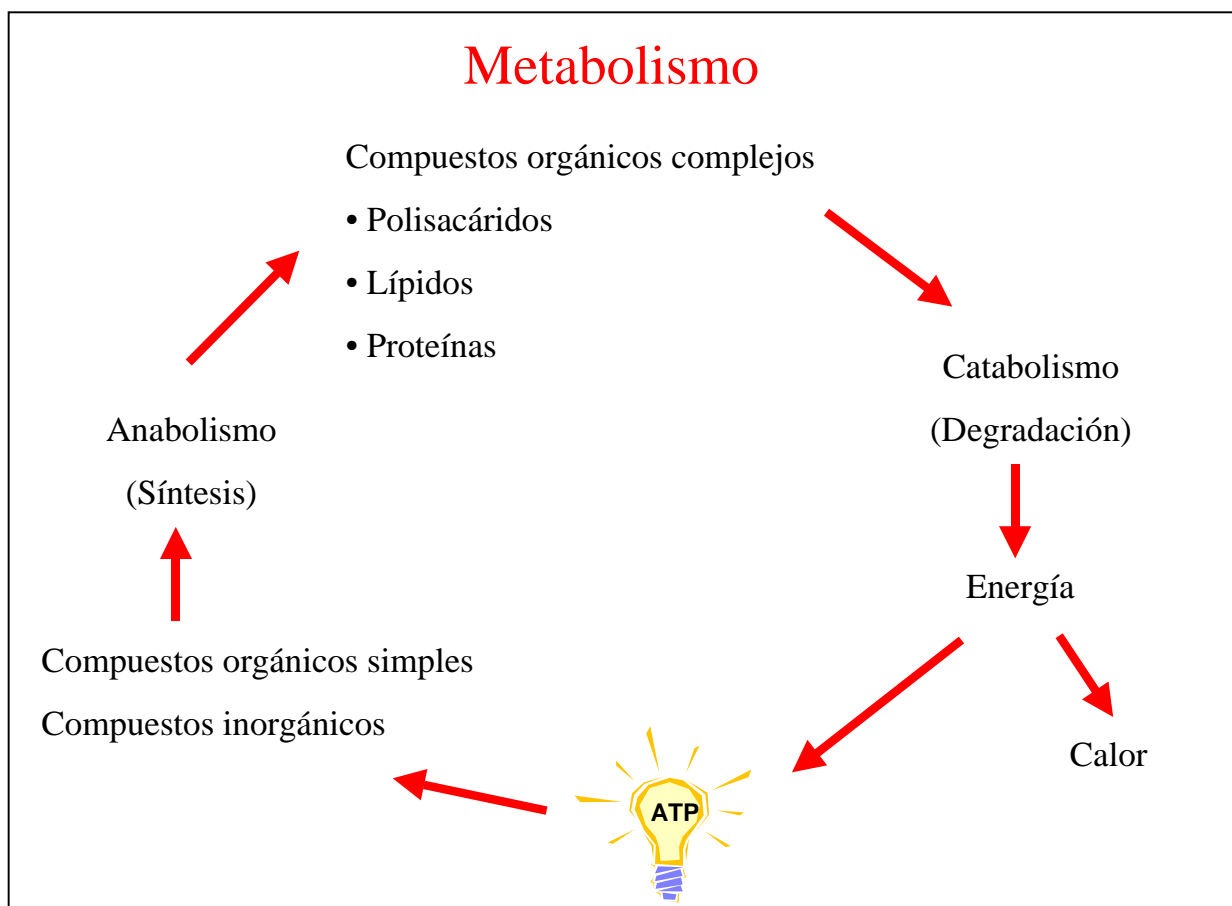
Al finalizar el tema el estudiante podrá:

1. Señalar la importancia de los procesos de producción de energía de los microorganismos.
2. Clasificar los microorganismos de acuerdo con la fuente de energía y la fuente de carbono que utilizan y dar la definición de cada categoría.
3. Clasificar los microorganismos, según sus requerimientos de oxígeno y **definir** cada categoría.
4. Indicar los procesos de producción de energía de las diferentes categorías de microorganismos.
5. Explicar el efecto del oxígeno sobre las diferentes categorías de anaerobios.
6. Señalar la importancia de la vía glicolítica, la vía de las pentosas, el ciclo de Krebs, la cadena de transporte electrónico y la fosforilación oxidativa en los procesos de producción de energía de los microorganismos.
7. Comparar el rendimiento energético de los procesos fermentativo y respiratorio.

8. Destacar la importancia de los procesos metabólicos de los microorganismos en los métodos de aislamiento e identificación, aplicaciones industriales, deterioro microbiano y patogenicidad.

Las fuentes de energía (compuestos químicos o luz) utilizadas por las diferentes clases de microorganismos y la forma como ellos las utilizan son muy variadas, pero cualquiera que sea el sustrato y el mecanismo bioquímico empleado por los microorganismos para su utilización, el objetivo final común es la obtención de energía, la cual es convertida en ATP, que es el mediador de muchas de las transferencias metabólicas de energía del catabolismo y el anabolismo.

Las fuentes de elementos químicos y energía necesarias por los microorganismos para sintetizar sus compuestos bioquímicos deben estar disponibles en su ambiente y listos para ser usados. Las fuentes orgánicas incluyen un gran número de compuestos que van desde moléculas de 2 átomos de carbono hasta moléculas más complejas tales como el almidón, el cual contiene miles de átomos de carbono. Las fuentes inorgánicas incluyen el dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otras moléculas.



CLASIFICACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS DE ACUERDO CON LA FUENTE DE

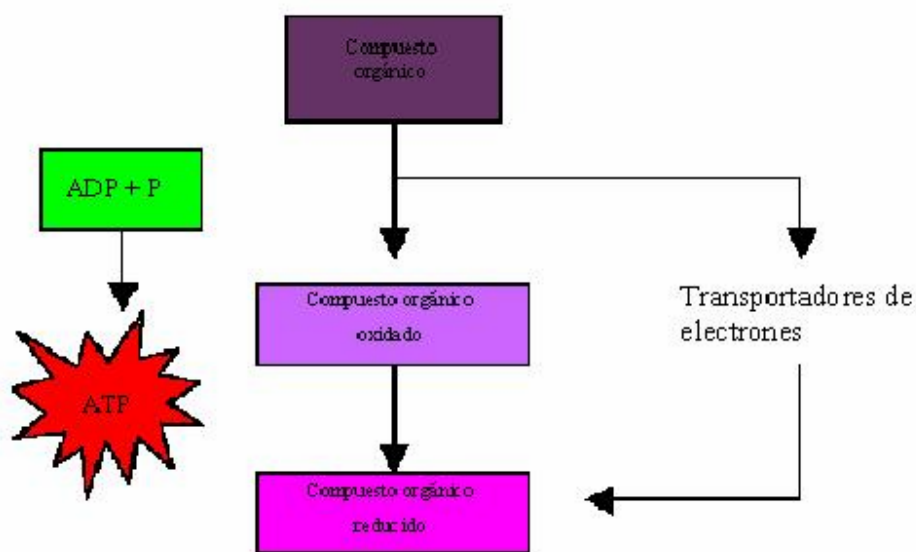
ENERGÍA Y DE CARBONO QUE UTILIZAN

GRUPO	FUENTE DE ENERGÍA	FUENTE DE CARBONO	EJEMPLO
Fotolitotrofos	Luz	CO ₂	Bacterias fotosintéticas
Fotoorganotrofos	Luz	Compuestos orgánicos	Purpurobacterias
Quimiolitotrofos	Oxidación de compuestos inorgánicos	CO ₂	Algunas bacterias Ej. <i>Thiobacillus</i>
Quimioorganotrofos	Oxidación de compuestos orgánicos	Compuestos orgánicos	La mayoría de las bacterias

Dependiendo de la naturaleza del aceptor de electrones en el proceso de producción de energía, podemos dividirlos en procesos de:

Fermentación

Proceso de producción de energía en el cual compuestos orgánicos actúan como dadores y aceptores de electrones. No hay aceptor externo de electrones.

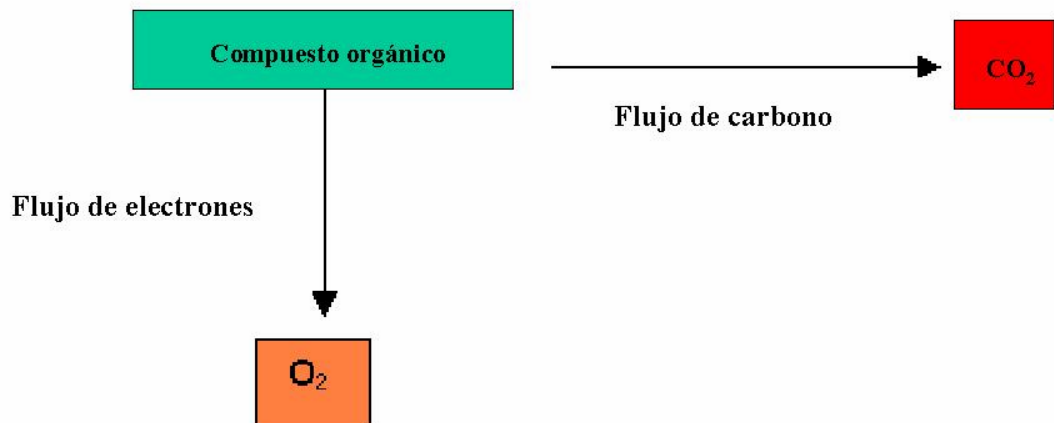


Respiración

Proceso de producción de energía en el cual compuestos inorgánicos actúan como aceptores externos de electrones.

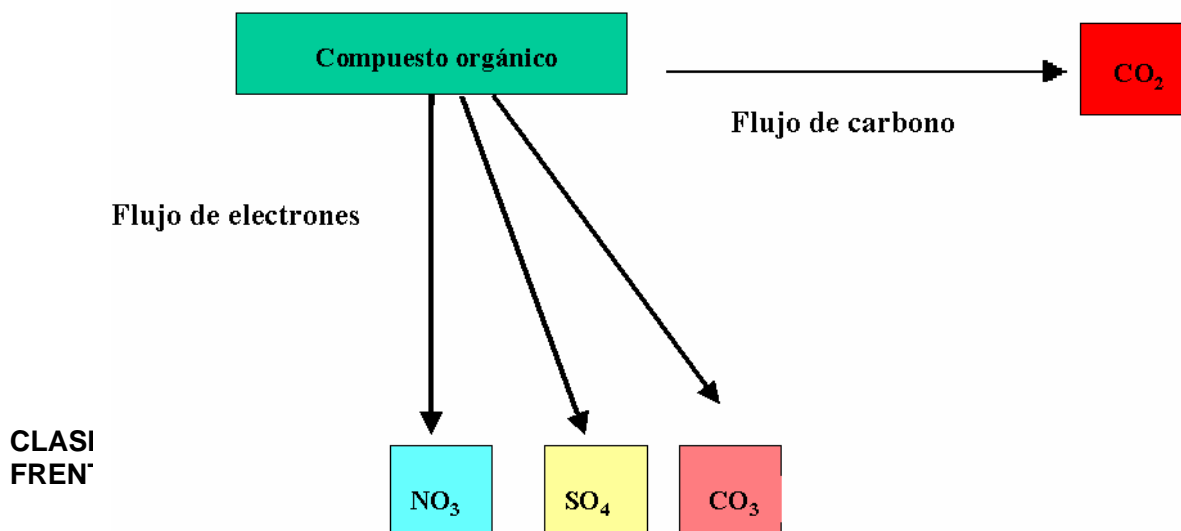
- **Respiración aerobia**

El aceptor de electrones es el oxígeno.



- **Respiración anaerobia**

El aceptor de electrones es un compuesto inorgánico diferente al oxígeno, por ejemplo: nitratos, sulfatos, carbonatos etc.



Aerobios estrictos

Requieren oxígeno para poder vivir. Carecen de la capacidad para realizar fermentación. Por ejemplo *Mycobacterium tuberculosis*.

Facultativos

Pueden crecer con o sin aire, en ausencia de aire realizan procesos fermentativos y en presencia de aire cambian a un metabolismo respiratorio. Por ejemplo levaduras, enterobacterias.

