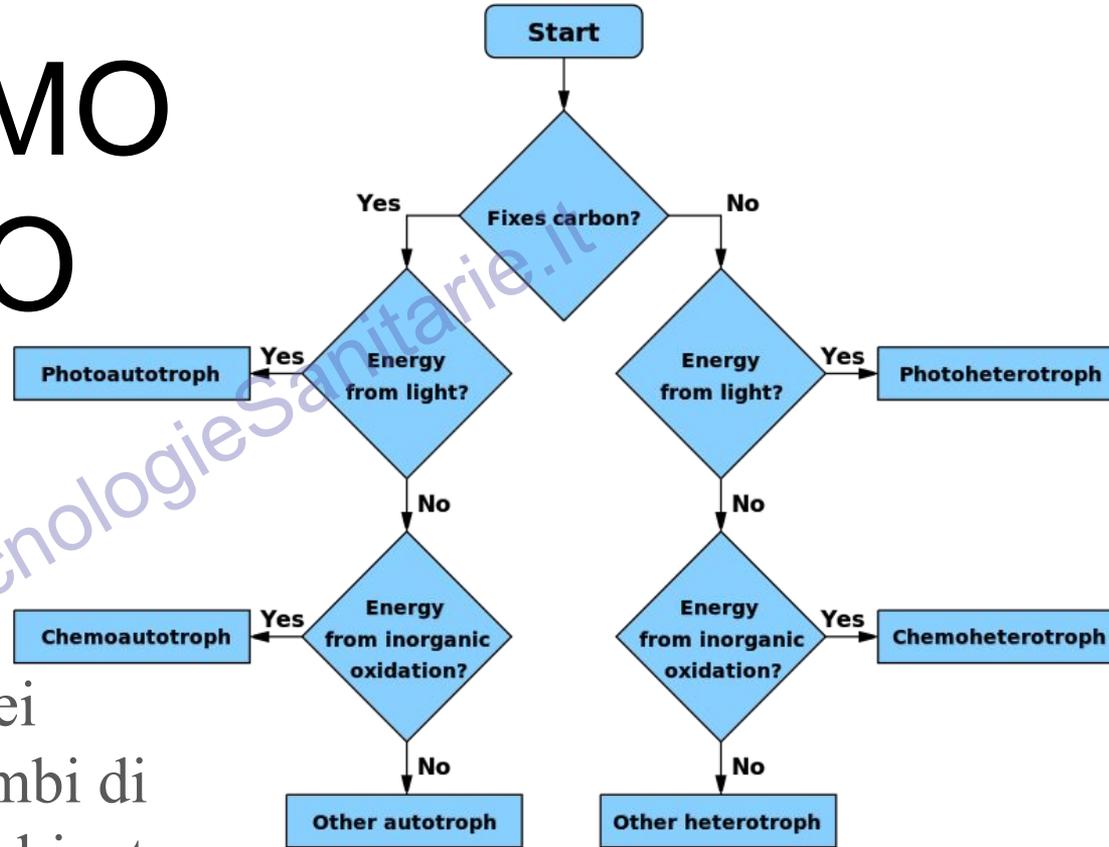


METABOLISMO MICROBICO

Le diverse strategie dei
microrganismi per gli scambi di
materia ed energia con l'ambiente
esterno



METABOLISMO MICROBICO

[Introduzione](#)

[Fonti d energia: la radiazione solare,](#)
[composti inorganici, composti organici.](#)

BioTechnologiesSanitarie.it



Introduzione

BioTecnologieSanitarie.it

Introduzione

Ogni cellula procariote o eucariote è un laboratorio chimico in cui avvengono contemporaneamente numerosissime reazioni.

Metabolismo è l'insieme di tutte le reazioni. Le reazioni sono di due tipi diversi:

- di demolizione di molecole esogene nutritive e di molecole endogene che per motivi diversi devono essere sostituite o eliminate (**catabolismo**);
- di sintesi di nuove biomolecole (**anabolismo**)

Introduzione

Per poter fare tutto questo ogni cellula deve scambiare energia e materia con l'ambiente esterno; quindi è un sistema aperto.

L'**energia** è indispensabile sia per le attività meccaniche (movimento e divisione) che per quelle osmotiche (trasporto attraverso la membrana) che per quelle chimiche, in particolare per le reazioni che consumano energia.

L'energia può essere ricavata dalla radiazione solare oppure da sostanze chimiche.

Introduzione

Per poter fare tutto questo ogni cellula deve scambiare energia e materia con l'ambiente esterno; quindi è un sistema aperto.

La **materia**, sotto forma di sostanze nutritive esogene o di molecole endogene da degradare, viene trasformata per creare i mattoni di costruzione che daranno poi vita a nuove macromolecole essenziali per le strutture cellulari e per il funzionamento della cellula stessa (basti pensare agli enzimi).

Introduzione

In altre pagine del sito sono stati esaminati i cicli dei principali elementi correlati alla vita (carbonio, ossigeno, zolfo e azoto) ed è stato messo in evidenza come questi elementi siano in presenti in quantità limitata nel nostro pianeta. La materia viene movimentata tra la componente vivente (biotica) e non vivente (abiotica) in maniera ciclica, rispettando il principio che gli atomi non si creano e non si distruggono. La natura sa come non sprecare nulla. Tutti gli esseri viventi hanno potuto contare su un numero di atomi che non è mai cambiato.

Introduzione

L'energia invece fluisce in modo unidirezionale. Infatti entra nel sistema Terra attraverso la fotosintesi e lo abbandona sotto forma di calore.

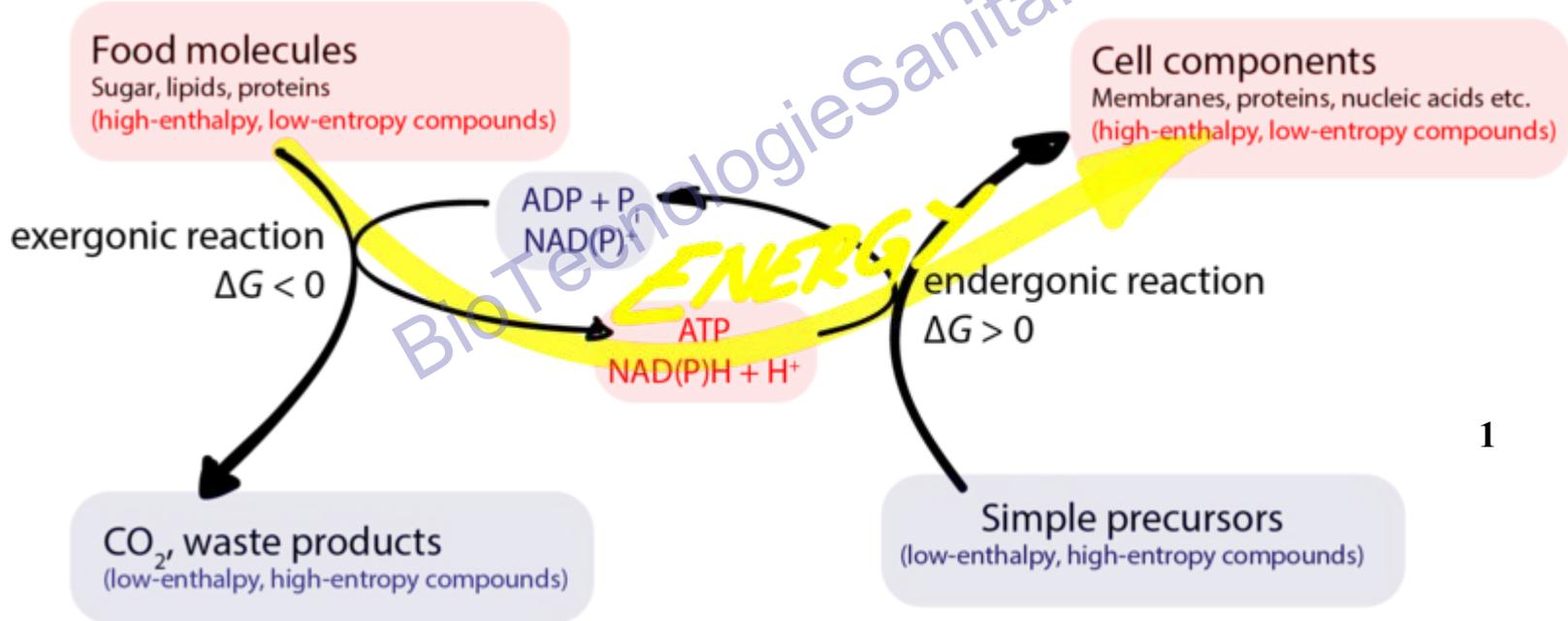
Il primo bilancio di materia ed energia viene fatto solitamente esaminando il [metabolismo della cellula eucariote](#). Tutto nasce con la fotosintesi da cui si ricava lo zucchero glucosio. Piante, alghe e cianobatteri sono in grado di trasformare la radiazione luminosa in energia chimica di legame.

