

Organismos quimioautótrofos y metófilos

Apellidos, nombre	Pachés Giner, Maria (mapacgi@upvnet.upv.es) Serna García, Rebeca (rebecca.serna@uv.es)
Departamento	Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Centro	Universitat Politècnica de València

Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a examinar las características básicas de los organismos quimioautótrofos y metófilos. Para cada uno de estos dos grupos analizaremos las principales características metabólicas, así como la clasificación establecida en función del sustrato que utilicen como fuente de energía y carbono. Estas características permiten vislumbrar el potencial de estos organismos en diferentes aplicaciones relacionadas con el ámbito ambiental.

Objetivos

Una vez que el estudiante lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Clasificar los organismos en función de la fuente de energía y carbono utilizada.
- Describir las principales características de los organismos quimiotróficos.
- Esquematizar y comparar los distintos grupos de organismos quimiotróficos.
- Describir las principales características de los organismos metofilos.
- Esquematizar y comparar los distintos grupos de organismos metofilos.

Introducción

La clasificación de los seres vivos responde a diversos criterios: filogenéticos, morfológicos, evolutivos, moleculares, etc. Uno de los más extendidos se basa en la fuente de carbono que utilice los organismos para crecer. En función de esta se clasifican en autótrofos, aquellos que son aquellos capaces de sintetizar sus propias moléculas orgánicas fijando el CO_2 atmosférico y, heterótrofos, los que dependen de fuentes externas de moléculas orgánicas para obtener su energía.

A su vez, desde el punto de vista energético, los microorganismos se pueden clasificar en fotótrofos y quimiotrofos. Los primeros son aquellos que usan la luz solar como fuente de energía, mientras que los segundos obtienen la energía contenida en los enlaces químicos de moléculas orgánicas, como los carbohidratos, lípidos y proteínas, o moléculas inorgánicas como sulfuro, amoníaco, sales etc.

Además, en función de la fuente de electrones podemos encontrar los litótrofos, cuya fuente de electrones son sustancias inorgánicas y los organótrofos cuya fuente es orgánica. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los metabolismos más relevantes que presentan los organismos:

		Fuente de Energía	
		Luz	Reacciones Químicas
Fuente de Carbono	Inorgánica	Fotolitotrofo	Quimiolitotrofo
		Bacterias fotosintéticas, cianobacterias, algas, plantas.	Bacterias quimioautótrofas.
	Orgánica	Fotoorganotrofo	Quimioorganotrofo
		Bacterias, algas.	Bacterias heterótrofas, protistas, protozoos, hongos, animales.

Tabla 1. Clasificación de los organismos según su fuente de energía y carbono.

Desarrollo



Si quisieras mejorar la calidad del aire y del suelo, ¿utilizarías microorganismos?

En caso afirmativo, ¿qué organismos crees que nos pueden resultar útiles para reducir la contaminación del aire y de los suelos?

1.1. Organismos quimioautótrofos

Los organismos quimioautótrofo son aquellos que pueden crecer en un medio estrictamente mineral en la oscuridad, obteniendo carbono a partir del CO_2 y su ATP y poder reductor de la respiración de un sustrato inorgánico. La mayoría de estos organismos son procariotas pertenecientes al filum *Proteobacteria*.

La elevada especificidad que presentan respecto a la fuente de energía que utilizan hace que, en muchos casos, sean incapaces de emplear compuestos orgánicos como fuentes de carbono y energía. Asimismo, su crecimiento se ve afectado negativamente si están presente estos compuestos en el medio. Son mayoritariamente aerobios, pues el aceptor final de electrones es el oxígeno, aunque puede reemplazarse en algunas ocasiones por el nitrato.

Los sustratos necesarios para su crecimiento son, H_2S y otras formas reducidas de azufre, amoníaco (NH_3), nitrito (NO_2^-), hidrógeno molecular (H_2), monóxido de carbono (CO) y hierro.