Microaerófilicos

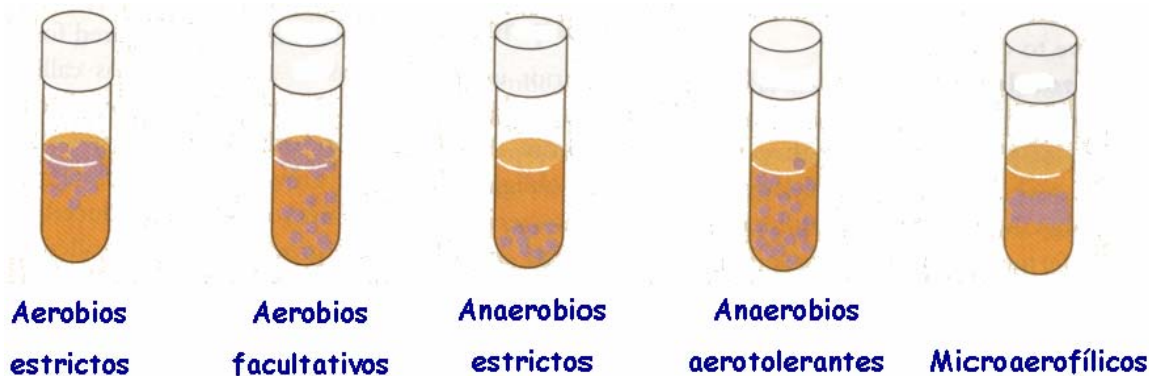
Crece mejor en presencia de pequeñas cantidades de oxígeno, tienen metabolismo respiratorio. Por ejemplo *Campylobacter fetus*.

Anaerobios aerotolerantes

Pueden crecer con o sin oxígeno pero su metabolismo es siempre fermentativo. Por ejemplo *Lactobacillus*.

Anaerobios estrictos

No pueden crecer en presencia de oxígeno. Su metabolismo puede ser fermentativo en algunos, respiración anaeróbica en otros y ciertos grupos realizan fotosíntesis. Por ejemplo *Clostridium botulinum*.



EFFECTO DEL OXÍGENO SOBRE LOS ANAEROBIOS

La sensibilidad al oxígeno se ha asociado con la carencia de la enzima superóxido dismutasa. Esta enzima detoxifica los radicales libres, potencialmente dañinos, formados en las células en presencia de oxígeno. La superóxido dismutasa parece estar presente en todos los microorganismos aerobios y en los anaerobios aerotolerantes pero no se ha encontrado en los anaerobios estrictos.

COENZIMAS

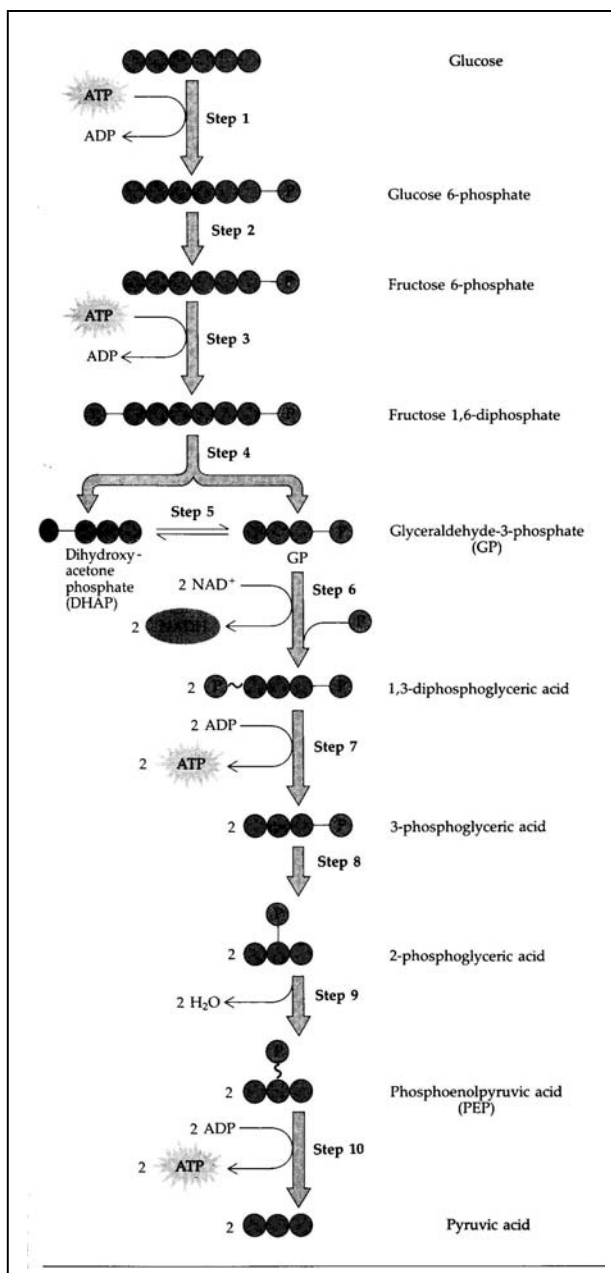
Los procesos metabólicos de los microorganismos, al igual que los de los organismos superiores, son catalizados por una serie de enzimas, algunas de las cuales para su actividad requieren de la acción de cofactores (coenzimas).

Ejemplos de estas coenzimas son las siguientes:

COENZIMA	FUNCIÓN
Coenzima A	Transferencia de grupos acilo
TPP (Pirofosfato de Tiamina, Vitamina B ₁)	Transferencia de grupos derivados de una cetona o aldehído
Biotina (Vitamina H)	Transferencia de CO ₂
Acido lipoico NAD NADP Derivados de la riboflavina (Vitamina B ₂) Ubiquinona (Coenzima Q) Naftoquinona Citocromos	Transferencia de átomos de hidrógeno o de electrones
ATP	Transferencia de fosfatos y de energía
Fosfato de piridoxal (Vitamina B ₆)	Transaminación y decarboxilación de aminoácidos. Racemización
Tetrahidrofolato	Transferencia de grupos de un carbono. Reducción
Cobamida (Vitamina B ₁₂)	Transferencia de grupos metilo y ciertas reducciones
Ferredoxinas Flavodoxinas	Reacciones que ocurren a bajo potencial redox

CATABOLISMO DE LA GLUCOSA (VÍAS FERMENTATIVAS)