Introduzione

Comincia così il flusso di energia e la conversione del carbonio inorganico (CO_2) in carbonio organico ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). In pratica studiando il ciclo del carbonio almeno per quanto riguarda l'aspetto nutritivo si comincia a capire la grande distinzione tra autotrofi ed eterotrofi. Cioè tra chi è del tutto autonomo nell'approvvigionamento di energia e di materia (autotrofi) e chi, invece, dipende dai primi per la propria sopravvivenza (eterotrofi). Di particolare interesse risulta l'esame del complesso metabolismo nelle cellule di un organismo eterotrofo.

Introduzione

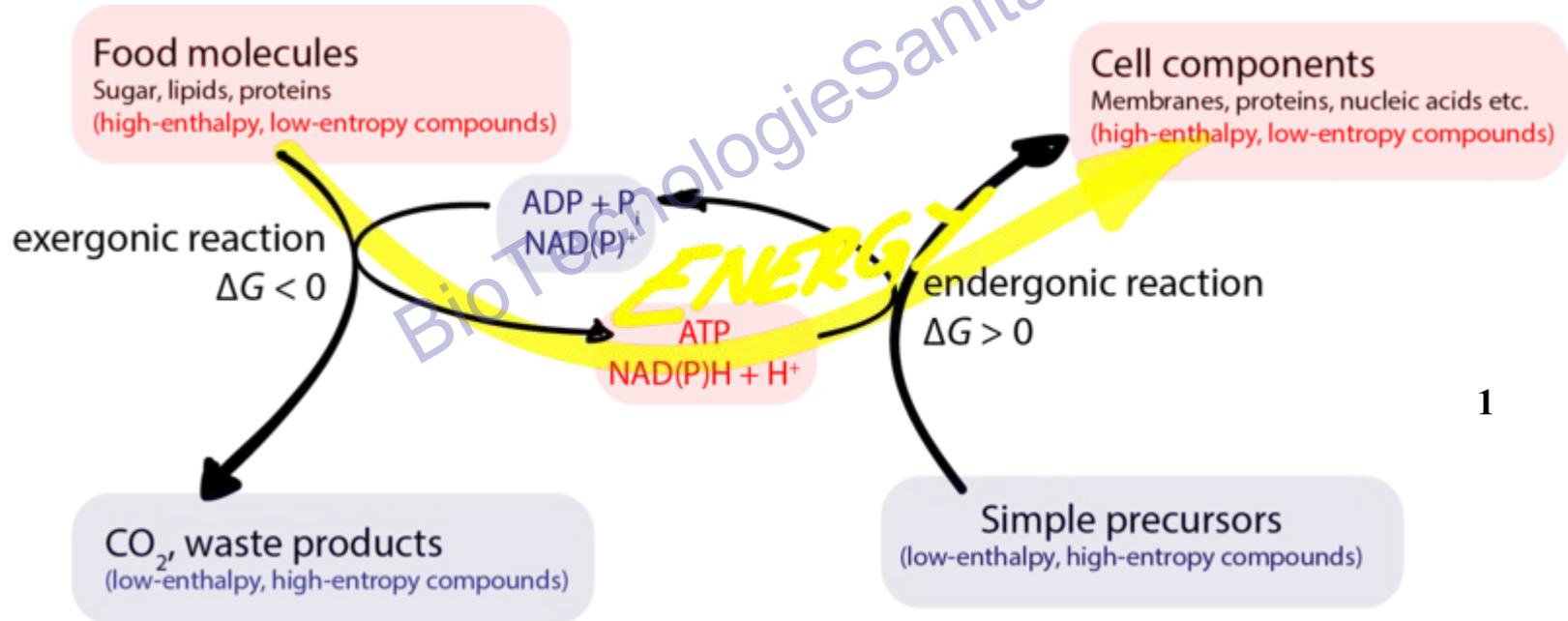
Questa immagine è il fulcro dello studio del metabolismo della cellula eucariote negli organismi eterotrofi.



1

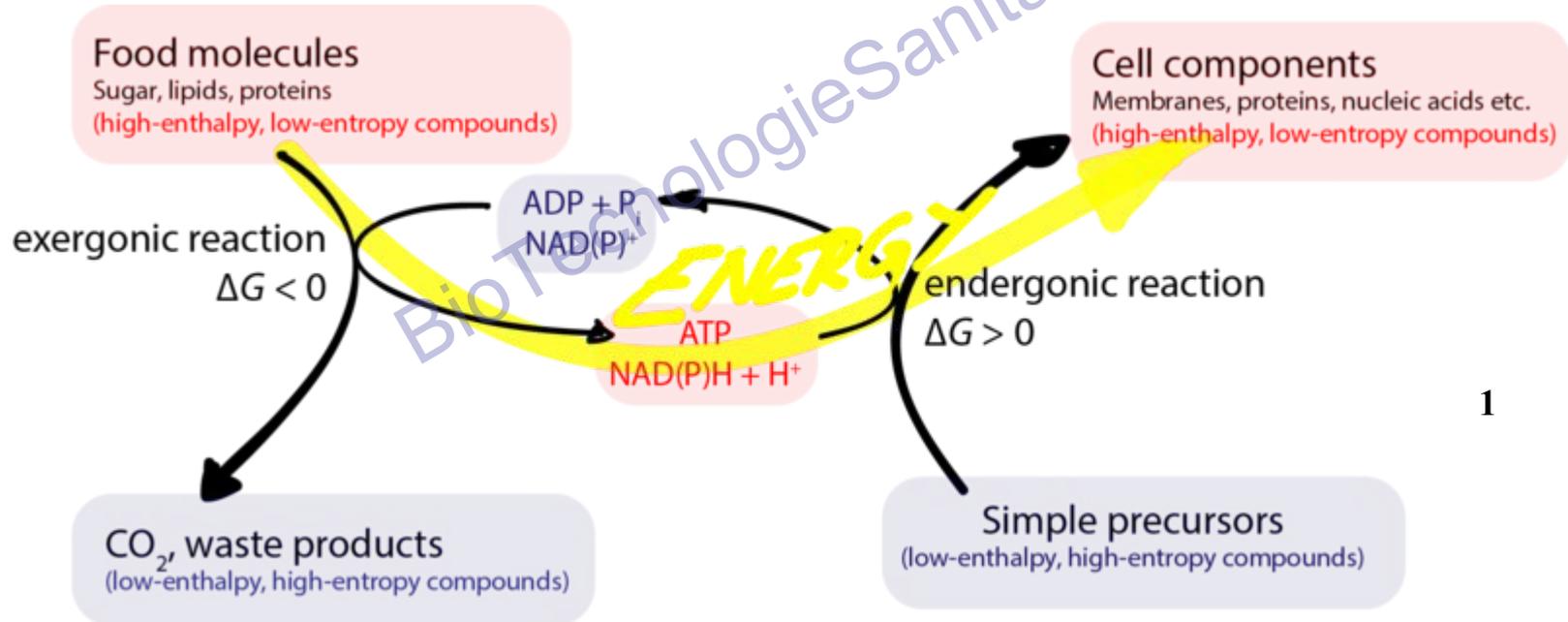
Introduzione

Sappiamo che le reazioni cataboliche sono esoergoniche perché liberano energia che viene immagazzinata nelle molecole di ATP.



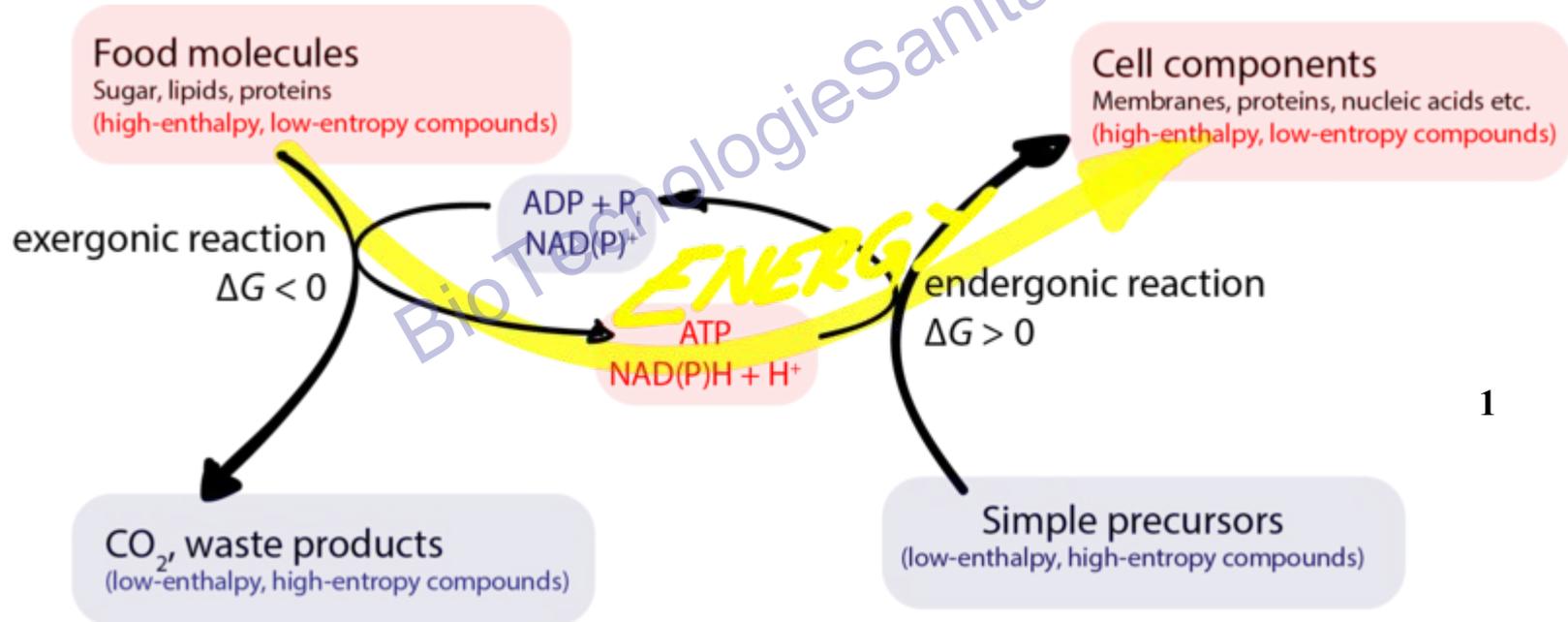
Introduzione

Le molecole di ATP vengono poi sfruttate nelle reazioni endoergoniche che necessitano di energia (reazioni anaboliche, movimenti cellulari, trasporto attivo, divisione cellulare ...)