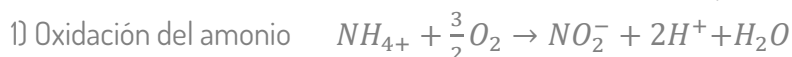
ferroso (Fe^{2+}). Todos los substratos necesarios para el crecimiento de estos organismos aparecen de forma natural en el medio como producto de actividades metabólicas de otros organismos. Según el sustrato utilizado por estos organismos quimioautótrofos se establecen cinco subgrupos principales:

		Sustrato oxidable	Producto oxidado	Aceptor terminal de electrones
Bacterias nitrificantes	Oxidadores de amoníaco	NH_4^+	NO_2^-	O_2
	Oxidadores de nitrito	NO_2^-	NO_3^-	O_2
Oxidadores de azufre		H_2S , SO , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	SO_4^{2-}	O_2 ; a veces NO_3^-
Bacterias del hierro		Fe^{2+}	Fe^{3+}	O_2
Bacterias del hidrógeno		H_2	H_2O	O_2 ; a veces NO_3^-
Carboxidobacterias		CO	CO_2	O_2

Tabla 2: Grupos de quimioautótrofos aeróbicos

El primer grupo (**bacterias nitrificantes**), utilizan compuestos reducidos de nitrógeno inorgánico como fuente de energía. Son bacterias Gram-negativas de forma bacilar en las que a veces abundan las invaginaciones vesiculares, laminares o tubulares. Presentan una elevada especificidad por el sustrato diferenciándose dos taxones importantes: *Nitrosomonas*, que oxida amoníaco a nitrito (NO_2^-), y *Nitrobacter* que oxida nitrito a nitrato (NO_3^-), pero ninguno de ellos puede oxidar ambos a la vez. El crecimiento de estos organismos autótrofos estrictos (incapaces de desarrollarse en ausencia de su fuente de energía inorgánica específica) es lento y suelen necesitar 24 horas mínimo de generación.

La conversión de amonio a nitrato (NO_3^-) ocurre en dos etapas.

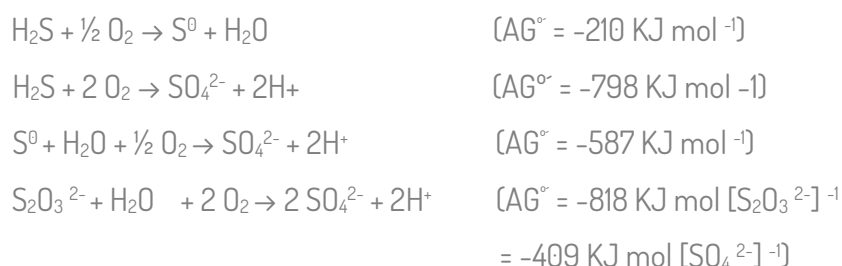


El segundo grupo (**bacterias oxidantes de azufre**), emplean H_2S , azufre elemental o sus óxidos parcialmente reducidos como fuentes de energía. Posteriormente todo es convertido a sulfato. Dentro de este grupo hay una subdivisión en función de si son o no capaces de acumular intracelularmente el azufre elemental. Dentro del subgrupo en que

no es posible este acúmulo de azufre se encuentra el género *Thiobacillus* muy abundante en medios terrestres y marinos.

Así como en las bacterias nitrificantes, anteriormente mencionadas, la quimioautotrofia es estricta en los oxidadores de azufre no lo es. Tampoco estos organismos están provistos de las invaginaciones membranosas tan características de muchas bacterias nitrificantes.

Una característica común y sorprendente de este grupo es su extrema tolerancia a ambientes ácidos. De hecho, algunas especies crecen a valores de pH bajos entre 1 y 2 y dejan de hacerlo a pH superior a 6. La acidificación del medio es la consecuencia de la oxidación de compuestos de azufre reducidos a sulfato. A continuación, se muestran las reacciones de oxidación de compuestos de azufre:



¿Sabías que hay una actividad humana que favorece mucho a estos organismos?