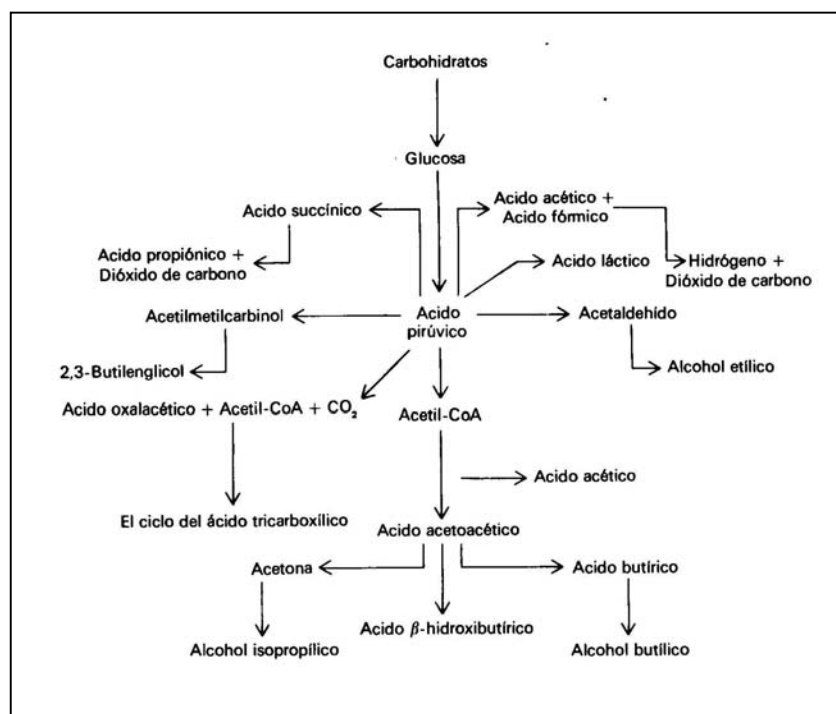
Vía Embden-Meyerhof (Glicólisis)



REGENERACIÓN DEL NAD: (Papel clave del piruvato en la misma)

Si la forma reducida del NAD en la vía glicolítica no se reoxidara en una reacción posterior del piruvato, la fermentación cesaría rápidamente, puesto que la cantidad de NAD en la célula es muy limitada. Los microorganismos han desarrollado una serie de vías que llevan a la realización de estas reoxidaciones, algunas de las cuales además producen ATP.

1. Láctica (*Streptococcus*, *Lactobacillus*)
2. Alcohólica (Muchas levaduras y algunas bacterias)
3. Ácido mixta (La mayoría de las enterobacterias)
4. Butanodiólica (*Enterobacter*)
5. Butírica (*Clostridium*)
6. Propiónica (*Propionibacterium*)

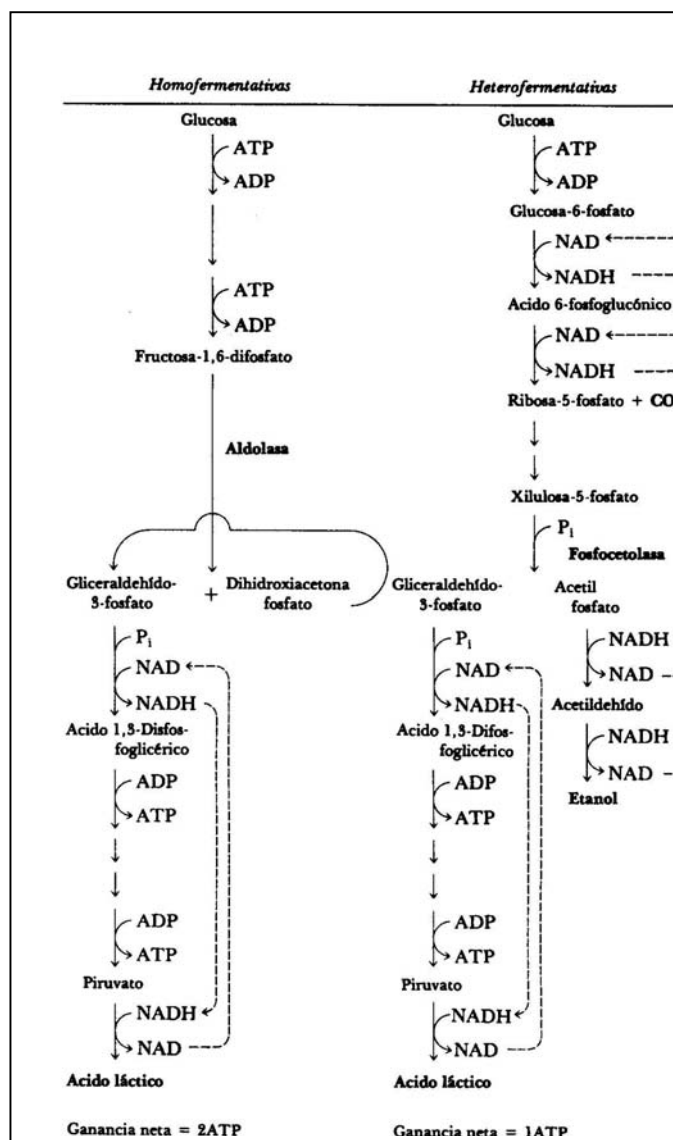


Papel clave del piruvato en las principales fermentaciones

Fermentación láctica

Es un tipo de fermentación en la cual el ácido láctico es el producto principal de la fermentación de la glucosa. En ella las 2 moléculas de ácido pirúvico formadas en la glicólisis son reducidas por 2 moléculas de NADH para formar 2 moléculas de ácido láctico como producto final de la reacción, teniendo un rendimiento energético de 2 ATP por molécula de glucosa. Las bacterias que producen ácido láctico se denominan bacterias lácticas, si la producción de ácido láctico la realizan realizan por esta vía se denominan homolácticas. La fermentación láctica puede causar el deterioro de alimentos, pero el proceso puede utilizarse también para producir yogurt a partir de la leche, repollo ácido a partir de repollo fresco y encurtidos. Dos géneros importantes de las bacterias lácticas son *Streptococcus* y *Lactobacillus*.

Otras bacterias lácticas producen ácido láctico metabolizando la glucosa por vías diferentes a la glicólisis, a las cuales nos referiremos más adelante.