Introduzione

Lo studio del metabolismo della cellula eucariote ci ha aiutato a capire che c'è un vero e proprio accoppiamento energetico che garantisce alla cellula i minimi sprechi.



1

Introduzione

Non solo. Le molecole nutritive esogene vengono sfruttate per la produzione di energia (respirazione cellulare) ma anche per ricavare la materia necessaria per le operazioni di sintesi chimica. Negli organismi eterotrofi la fonte energetica e di materia è la stessa.

Nel mondo microscopico, a cui è dedicata questa presentazione, esistono gli stessi percorsi metabolici ma a questi si affiancano numerose altre vie.

Introduzione

In particolare i batteri sfruttano anche altre fonti energetiche. Per esempio possono ossidare molecole inorganiche o fare una respirazione anaerobica, percorsi del tutto sconosciuti a piante ed animali.

Questa versatilità ha consentito e consente loro di sopravvivere in condizioni ambientali sfavorevoli e fa capire come mai sono presenti sulla Terra da più di tre miliardi di anni.

Per studiare il metabolismo microbico cominciamo proprio dalla fonte di energia.



Fonti di energia: la luce

BioTecnologieSanitarie.it

Fonti di energia

I microrganismi e in particolare i procarioti rispetto agli eucarioti hanno quindi una grande **varietà metabolica**.

Intanto cominciamo a classificarli secondo la fonte di energia.

- **Fotoautotrofi o fototrofi**: convertono la luce solare in energia chimica di legame attraverso la fotosintesi
- **Chemioautotrofi o chemiolitotrofi**: ottengono energia dall'ossidazione di composti chimici inorganici
- **Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi**: ottengono energia dall'ossidazione di composti organici

Fonti di energia: la luce del sole

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Iniziamo con i **fotoautotrofi**.

Piante, alghe eucariote e alcuni gruppi di batteri sono in grado di trasformare la radiazione solare (soprattutto lo spettro visibile) in energia chimica di legame ma le modalità per trasferire il potere riducente possono essere molto diverse.

Fonti di energia: la luce del sole

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Piante, alghe eucariote e cianobatteri utilizzano come riducente l'acqua con produzione di ossigeno, considerato prodotto di scarto (**fotosintesi ossigenica**).

I batteri fotosintetici rossi e verdi utilizzano come riducente un composto inorganico ridotto (ad esempio il solfuro di idrogeno H_2S) senza quindi la produzione di ossigeno (**fotosintesi anossigenica**).

Fonti di energia: la luce del sole

Quindi, considerando come fonte di carbonio sempre l'anidride carbonica e indicando con H_2A il riducente, possiamo scrivere l'equazione della fotosintesi nel seguente modo:



H_2A e A rappresentano una sostanza rispettivamente nella forma ridotta e ossidata.

(CH_2O) è invece la formula generica di uno zucchero con il rapporto corretto di atomi costitutivi.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: la luce del sole

Se la fotosintesi è anossigenica e indicando il riducente nel solfuro di idrogeno la formula sarà:



Se la fotosintesi è ossigenica



FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

IL PUNTO ... PRIMA DI PROSEGUIRE

I batteri che stiamo per esaminare sono tutti

FOTOAUTOTROFI

per la fonte di energia ma

I CIANOBATTERI

PRODUCONO OSSIGENO

I BATTERI SOLFUREI ROSSI E VERDI

NON PRODUCONO OSSIGENO

IL PUNTO ... PRIMA DI PROSEGUIRE

Non solo, dalle reazioni appena esaminate abbiamo anche anticipato qual è la loro fonte di carbonio.

Per i cianobatteri ed i batteri solfurei rossi e verdi è la CO_2 .

Quindi per loro il termine fototrofi o fotoautotrofo non è completo. Sarebbe più opportuno indicarli come

AUTOTROFI E FOTOLITOTROFI

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemieterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

I protagonisti sono i **cianobatteri** batteri Gram-negativi, presenti nell'acqua e nel suolo, che possono vivere come individui singoli o riuniti in colonie che sono tondeggianti o filamentose.

L'immagine di lato mostra il genere **Nostoc** con colonie filamentose.



Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

Lo stesso Nostoc può dare origine a colonie sferiche come si può notare nelle foto di lato. Nella stessa foto è ben visibile il materiale mucillaginoso interno alla capsula che garantisce l'adesione tra individui e al substrato e quindi la possibilità di formare biofilm.



Colonie sferiche di Nostoc pruniforme
cianobatterio d'acqua dolce

Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

Inoltre il materiale mucillaginoso è un'ottima riserva idrica perché si imbibisce lentamente di acqua e altrettanto lentamente la rilascia quando si verificano condizioni critiche per la sopravvivenza. Il materiale può presentare pigmenti che proteggono dagli eccessi della radiazione solare.



Colonie sferiche di Nostoc pruniforme
cianobatterio d'acqua dolce

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

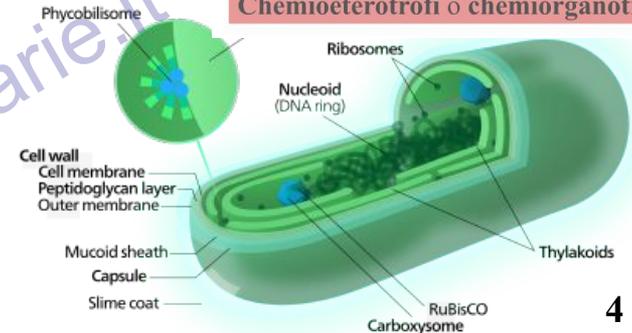
Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

I cianobatteri effettuano la fotosintesi su una serie di lamelle parallele, introflessioni della membrana cellulare, chiamate tilacoidi e che ricordano gli analoghi

tilacoidi delle cellule superiori. D'altra parte la teoria endosimbiontica afferma che i cloroplasti derivano da cianobatteri primitivi.

Sui tilacoidi sono inseriti i complessi multiproteici (clorofilla-a e carotenoidi) che danno vita ai fotosistemi I e II.



Struttura interna di un cianobatterio

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

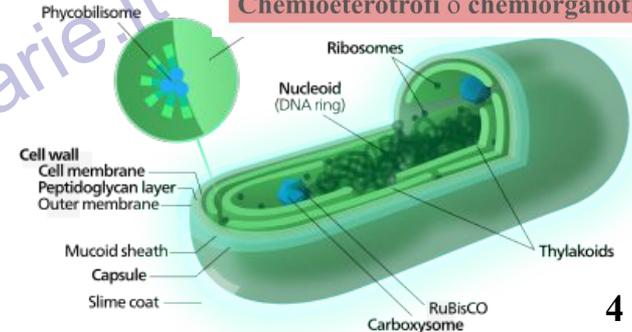
Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

Sul lato citoplasmatico dei tilacoidi sono inseriti i ficobilisomi in cui sono presenti soprattutto la ficocianina e la ficoeritrina. Essi hanno il compito di assorbire la luce

tra i 550 e i 650 nm e trasferirla alla clorofilla-a del fotosistema II.

Tra gli inclusi del citoplasma si devono ricordare i carbossilisomi che contengono l'enzima RuBisCo che catalizza la fissazione della CO₂ durante il ciclo di Calvin.