Esta actividad es la minería: el agua de drenaje ácida procedente de las minas contienen minerales con sulfuros metálicos, sobre todo piritita de hierro (FeS_2)

En estos sistemas predominan bacterias acidófilas como *Thiobacillus thiooxidans*, que oxida con gran rapidez azufre elemental y *T. ferrooxidans*, que obtiene su energía de la oxidación tanto de compuestos reducidos de azufre como de Fe^{2+} .

Dentro de este grupo encontramos diversidad de estrategias metabólicas. Por ejemplo, algunas cepas crecen autotróficamente con H_2S y fijan CO_2 mediante el ciclo de Calvin. Otras no pueden fijar CO_2 y por tanto son heterótrofas estrictos. Sin embargo, algunas de estas últimas obtienen energía de la oxidación de H_2S y la acoplan a la asimilación de fuentes de carbono orgánico (mixotrofia). No obstante, existen otras que siendo heterotróficas y oxidando el H_2S , no pueden obtener energía de la oxidación.

El tercer grupo (**bacterias del hierro**) oxidan hierro y manganeso reducidos para obtener energía. Las bacterias del hierro más características son las bacterias filamentosas *Sphaerotilus*. Estas oxidan el ion ferroso a hidrato férrico insoluble, para formar una

cubierta o vaina que envuelve sus células. Estas crecen fácilmente como quimioheterotrofos, por lo que pueden aislarse en cultivos puros.



¿Sabías que pueden llegar a ser un problema para las tuberías?

El polímero de las vainas es un polisacárido.

El crecimiento de estas bacterias genera un depósito orgánico para que microorganismos se desarrollen.

Se crea una comunidad microbiana activa que resulta en un foco de ataque microbiano, responsable de obstrucción y corrosión.

Sin embargo, en el caso de *Gallionella*, que es otra bacteria del hierro con una estructura característica, parece más probable que tenga lugar un crecimiento quimioautotrófico, es decir puede oxidar hierro (II), obteniendo energía y acoplar esta oxidación a la asimilación del carbono.

Entre las bacterias autótrofas acidófilas oxidantes del hierro la más estudiada es *Thiobacillus ferrooxidans* que utiliza el hierro ferroso como fuente de electrones convirtiéndolo en férrico. En este grupo de acidófilas el pH citoplásmico se mantiene a un valor de alrededor de 6,5 de manera que se genera un gradiente de pH (medio-interior de la membrana) superior a 4 unidades de pH. Esta diferencia genera una fuerza motora de protones suficiente para permitir la síntesis de ATP.

El cuarto grupo (**bacterias del hidrógeno**), utilizan hidrógeno molecular como fuente de energía. Este grupo de bacterias aeróbicas tienen la capacidad de crecer quimioautotróficamente en presencia de hidrógeno molecular. A diferencia de los otros grupos vistos anteriormente, estas son nutricionalmente versátiles ya que pueden utilizar una amplia gama de compuestos orgánicos como fuentes de carbono y energía.

La mayoría de las bacterias de hidrógeno poseen una sola hidrogenasa que cataliza la reacción



En esta reacción, el aceptor de electrones es un componente no identificado de la cadena de transporte de electrones, probablemente con un potencial de reducción próximo a cero milivoltios.

El último grupo, las **carboxidobacterias** que están representadas en diversos taxones bacterianos y tienen capacidad de oxidar el monóxido de carbono a dióxido de carbono. Realmente, la mayoría de las carboxidobacterias son también bacterias del hidrógeno

(aunque lo inverso no es cierto), y los sistemas enzimáticos que catalizan la oxidación de CO y de H₂ a menudo son inducidos de forma simultánea bajo condiciones de crecimiento autotróficas.

La bioquímica de la oxidación de monóxido de carbono todavía se conoce muy poco. Sin embargo, al menos algunas carboxidobacterias parecen utilizar una enzima monóxido de carbono oxidorreductasa soluble que cataliza la reacción:



En esta reacción, el aceptor de electrones es un componente no identificado de la cadena de transporte de electrones, con un potencial de reducción de aproximadamente cero milivoltios, quizás ubiquinona o citocromo b.