Fermentación alcohólica

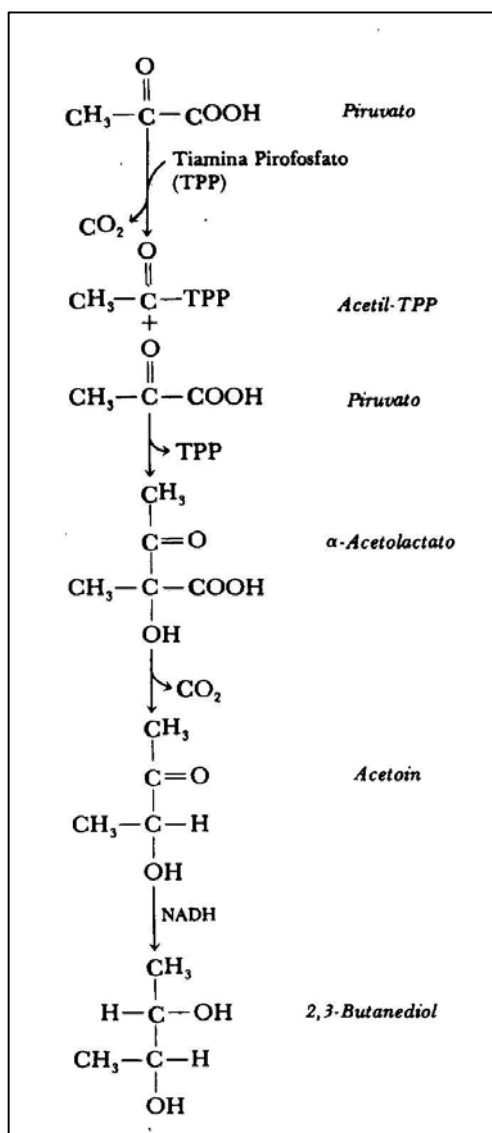
Es un tipo de fermentación que es realizada por un amplio rango de hongos filamentosos (mohos) como *Aspergillus*, *Mucor* y *Fusarium* y hongos unicelulares (levaduras) como *Saccharomyces*. En esta fermentación el ácido pirúvico proveniente de la glicólisis es descarboxilado a acetaldehído en una reacción catalizada por la enzima piruvato decarboxilasa y TPP (Tiamina pirofosfato); el acetaldehído es reducido a etanol por una alcohol deshidrogenasa dependiente de NAD, resultando en la reoxidación del NADH₂ formado durante la glicólisis. La fermentación alcohólica por especies de *Saccharomyces* se ha usado para la producción de cerveza, vino y otras bebidas alcohólicas. El CO₂ producido por las levaduras es utilizado para el levantamiento de la masa del pan.

Fermentación ácido mixta

Este es un tipo de fermentación que es usualmente llevada a cabo por miembros de la familia *Enterobacteriaceae*, incluyendo *Escherichia coli*, especies de *Proteus*, *Salmonella* y *Shigella*. En esta vía se forman ácidos acético, láctico, succínico y fórmico en diferentes proporciones que varían con el microorganismo y con las condiciones de cultivo. Los microorganismos que llevan a cabo esta fermentación dan positiva la prueba del rojo de metilo.

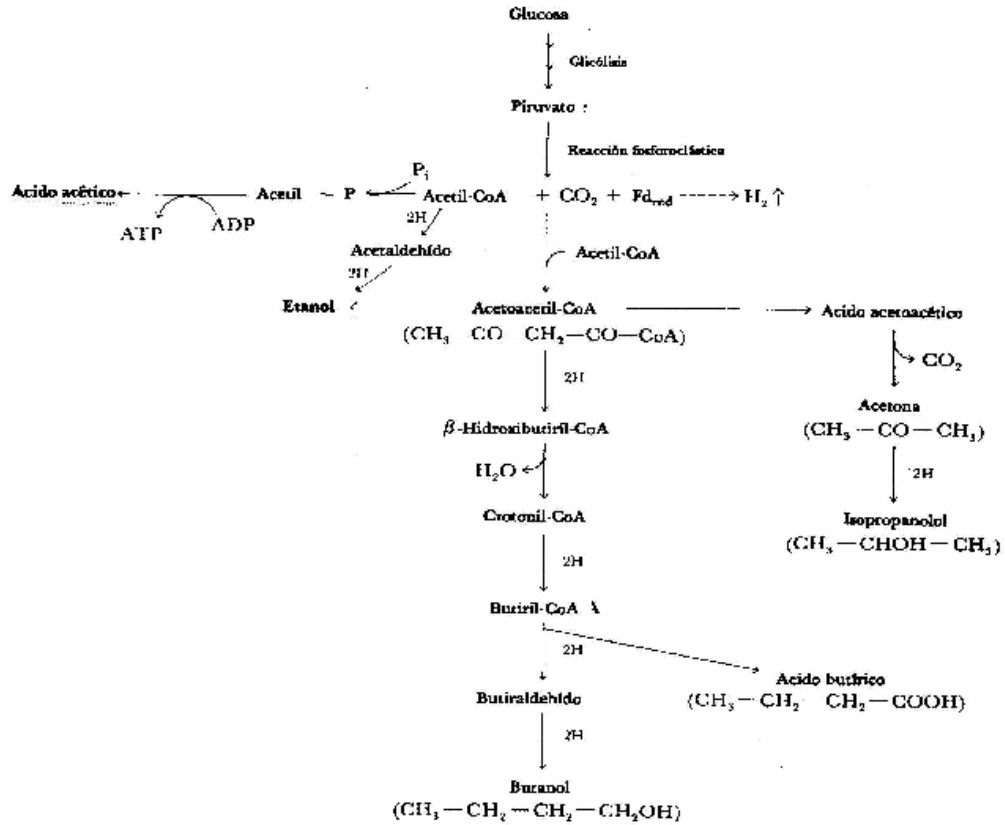
Fermentación butanodiólica

Este es un tipo de fermentación que es llevada a cabo por ciertos miembros de la familia *Enterobacteriaceae* por ejemplo: *Klebsiella* y *Enterobacter*. La glucosa es fermentada con la formación de 2,3 butanodiol y además se producen pequeñas cantidades de los productos formados en la vía ácido mixta. La cantidad de ácido producida es insuficiente para dar positiva la prueba del rojo de metilo. Los productores de butanodiol dan positiva la prueba de Voges Proskauer.