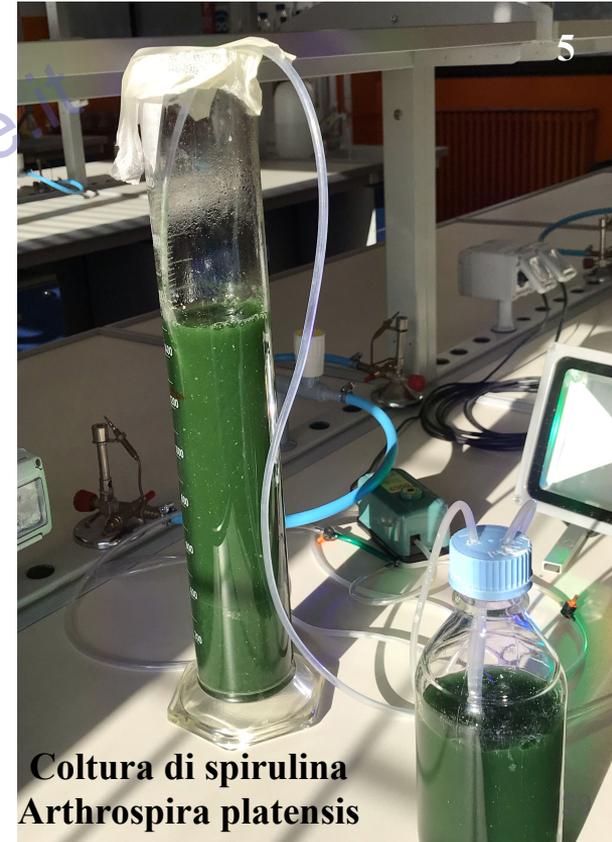


Struttura interna di un cianobatterio

Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

I cianobatteri effettuano la fotosintesi con le stesse modalità delle cellule vegetali e delle alghe eucariote. Si rimanda quindi alla pagina del [metabolismo della cellula eucariote](#) per i dettagli delle due fasi. C'è da ricordare che per distinguere la sintesi dell'ATP nella fase luminosa da ciò che avviene nella fase finale della respirazione cellulare si utilizza in modo più appropriato il termine **fotofosforilazione**.



Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

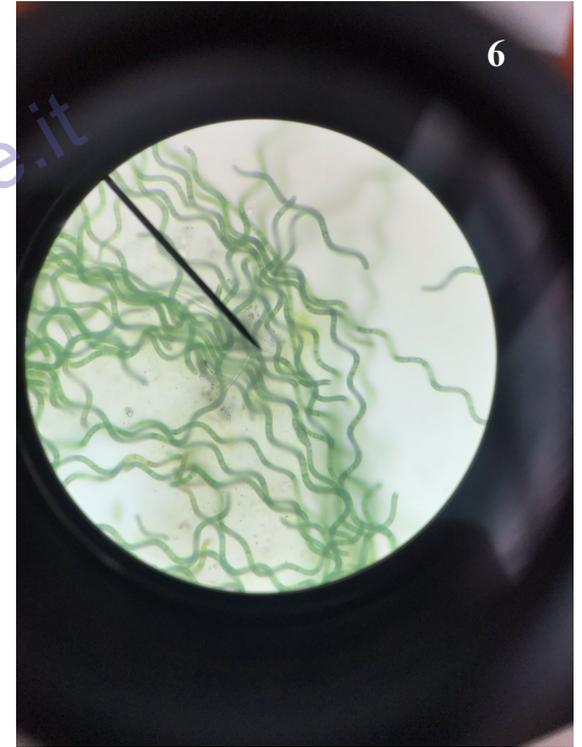
Inoltre va ricordato che quanto detto per lo schema Z nella fase luminosa della fotosintesi delle piante e delle alghe eucariote è valido anche per cianobatteri. Si tratta di una fotofosforilazione non ciclica in quanto gli elettroni emessi e persi dal fotosistema II vengono rimpiazzati dagli elettroni prodotti dall'acqua dopo la sua fotolisi.

In qualche caso, invece, si attua una fotofosforilazione ciclica perché gli elettroni giunti alla ferredossina non vengono trasferiti al NADP^+ ma reinviati al centro di reazione P700. Quindi, passando un'altra volta attraverso la catena di trasporto degli elettroni, si producono più molecole di ATP.

Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

I cianobatteri grazie alla loro attività fotosintetica sembra che siano stati i primi esseri viventi ad arricchire di ossigeno l'atmosfera primordiale della Terra e formano attualmente una parte cospicua del fitoplancton.



Spirulina al M.O.
Arthrospira platensis

Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

I cianobatteri sono dei veri e propri bio-costruttori in quanto sottraendo CO_2 dall'ambiente con la fotosintesi provocano la precipitazione di carbonato di calcio. Si formano così delle piattaforme carbonatiche sia nell'acqua dolce che salata.

Un esempio sono gli stromatoliti in cui (Australia nord occidentale) sono state trovate le impronte fossili dei primi esseri viventi risalenti a 3,5 miliardi di anni fa.



Stromatolite

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

Per concludere la carrellata sui cianobatteri e sulla fotosintesi ossigenica bisogna ricordare che alcuni di loro in condizioni di anaerobiosi fissano l'azoto atmosferico.

La serie di reazioni ha luogo in cellule specializzate a parete ispessita e citoplasma meno denso che si chiamano eterocisti.

L'azoto gassoso viene fissato in ammoniaca (NH_3), nitriti (NO_2^-) e nitrati (NO_3^-).

Fonti di energia: fotosintesi ossigenica

Fotosintesi ossigenica

Alcuni cianobatteri del genere *Anabaena* (foto di lato) crescono spontaneamente nelle risaie e attualmente sono utilizzati per fertilizzare il riso senza dover ricorrere a fertilizzanti sintetici.



Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

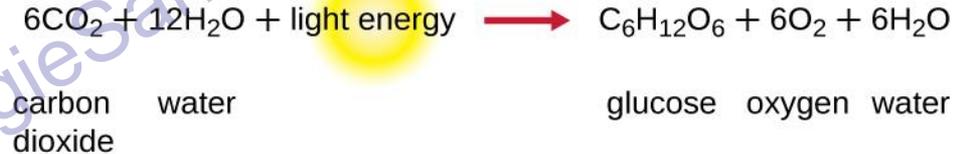
Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fotosintesi anossigenica

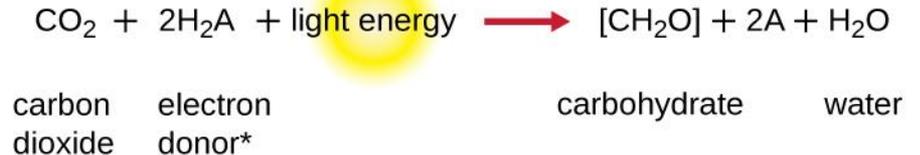
L'immagine di lato riporta il confronto, che già conosciamo, tra i due tipi di fotosintesi da cui appaiono evidenti alcuni dati.

Nella fotosintesi anossigenica non c'è l'acqua come agente riducente; al suo posto ci possono essere H_2S , solfiti, tiosolfati, H_2 (purché i batteri abbiano l'enzima idrogenasi) ...

Oxygenic photosynthesis



Anoxygenic photosynthesis



* $H_2A = H_2S, H_2,$ or other electron donor

9

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

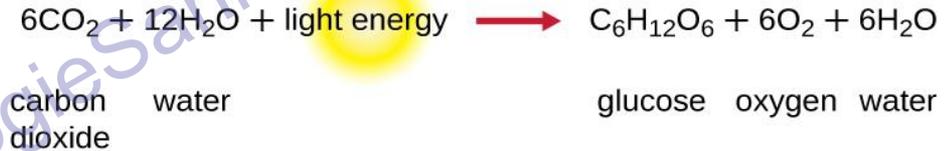
Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

Fotosintesi anossigenica

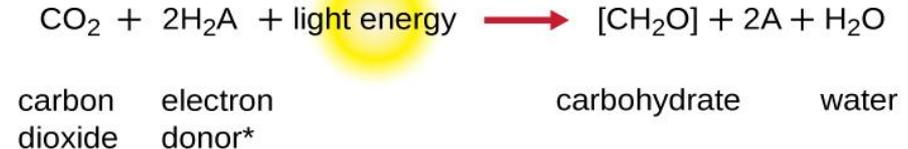
Quindi non si ha produzione di ossigeno gassoso. Da qui il nome.

Un'altra grande differenza è che esiste un solo fotosistema formato da 50-200 molecole di batterioclorofilla.

Oxygenic photosynthesis



Anoxygenic photosynthesis



*H₂A = H₂S, H₂, or other electron donor

Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fotosintesi anossigenica

E c'è una ragione logica. In questo caso non c'è la necessità di un secondo fotosistema in quanto il lavoro compiuto a spese della luce è inferiore rispetto alle piante verdi. Infatti l'estrazione di elettroni avviene da substrati a potenziale redox sensibilmente negativi. Gli elettroni prodotti si dirigono spontaneamente al centro di reazione che ha potenziale redox positivo (minimo + 250 mV).

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

Fotosintesi anossigenica

Altro particolare non indifferente. La batterioclorofilla assorbe le radiazioni solari fino all'infrarosso (tra 700 e 1050 nm) e quindi consente ai batteri che effettuano la fotosintesi anossigenica di vivere nell'acqua a profondità maggiori rispetto ai cianobatteri e alle alghe eucariote. Non c'è quindi competizione con gli altri procarioti fotosintetici.

Ma quali sono i batteri coinvolti?

Prima di tutto ricordiamo i batteri sulfurei rossi e verdi. Tra i due gruppi ci sono alcune differenze. Esaminiamole.