En casi todos los grupos fisiológicos de quimioautótrofos se ha podido poner de manifiesto que la asimilación de CO₂ tiene lugar a través del ciclo de Calvin. Cuando crecen de forma quimioautotrófica, las células contienen altos niveles de dos enzimas específicos de esta ruta metabólica: la ribulosa bifosfato carboxilasa y la fosforribuloquinasa. Sin embargo, en los tiobacilos autotróficos facultativos (bacterias oxidantes del azufre) y en las bacterias del hidrógeno, la síntesis de estas enzimas está a menudo total o parcialmente reprimida cuando las células disponen de sustratos orgánicos para su crecimiento.

Las bacterias nitrificantes son consideradas autótrofos estrictos, pero para las bacterias oxidantes del azufre la autotrofia es variable y está completamente ausente en las bacterias del hidrógeno y en las carboxidobacterias.

Cabe señalar que las últimas investigaciones apuntan que, en condiciones apropiadas, los compuestos orgánicos pueden aportar una porción considerable del carbono celular de los «autótrofos estrictos» y por tanto este término está actualmente pasado de moda ya que no se trata de un solo mecanismo.



¿Sabías que...?

El aislamiento y estudio de estos organismos ha sido difícil porque muchos de los sustratos necesarios para que crezcan son químicamente inestables bajo condiciones aerobias.

Por ejemplo, el H₂S, es oxidado rápidamente a azufre elemental (S⁰) al contacto con el aire

1.2. Organismos metófilos

Los organismos metófilos son aquellos que tienen la capacidad de obtener carbono y energía del metabolismo de compuestos de un carbono (C1), o de dos o más átomos de carbono, que no están directamente unidos a otro (por ejemplo, dimetil éter, dimetilamina, etc.). La mayoría de los organismos metófilos son procariotas mientras que en eucariotas esta capacidad metófila solo existen algunas levaduras.

En el medio donde habitan estos organismos uno de los compuestos más abundantes que existe formado por un átomo de C es el metano (CH₄), que se encuentra en depósitos de carbón y petróleo y que es producido continuamente en gran cantidad en ambientes anaeróbicos por las bacterias metanogénicas. Otro compuesto que abunda en la naturaleza es el metanol (CH₃OH) que aparece como consecuencia de la rotura de las pectinas y otros compuestos naturales que contienen ésteres o ésteres de metilo.

Todos los metófilos pueden crecer con estos compuestos de C1 como única fuente de carbono, sin embargo, las rutas de asimilación de estos compuestos en componentes celulares presentan una gran variedad. Por un lado, existen metilótrofos facultativos autótrofos que asimilan CO₂ por vía del ciclo de Calvin. Por otro, la mayoría de metilótrofos y todos los metanótrofos incorporan los sustratos de carbono a través de otras rutas metabólicas principalmente la vía de la ribulosa monofosfato y la ruta de la serina. En cuanto al catabolismo de los compuestos C1, este es casi siempre respiratorio, y realizado por aerobios estrictos. No obstante, existen excepciones como la desnitrificación a expensas de metanol y la reducción de sulfato acoplada a la oxidación de metano.

Dentro de los metófilos podemos encontrar dos grupos fisiológicos: los metanótrofos y los metilótrofos.

Metanotrofos

Los organismos metanotróficos son bacilos unicelulares, vibrios, cocos o células piriformes a menudo móviles por flagelos, Gram-negativos y aeróbicos estrictos. Todos forman algún tipo de estructura de latencia y se caracterizan por un completo sistema de membranas internas cuando crecen con metano.