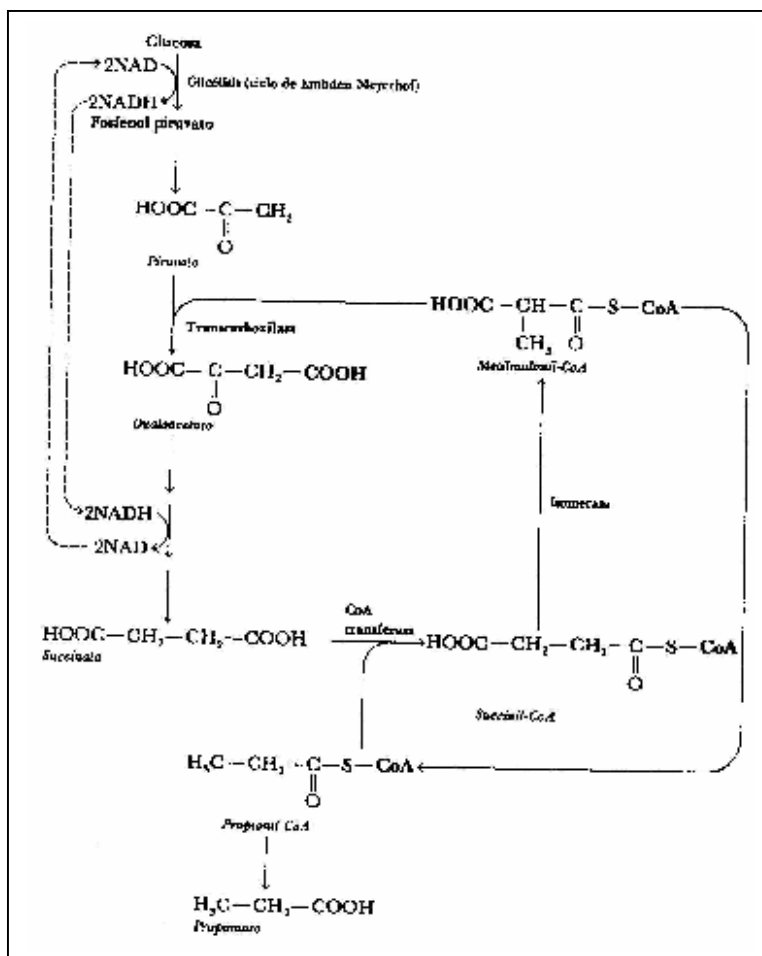
Fermentación butírica

Este tipo de fermentación es realizada por ciertas especies de *Clostridium* en la que la glucosa es fermentada con la formación de ácido acético, ácido butírico, CO₂ y H₂.



Fermentación propiónica

Esta es una fermentación realizada por especies del género *Propionibacterium* en la cual los productos principales de la fermentación de la glucosa son los ácidos propiónico y acético. Esta es la fermentación mediante la cual se produce el queso suizo, el sabor peculiar se lo dan los ácidos y los huecos se deben a la gran producción de CO₂.



RESUMEN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE FERMENTACIONES, QUE TIENEN COMO VÍA COMÚN LA GLICÓLISIS

Fermentación	Productos finales	Rendimiento energético
Láctica (Homoláctica)	Ácido láctico	2 ATP/Glucosa
Alcohólica	CO ₂ + Etanol	2 ATP/Glucosa
Ácido Mixta (Fórmica)	Ácido fórmico (CO ₂ + H ₂) Etanol Ácido acético	3 ATP/Glucosa
Butanodiólica	Butanodiol	2 ATP/Glucosa
Butírica	Ácido butírico Butanol Acetona Isopropanol CO ₂	2 ATP/Glucosa
Propiónica	Ácido propiónico	3 ATP/1,5 Glucosa

ALTERNATIVAS A LA GLICÓLISIS (Vía de las pentosas, Vía de Entner-Doudoroff)

Muchas bacterias tienen vías adicionales a la glicólisis para la oxidación de la glucosa. La vía alterna más común es la vía de las pentosas fosfato o vía fosfogluconica, la cual opera simultáneamente con la glicólisis. Esta es una vía cíclica que proporciona una forma de degradar a los azúcares de 5 carbonos (pentosas) y también a la glucosa. Una característica importante de esta vía es que produce pentosas intermediarias importantes que actúan como precursores de los ácidos nucleicos y de ciertos aminoácidos. También es una fuente importante de la coenzima reducida NADPH a partir del NADP. Produce una ganancia neta de 1 molécula de ATP por cada molécula de glucosa. Como ejemplos de bacterias que utilizan esta vía tenemos: *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* y *Streptococcus faecalis*.

Algunos microorganismos que utilizan esta vía pueden producir ácido láctico, CO₂ y etanol y se denominan heterolácticos para diferenciarlos de los que hacen la fermentación láctica (homoláctica) los cuales producen solamente ácido láctico.

La Vía Entner Doudoroff es otra vía para la oxidación de la glucosa a pirúvico. De cada molécula de glucosa se producen 2 moléculas de NADPH y 1 molécula de ATP. Las bacterias que tienen las enzimas de esta vía pueden metabolizar la glucosa sin la glicólisis o la vía Entner-Doudoroff. Esta vía generalmente no se encuentra en las bacterias gram positivas, se encuentra en algunas bacterias gram negativas, es típica de las bacterias del género *Pseudomonas*.