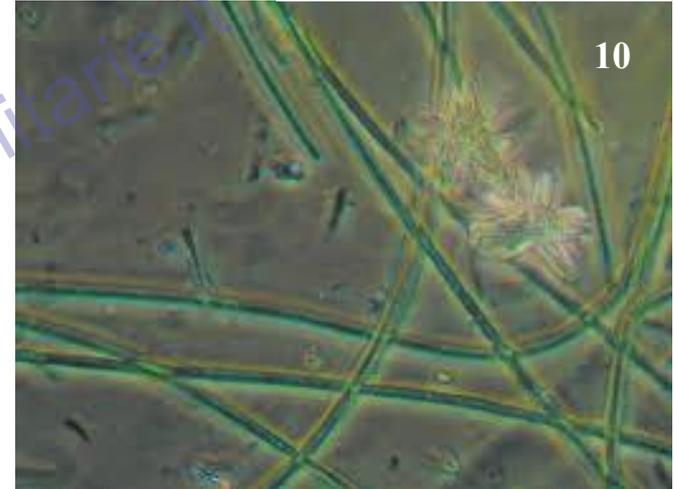
Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

Fotosintesi anossigenica

Cominciamo dai **batteri sulfurei verdi**.

Il genere rappresentativo è Chlorobium (immagine di lato). Si tratta di batteri anaerobi (non producono e non usano O_2) e autotrofi, fotolitotrofici perché usano la CO_2 come fonte di carbonio e l'agente riducente è sempre

inorganico ma non è l' H_2O . Sono stati trovati fino a 145 metri di profondità nel Mar Morto. La batterioclorofilla è localizzata nei clorosomi, vescicole annesse alla membrana cellulare e rivestite di un unico strato lipidico.



Fotoautotrofi o fototrofi

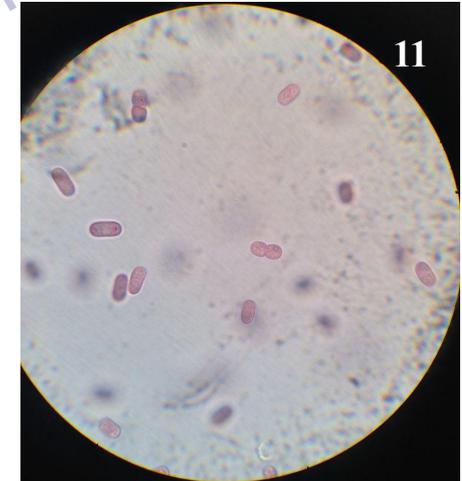
Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

Fotosintesi anossigenica

I **batteri sulfurei rossi**, il cui genere rappresentativo è **Chromatium** (nella foto) hanno, per lo più, le stesse caratteristiche dei precedenti. Ma in qualche caso possono essere mixotrofi, cioè capaci anche di respirazione aerobica e fermentazione. Oltre alla clorofilla presentano più carotenoidi a cui si deve il loro colore. Si trovano nei laghi in cui ci sono accumuli di solfuro di idrogeno.



Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

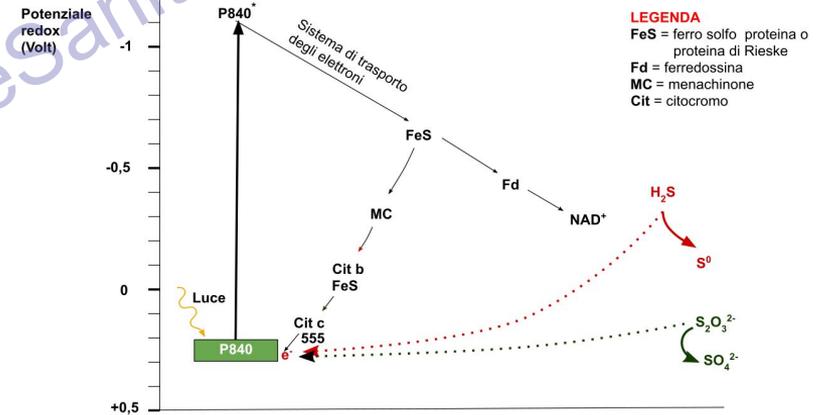
Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

Fotosintesi anossigenica

Ora analizziamo, come esempio, cosa succede nei batteri verdi sulfurei. Il loro unico fotosistema ha un centro di reazione detto **P840** che contiene una coppia speciale di batterioclorofille.

Nel percorso non ciclico l'elettrone eccitato dalla radiazione luminosa non ritorna al punto di partenza ma viene utilizzato per ridurre NADP^+

FOTOSINTESI ANOSSIGENICA BATTERI VERDI SULFUREI 12



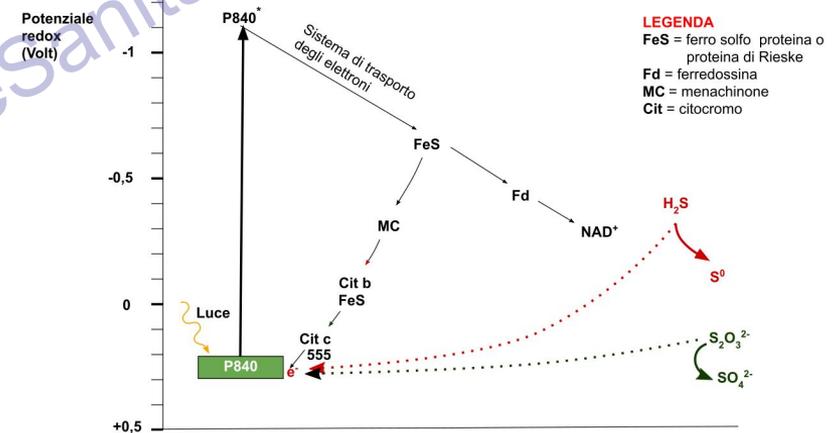
Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

Fotosintesi anossigenica

La lacuna elettronica nel fotosistema P840 viene colmata da elettroni provenienti da sostanze solforate ridotte (per esempio H_2S oppure solfiti).

La forma ossidata dello zolfo si accumula come granuli, in molte specie, all'interno della cellula.

FOTOSINTESI ANOSSIGENICA BATTERI VERDI SOLFUREI 12



Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

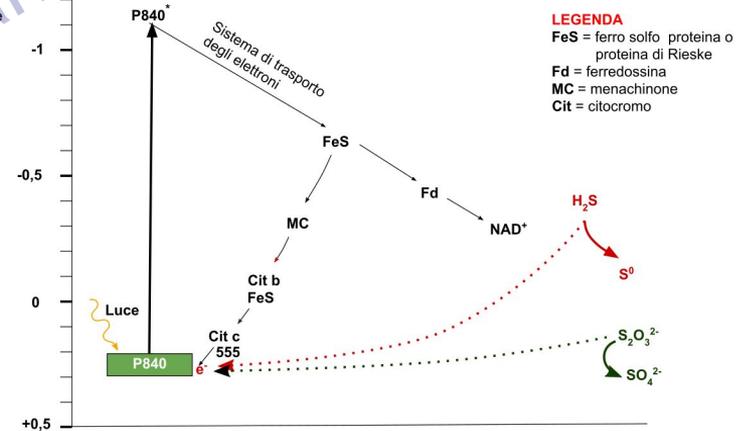
Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

Fotosintesi anossigenica

Questo percorso non ciclico coesiste con un percorso ciclico che comporta il ritorno dell'elettrone al centro di reazione (attraverso un citocromo c_{555}) e quindi la formazione di ATP.

FOTOSINTESI ANOSSIGENICA BATTERI VERDI SOLFUREI 12



Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: fotosintesi anossigenica

Fotosintesi anossigenica

Non tutti i passaggi sono chiari così come si sa che ai batteri sulfurei verdi mancano alcuni enzimi del ciclo di Calvin.

È stato proposto quindi come meccanismo di riduzione della CO_2 un ciclo di Krebs invertito in cui l'accettore potrebbe essere l'acetil-coenzima A e il riducente la ferredossina.

Nei batteri sulfurei rossi invece la riduzione dell'anidride carbonica avviene regolarmente attraverso il ciclo di Calvin.

Fonti di energia: luce del sole, donatori di H organici

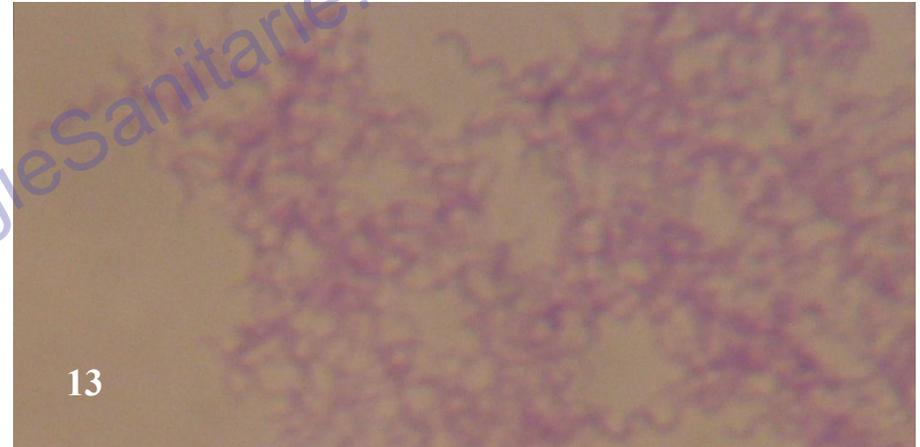
Non tutti i batteri rossi e verdi sono fotolitotrofi.