En los hábitats naturales de estos organismos, el metano (CH₄), es el sustrato más abundante, aunque la mayoría pueden crecer con otros compuestos de un carbono como el metanol o formaldehído. Estos organismos oxidan el metano a metanol, formaldehído, ácido fórmico y, por último, a dióxido de carbono. El paso crítico y que limita el proceso es el primero que es llevado a cabo por la enzima metanomonooxigenasa (MMO).

Casi todos los metanotrofos son metófilos estrictos, es decir, son incapaces de desarrollarse con compuestos que contengan enlaces carbono-carbono, pero si pueden llevar a cabo una amplia variedad de cooxidaciones (la cooxidación es la oxidación «gratuita» de un sustrato de no crecimiento de manera concomitante con la oxidación del sustrato de crecimiento). Este hecho

se debe a la falta de especificidad por el sustrato de la MMO y genera productos de reacción que, al no experimentar más metabolización, se acumulan en el medio. Actualmente, sobre este acúmulo de productos que generan estas transformaciones hay un considerable interés de explotación comercial.



Metilotrofos

Los metilotrofos forman un grupo diverso que incluye tanto a géneros Gram-negativos como Gram-positivos. Ninguno de estos produce cistes ni exosporas ni posee los complejos sistemas de membrana intracelular que caracteriza a los metanotrofos analizados anteriormente.

Estos organismos poseen la capacidad de crecer a expensas de uno o más de los componentes utilizados típicamente por los metófilos, pero no pueden usar metano. Sólo se conoce un metilotrofo estricto (*Methylophilus*) de crecimiento rápido con metanol. La metilotrofia facultativa es un rasgo de distribución relativamente amplia entre las bacterias heterotróficas.



Las bacterias metilotrofas viven suspendidas en el aire o asociadas a la superficie de las estructuras aéreas de los árboles y contribuyen a nivelar el metano y otras sustancias orgánicas volátiles en la atmósfera.

Tienen aplicaciones en la biotecnología y en la remediación de suelos contaminados.

1.3. Orígenes de los quimioautótrofos y metófilos

La simplicidad de sus requerimientos de nutrición llevó a considerar a los quimioautótrofos y metófilos organismos «primitivos», posiblemente representativos de las primeras formas de vida sobre la Tierra. Esto no es así por dos razones principalmente. La primera, la complejidad del sistema metabólico y estructura celular que presentan que es similar al de bacterias quimioheterótrofas. En segundo lugar, el hecho de que la aparición de estos organismos quimioautótrofos y metilotrofos depende de la aparición previa de la fotosíntesis oxigénica. Por tanto, es probable que estos organismos evolucionaran a partir de antecesores procariotas que llevaran a cabo fotosíntesis, bien oxigénica o anoxigénica.

Las propiedades, poco corrientes, que comparten diversos miembros de estos dos importantes grupos procariotas (uno fotosintético y otro no), presencia de complejos sistemas de membranas internas con una gran diversidad de formas; ausencia de un ciclo funcional del ácido tricarboxílico; presencia del ciclo de Calvin-Benson o su análogo, el ciclo de la pentosa fosfato; localización de un enzima clave del ciclo de Calvin (la ribulosa bifosfato carboxilasa) en los carboxisomas.

Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos visto las principales características de los organismos quimioautótrofos y metófilos. El primer grupo se subdivide en cinco grandes grupos en función del sustrato que utilizan para obtener la energía. Por su parte, los metófilos se clasifican en dos grupos dependiendo de su capacidad para utilizar metano. Ambos grupos de organismos desempeñan un papel fundamental en los ciclos biogeoquímicos y presentan un gran potencial de aplicación en el ámbito de la tecnología ambiental.

Bibliografía

Reineke, Walter, and Michael Schloimann. Environmental Microbiology. 1st ed. 2023., Springer, 2023, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-66547-3>

Stanier, Roger Y., y distribuidor Ingebook. Microbiología. Segunda edición, Editorial Reverté, 2025.

Rosenberg, Eugene. Microbiomes: Current Knowledge and Unanswered Questions. 1st ed. 2021., Springer, 2021, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65317-0>.