RESUMEN DE OTRAS FERMENTACIONES QUE NO TIENEN COMO VÍA COMÚN LA GLICOLISIS

Vía	Productos finales	Rendimiento energético
Heteroláctica (fosfogluconica)	Ácido láctico Etanol CO ₂	1 ATP/Glucosa
Entner-Doudoroff	Ácido pirúvico	1 ATP/Glucosa

RESPIRACIÓN AERÓBICA

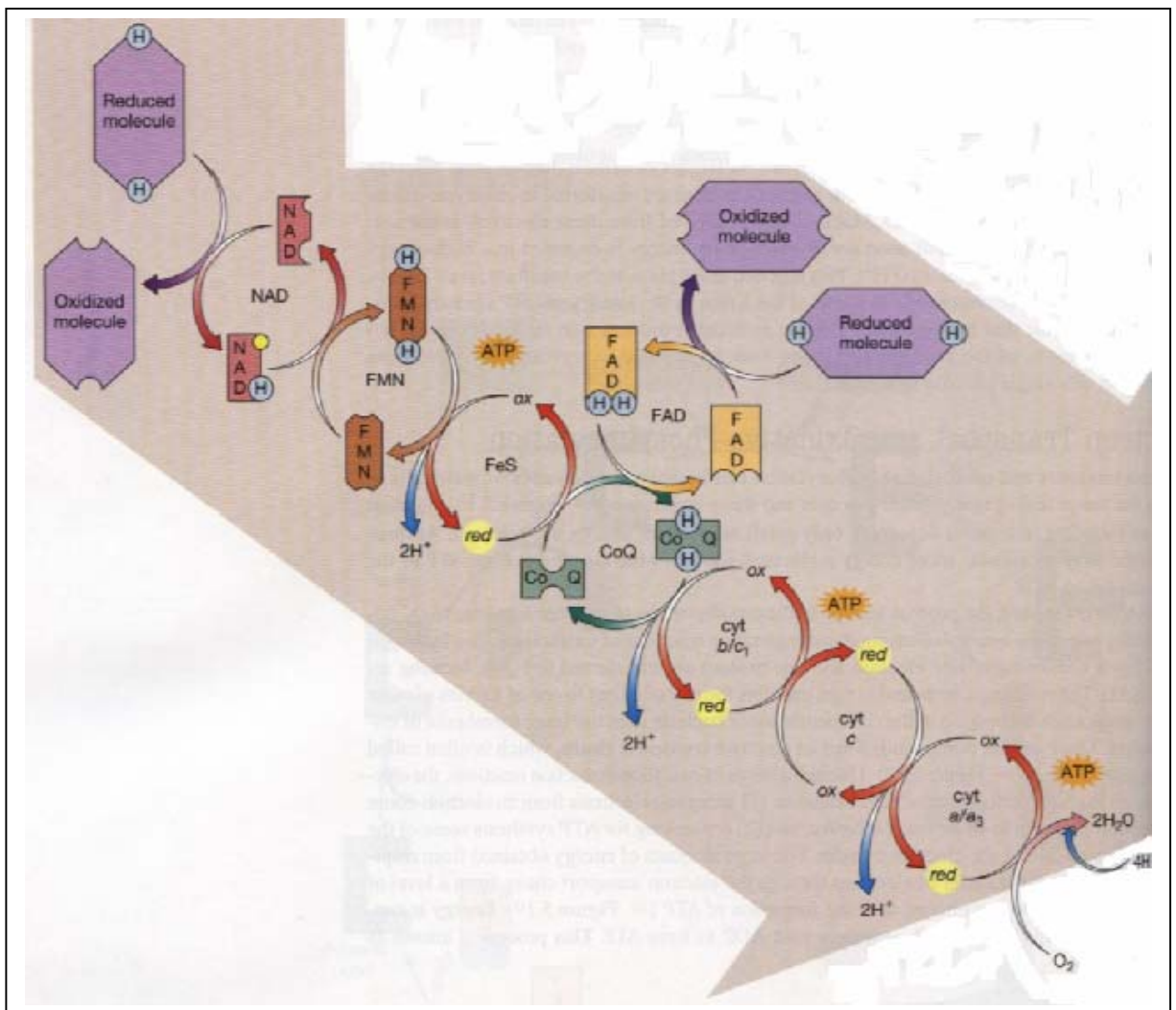
1. La glucosa es oxidada en la respiración aeróbica a través de la glicólisis y luego a través del ciclo de Krebs (Ciclo de los ácidos tricarbónicos).
2. Como ya se discutió anteriormente la glicólisis es una secuencia de nueve pasos enzimáticos que convierten 1 molécula de glucosa en 2 de ácido pirúvico, 2 NADH y 2 ATP.
3. El ácido pirúvico es descarboxilado para formar acetyl-CoA, NADH y CO₂. El ciclo de Krebs es una secuencia de reacciones catalizadas por enzimas que oxidan la acetyl-CoA a 2 CO₂ y generan 1 GTP, 1 FADH y 3 NADH.
4. El NADH y el FADH producidos en la vía glicolítica (anaeróbicamente) son oxidados en la cadena de transporte de electrones. Durante ese transporte de electrones se produce ATP.
5. El sistema de transporte de electrones produce 3 ATP por cada NADH y 2 ATP por cada FADH oxidado por el oxígeno.

6. La respiración aeróbica en bacterias genera 38 moles de ATP por mol de glucosa oxidado a CO_2 y H_2O

SISTEMAS TRANSPORTADORES DE ELECTRONES

Funciones

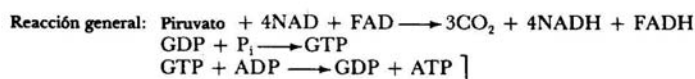
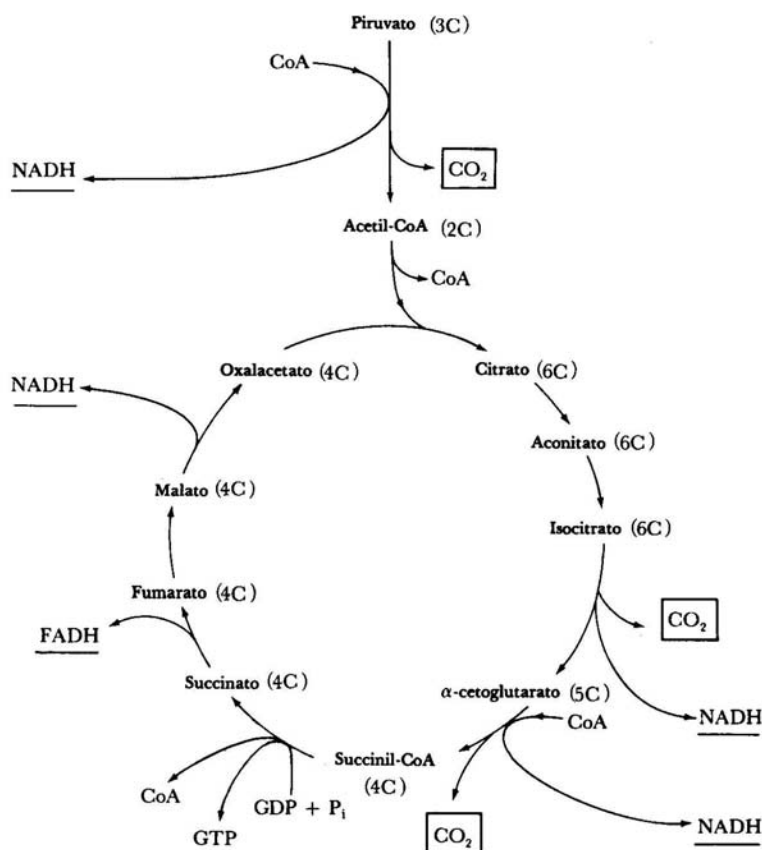
- Aceptar electrones del donante y transferirlos al aceptor.
- Conservar la energía que es liberada durante la transferencia de electrones mediante la síntesis de ATP.