Infatti i **batteri rossi e verdi non sulfurei**, pur utilizzando come fonte di energia la luce, hanno come donatori di idrogeno o elettroni sostanze organiche. Composti organici sono anche la loro fonte di carbonio. Quindi è più corretto definirli degli eterotrofi e nello specifico per loro il termine giusto è

ETEROTROFI E FOTORGANOTROFI

Fonti di energia: fotosintesi anossigenica facoltativa

Cominciamo ad esaminare i **batteri rossi non sulfurei**.
Appartengono alla famiglia Rhodospirillaceae e sono dei Proteobatteri che presentano un comportamento metabolico molto versatile.



Genere Rhodospirillum

Fonti di energia: fotosintesi anossigenica facoltativa

Batteri rossi non sulfurei. Utilizzano come sostanze riducenti una vasta gamma di composti soprattutto organici (acidi organici, amminoacidi, alcoli, zuccheri ...) ma in qualche caso anche H_2S . Sono anaerobi facoltativi e non solo, anche fotosintetici facoltativi. Il che rende possibile a loro effettuare la fotosintesi in presenza di luce ma in ambiente privo di ossigeno (fotosintesi anossigenica) e di comportarsi da eterotrofi al buio, in presenza di ossigeno.

Fonti di energia: fotosintesi anossigenica facoltativa

Batteri rossi non sulfurei. In genere vivono tra le acque ossigenate e quelle non ossigenate in associazione con batteri decompositori che forniscono loro le semplici molecole organiche che usano come sostanze riducenti o come fonte di carbonio. Infatti non sono in grado di degradare molecole organiche complesse.

Altra caratteristica da sottolineare è la loro versatilità morfologica: le cellule che crescono alla luce presentano strutture vescicolari fotosintetiche che sono invece completamente assenti in quelle che crescono al buio.

Fonti di energia: fotosintesi anossigenica facoltativa

Batteri rossi non sulfurei. La specie più studiata è la Rhodopseudomonas palustris (nella foto).

Con tecniche genetiche sono stati ottenuti dei mutanti che non sono più in grado di effettuare la fotosintesi per soppressione dei relativi geni. I mutanti crescono grazie ad un metabolismo respiratorio che possono avviare in modo autonomo.



Fonti di energia: fotosintesi anossigenica facoltativa

Batteri rossi non sulfurei. Il centro di reazione di questi batteri è detto P870. La catena di trasporto degli elettroni inizia quando la coppia di batterioclorofille del centro di reazione viene eccitata dall'assorbimento della luce. Il P870 eccitato donerà quindi un elettrone a una serie di carrier lungo una catena specifica. Nel processo, genererà un gradiente elettrochimico utilizzato per sintetizzare l'ATP. Il centro di reazione deve essere rigenerato per essere nuovamente disponibile per un nuovo ciclo; la lacuna viene colmata da elettroni donati essenzialmente da sostanze organiche.

IL PUNTO ... PRIMA DI PROSEGUIRE

Prima di passare all'esame specifico di tipologie di procarioti che sfruttano altre fonti energetiche insolite è essenziale comprendere fino in fondo il processo fotosintetico e il suo significato.

Si tratta di una serie di reazioni che complessivamente sono fortemente endoergoniche e che consentono il passaggio del potere riducente, in altre parole di protoni ed elettroni, da una molecola stabile e a basso contenuto energetico come l' H_2O o l' H_2S ad una molecola instabile e ad alto contenuto energetico come la CO_2 .

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti inorganici

Passiamo ora ai **chemioautotrofi o chemiolitotrofi**.

Si tratta essenzialmente di batteri che traggono energia dall'ossidazione di semplici molecole inorganiche. Il percorso energetico è una **respirazione aerobica** che però non prevede la degradazione di molecole con fasi analoghe alla glicolisi o al ciclo di Krebs. Viene attivata direttamente una catena respiratoria. Infatti il substrato cede elettroni ad un accettore iniziale della catena; nel flusso successivo si producono molecole di ATP con il coinvolgimento di forze protonmotrici fino all'accettore finale, l' O_2 .

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti inorganici

La resa energetica non è molto alta come si può facilmente intuire ma l'aspetto interessante di questi batteri è che spesso lavorano in sinergia con altri utilizzando i prodotti del loro metabolismo.

L'esempio migliore lo possiamo osservare nelle fasi del ciclo dell'azoto ([Cicli biogeochimici](#): dalla slide 73 alla slide 115).

Dopo la fissazione dell'azoto molecolare (N_2) in ioni ammonio (NH_4^+), non direttamente utilizzabili dalle piante, è necessario procedere alla loro ossidazione prima in nitriti (NO_2^-) e poi in nitrati (NO_3^-) finalmente assimilabili dalle piante.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

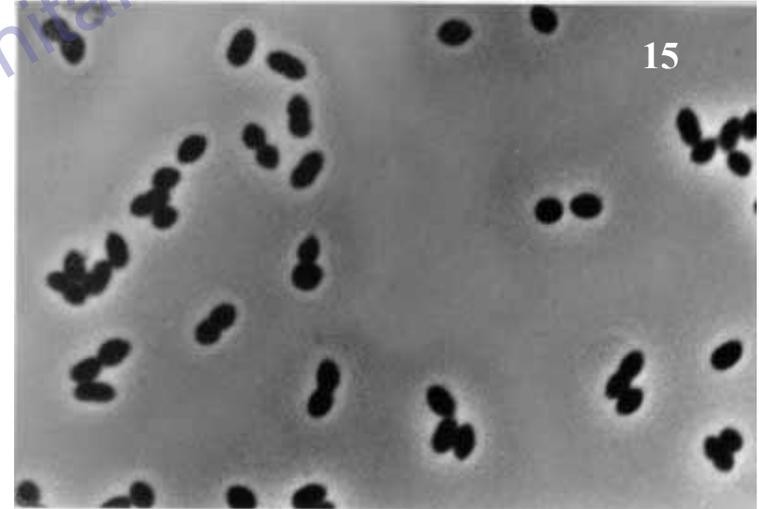
Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti inorganici

Del primo passaggio (NH_4^+) \rightarrow (NO_2^-)
si incaricano i batteri nitrosanti o
ammonio-ossidanti. Un esempio è il
genere **Nitrosomonas**, uno dei cinque
generi associati all'ossidazione dello
ione ammonio.

Nitrosococcus è un altro genere di
batteri nitrosanti.



Nitrosomonas eutropha

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

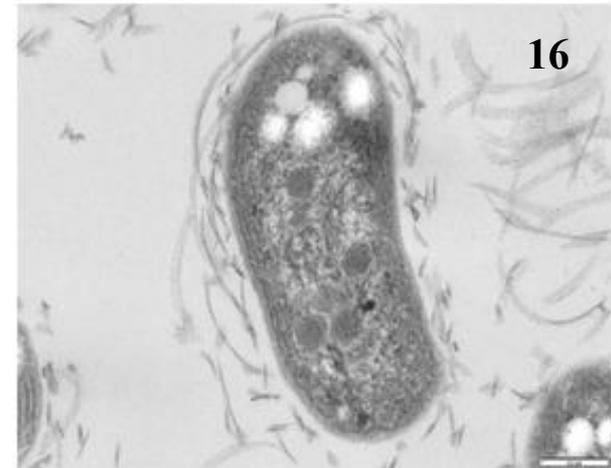
Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti inorganici

Il secondo passaggio da nitriti a nitrati, (NO_2^-)
→ (NO_3^-), è dovuto all'attività di ossidazione
dei batteri nitrificanti o nitrito-ossidanti.

Nitrobacter è l'esempio riportato nelle slide
già citate, dedicate al ciclo dell'azoto.

Sia i batteri nitrosanti che i nitrificanti si
ritrovano sia nel suolo che nell'acqua ma anche
nelle acque reflue in cui svolgono un compito
decisamente molto importante.



Nitrobacter winogradskyi

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti inorganici

Il potere riducente può essere ottenuto anche da altri composti inorganici come i solfuri (S^{2-}) con produzione di ioni solfato (SO_4^{2-}). In questo caso si parla di solfobatteri. I rappresentanti più studiati sono il **Thiobacillus** e la **Thiomicrospira** presenti nel suolo e nella acque. Altra categoria interessante è quella dei ferrobatteri che lavorano su ioni di ferro ridotti Fe^{2+} per trasformarli in ioni Fe^{3+} . Generi come **Siderocapsa** si ritrovano nelle acque anche stagnanti ricche di sali di ferro ridotti.

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti inorganici

Tutti questi batteri hanno come fonte di carbonio la CO_2 che possono organicare attraverso il ciclo di Calvin. La possibilità è fornita dalla presenza dell'enzima RuBisCO. Non è detto che questa sia la via metabolica necessaria però; infatti possono sopravvivere anche in presenza di sostanze organiche oltre che di anidride carbonica.

Un'ultima riflessione. I batteri chemioautotrofi sono stati trattati velocemente ma è ovvio che per poter attuare diverse vie metaboliche come fonte energetica si devono affidare ad enzimi diversi. Anche il numero di molecole di ATP può essere diverso.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Ora è la volta dei **chemioeterotrofi o chemiorganotrofi**

A questo gruppo appartengono i protozoi, i funghi, gli animali e la maggior parte dei batteri. Non svolgono la fotosintesi ma sono in grado di ricavare energia a partire dall'ossidazione di molecole organiche.

Non rientra in questo caso l'ossidazione di composti inorganici già trattata nelle slide precedenti per i chemiolitotrofi.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le vie metaboliche per ricavare energia tra i chemiorganotrofi sono essenzialmente tre:

- ❖ **respirazione aerobica**, diffusa tra eucarioti e procarioti
- ❖ **fermentazione**, tipica dei procarioti
- ❖ **respirazione anaerobica**, presente solo in alcuni procarioti

Cominciamo ad esaminare la respirazione aerobica

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

La respirazione a cui ci si riferisce è la via metabolica comune ad eucarioti e procarioti che porta alla demolizione completa dei carboidrati con produzione di H_2O , CO_2 e ATP. Viene esaminata, per quanto compete la Biologia, nella pagina dedicata al [metabolismo della cellula eucariote](#) (slide 89 - 133). Qui ci occupiamo degli aspetti peculiari dei microrganismi rimandando alle slide citate per le reazioni comuni.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

I carboidrati sono biomolecole essenziali nei batteri non solo perché presenti a livello strutturale nella cellula ma anche e soprattutto per il ruolo giocato nel catabolismo. Sono la principale fonte energetica. In diverse prove di laboratorio può essere testato questo fatto. Basta variare la quantità e la qualità degli zuccheri per constatare importanti variazioni nella crescita, ad esempio.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

Ogni microrganismo è in grado di utilizzare solo i carboidrati per cui presenta le proteine carrier della membrana cellulare specifiche per il trasporto e, ovviamente, gli enzimi necessari alle vie metaboliche. Quindi in laboratorio questo aspetto è importante per identificare i batteri.

Altro elemento da tenere presente è che attraverso la membrana passano solo monosaccaridi e quindi i batteri devono poter utilizzare degli enzimi extracellulari, come l'amilasi, per degradare molecole complesse all'esterno prima di poterle introdurre.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

Prendendo in considerazione la demolizione del glucosio che è universalmente utilizzato da tutti gli esseri viventi, le fasi della respirazione aerobica sono le seguenti:

1. glicolisi
2. decarbossilazione ossidativa del piruvato
3. ciclo di Krebs
4. fosforilazione ossidativa

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

1. Glicolisi

Con questo termine si indica una serie di reazioni che, partendo da una molecola di glucosio (6 atomi di carbonio) porta complessivamente alla formazione di 2 molecole di piruvato (ognuna a tre atomi di carbonio), più 2 molecole di ATP e 2 di NADH.

In realtà le molecole di ATP che si producono sono 4 ma se ne consumano 2 e quindi il bilancio netto è di 2 molecole.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

1. Glicolisi

È interessante notare che in questa prima fase della respirazione aerobica le 2 molecole di ATP si formano come conseguenza di una fosforilazione a livello di substrato. In altre parole per il trasferimento di un gruppo fosfato sull'ADP. Il gruppo fosfato proviene da due intermedi metabolici della glicolisi: l'acido 1,3-difosfoglicerico e il fosfoenolpiruvato.

La glicolisi è nota anche come via di Embden-Meyerhof.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

A questo punto il destino del piruvato dipende dalla presenza o meno di ossigeno.

In presenza di ossigeno si avvia alla seconda fase della respirazione aerobica; in assenza di ossigeno prende un'altra via metabolica, la fermentazione, di cui ci occuperemo subito dopo la respirazione aerobica.

La fermentazione ha una resa energetica minore perché non porta alla demolizione completa del glucosio e quindi si hanno prodotti più semplici ma ancora organici.

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

2. Decarbossilazione ossidativa del piruvato.

In presenza di ossigeno alla glicolisi segue questa fase che porta alla produzione di una molecola di CO_2 e di un gruppo acetile (a 2 atomi di carbonio).

Il gruppo acetile si unisce al Coenzima A. L'acetil-CoA dà inizio al ciclo di Krebs. Da sottolineare che nelle cellule batteriche non esistono organelli citoplasmatici e quindi questa fase come il ciclo di Krebs si verifica nel citoplasma.

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

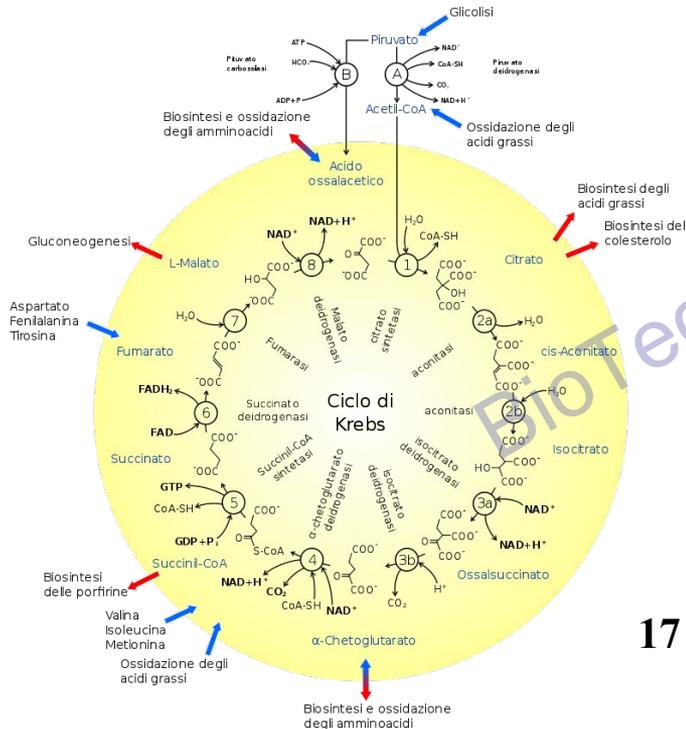
Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

3. Ciclo di Krebs

Si tratta di un gruppo complesso di 8 reazioni che parte con l'ossalacetato; all'inizio si lega all'acetile trasferito dal coenzima A per formare l'acido citrico. La serie di reazioni termina con la formazione di ossalacetato che ha il compito di riavviare un altro ciclo.



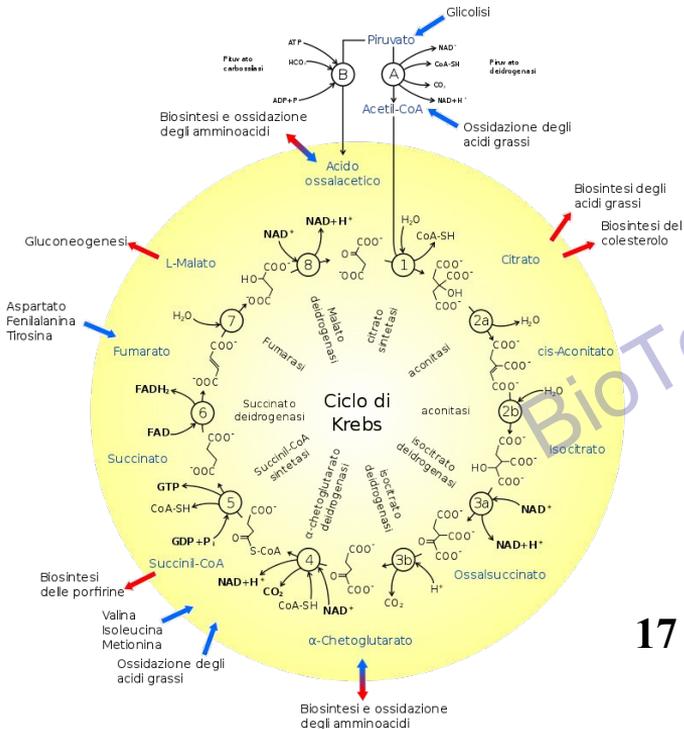
Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica



17

3. Ciclo di Krebs

Ad ogni ciclo e per ogni molecola di piruvato iniziale si producono:

- 2 molecole di CO_2
- 3 molecole di NADH e 1 di FADH_2 che si formano in seguito a diverse ossidoriduzioni
- 1 molecola di GTP

Tutte queste molecole vengono analizzate nel [metabolismo della cellula eucariote](#)

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

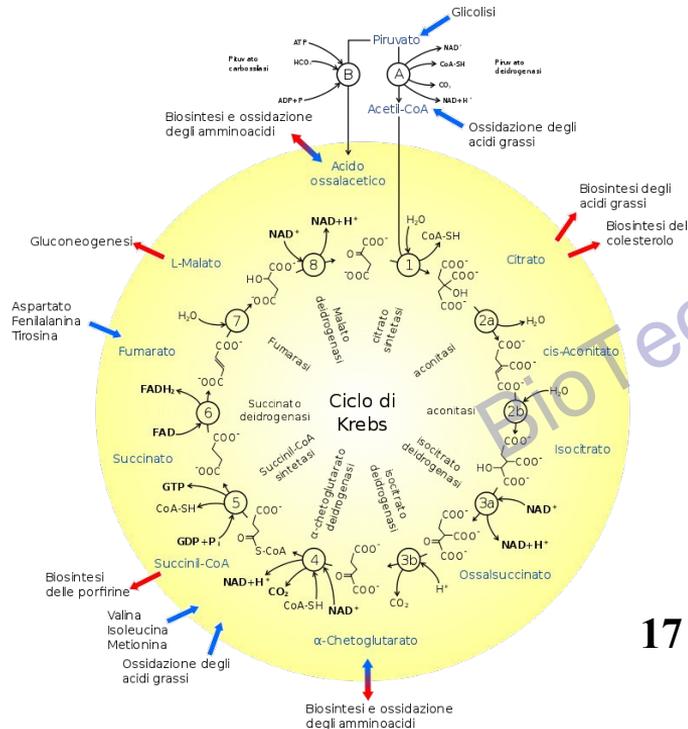
Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

3. Ciclo di Krebs

La molecola di GTP è un analogo dell'ATP e può essere usata come tale o trasformarsi in ATP.