FOSFORILACIÓN OXIDATIVA

Es una reacción de formación de ATP en la cadena de transporte de electrones que sucede durante la transferencia de electrones desde un donante tal como el NADH a un aceptor como el oxígeno o el nitrato.

CICLO DE KREBS



Fosforilación mediante el transporte de electrones $4 \text{NADH} \equiv 12 \text{ATP}$
 $\text{FADH} \equiv 2 \text{ATP}$ } 15 ATP

COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE LA FERMENTACIÓN Y LA

RESPIRACIÓN AERÓBICA

Proceso	Glicólisis	Ciclo de Krebs	Rendimiento total
Fermentación	2 ATP	No funciona	2 ATP/Glucosa
Respiración aeróbica	2 ATP (Fosforilación a nivel de sustrato) 6 ATP (Fosforilación oxidativa)	2 ATP (Fosforilación a nivel de sustrato) 28 ATP (Fosforilación oxidativa)	38 ATP/Glucosa

EFFECTO PASTEUR

Cuando microorganismos facultativos se están cultivando anaeróbicamente y se exponen al oxígeno, hay una inhibición del consumo de glucosa, esto es conocido como efecto Pasteur y refleja el incremento de rendimiento energético obtenido por el metabolismo respiratorio de la glucosa comparado con el obtenido por la fermentación de la glucosa.

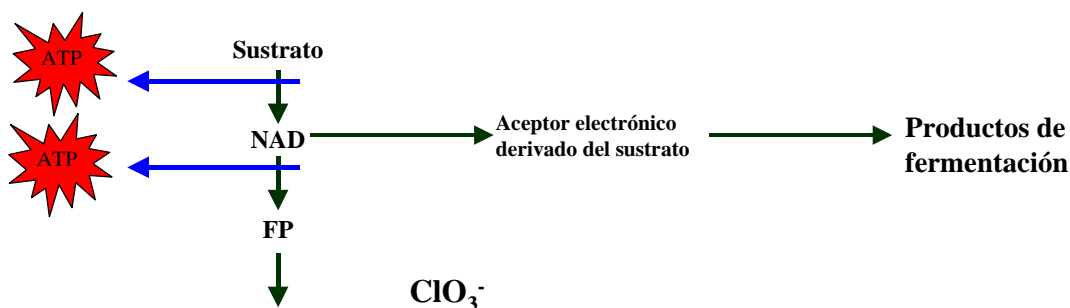
RESPIRACIÓN ANAEROBIA

ACEPTORES DE ELECTRONES	PRODUCTOS
Nitrato (NO_3^-)	Nitrito (NO_2^-) Óxido nitroso (N_2O) Nitrógeno (N_2)
Nitrito (NO_2^-)	Óxido nitroso (N_2O) Nitrógeno (N_2)
Sulfato (SO_4^{2-})	Sulfuro (H_2S)
Hierro férrico (Fe^{+3})	Hierro ferroso (Fe^{+2})
Dióxido de carbono (CO_2)	Metano (CH_4)

INHIBIDORES DEL TRANSPORTE DE ELECTRONES

Varias sustancias inhiben el transporte de electrones interfiriendo con la acción de los transportadores, algunos ejemplos:

- Monóxido de carbono: Se combina directamente con el citocromo terminal, citocromo oxidasa, impidiéndole su unión con el oxígeno.
- Cianuro (CN^-): Se une fuertemente al hierro del anillo porfirínico de los citocromos previniendo su oxido-reducción.
- Azida (N_3^-): Se une fuertemente al hierro del anillo porfirínico de los citocromos previniendo su oxido-reducción.
- Cloratos (ClO_3^-): Es un inhibidor específico de la reducción de los nitratos.



BIBLIOGRAFÍA

Black J. G. Microbiology. Principles and Explorations. Fourth Edition 1999 John Wiley & Sons, Inc.

Davis, Dulbecco, Eisen and Ginsberg. Microbiology. Fourth Edition. J. B. Lippincott Company 1990.

Madigan M.T, Martingo J. M. y Jack Parker. 2004. Décima Edición. Brock Biología de los Microorganismos Prentice Hall

Ketchum Paul A. Microbiology. Concepts and applications. (1988) John Wiley and sons

Prescott, Harley y Klein 1999 Microbiología. Cuarte edición. McGraw-Hill Interamericana

Wiistreich and Lechtman. Microbiology. Fifth Edition. (1988) Macmillan Publishing Co.

Tortora G. J., B. R. Funke and Ch. L. Case 2007. Introducción a la Microbiología 9^{na} Edición. Editorial Médica Panamericana.

Yajaira Bastardo
Magaly Pedrique de Aulacio
Cátedra de Microbiología
Facultad de Farmacia - Universidad Central de Venezuela
Revisión 2008

ACTIVIDADES ADICIONALES

Investiga sobre los medios de cultivo que contengan azida de sodio, indicando la fórmula, y el uso.

Investiga el proceso de producción del yogurt y elabora un esquema.

Investiga el proceso de producción del vino y elabora un esquema.

Investiga el papel que juegan los microorganismos en el deterioro de productos farmacéuticos y da ejemplos.

Busca en un diccionario de inglés técnico la traducción al español de las palabras siguientes:

Beer	
Bread	
Breakdown	
Cheese	
Chemoautotroph	
Electron carrier	
Energy sources	
Environment	
Fuel	
Krebs Cycle	
Olives	
Pathway	
Photophosphorilation	
Pickles	
Requirement	
Storage	
Substrate	
Sugar	
Vinager	
Wine	