L'aspetto interessante è che anche questa si forma in seguito a fosforilazione a livello di substrato.



Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

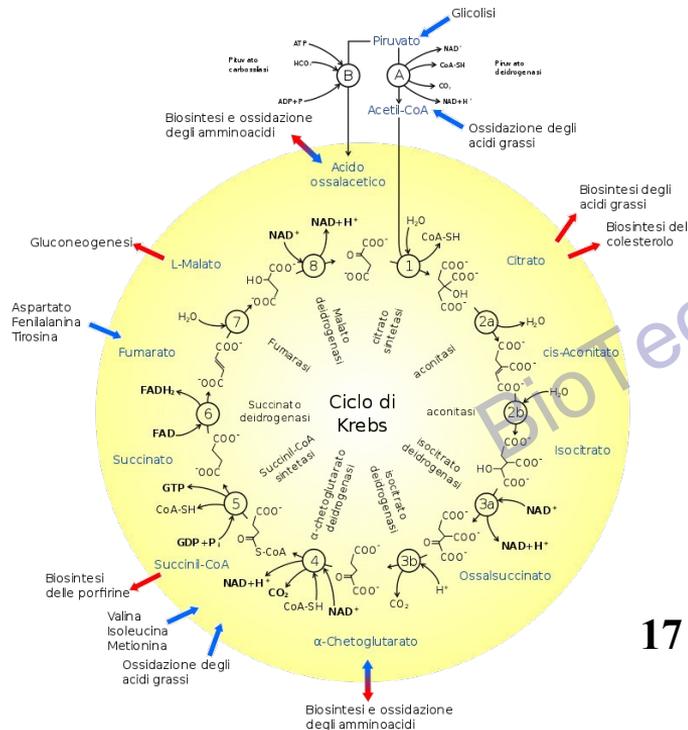
Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

3. Ciclo di Krebs

Altro elemento da ricordare è che sul ciclo di Krebs convergono anche altre vie metaboliche legate ai protidi e ai lipidi. Per esempio l'acetil-CoA può derivare dalla loro demolizione e quindi dai residui carboniosi degli aminoacidi, dal glicerolo oppure dagli acidi grassi.



Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

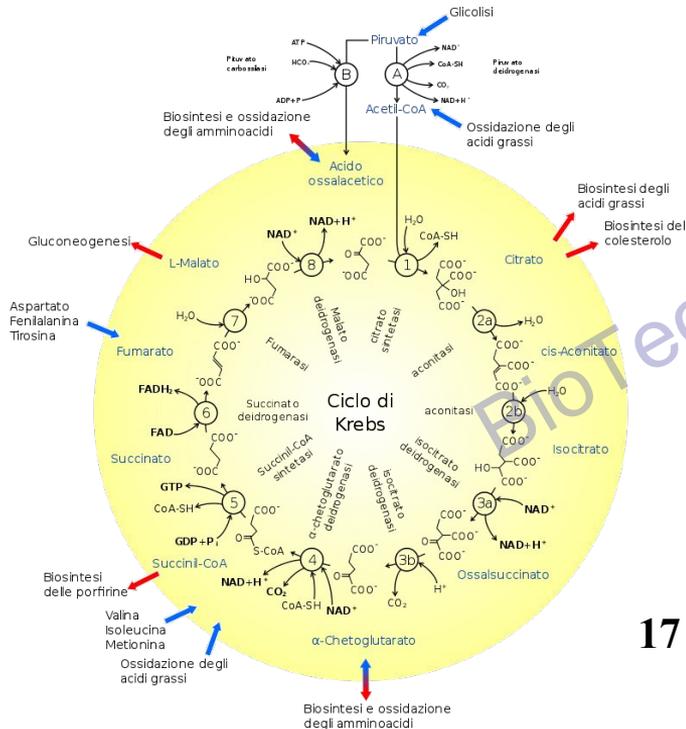
Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

3. Ciclo di Krebs

Non solo. Come si può vedere nello schema accanto, alcuni metaboliti intermedi sono precursori di vie di sintesi. Quindi il ciclo di Krebs è centrale nel metabolismo di qualsiasi essere vivente che trae energia dall'ossidazione di composti organici.



17

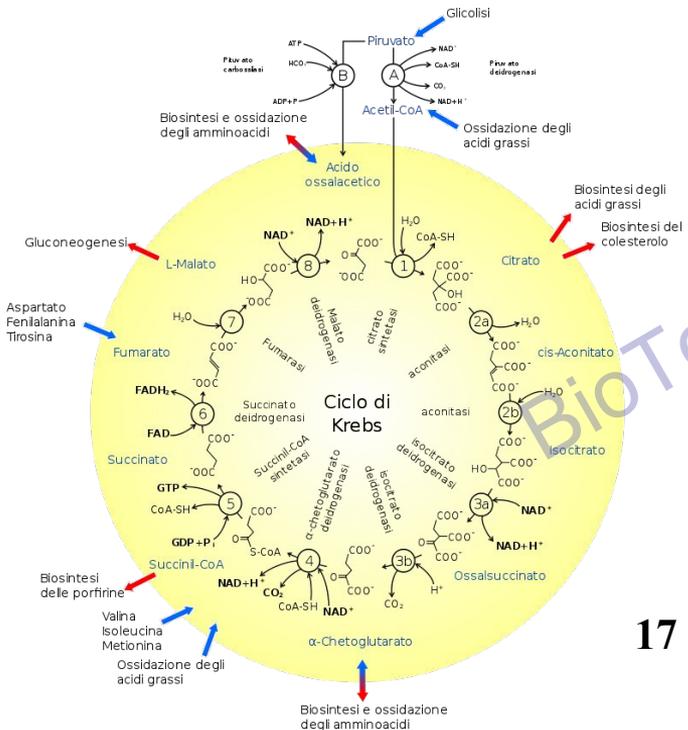
Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica



3. Ciclo di Krebs

Ma se la degradazione dei composti organici si associa anche alla produzione di precursori per la sintesi ad esempio di amminoacidi, gli organismi viventi hanno dovuto superare una situazione che avrebbe potuto diventare un vero problema: il ciclo di Krebs deve poter essere alimentato continuamente dall'esterno.

17

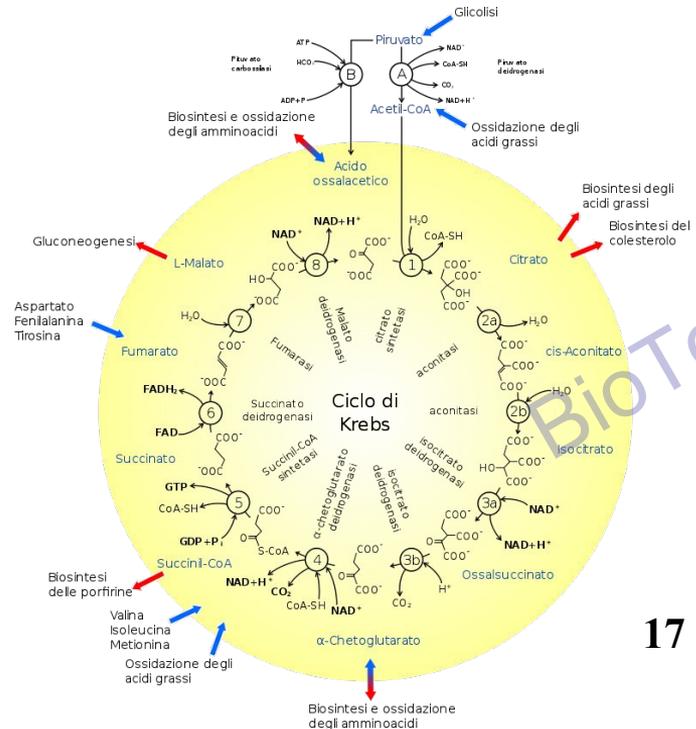
Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica



3. Ciclo di Krebs

Da solo non è autosufficiente. Prendiamo in considerazione l' α -chetoglutarato. Viene utilizzato come precursore nella biosintesi degli aminoacidi così come l'ossalacetato. Se l' α -chetoglutarato venisse utilizzato tutto non si potrebbe chiudere il ciclo con la formazione dell'ossalacetato che si unisce all'acetil-CoA per avviare un nuovo ciclo.

FONTE DI ENERGIA

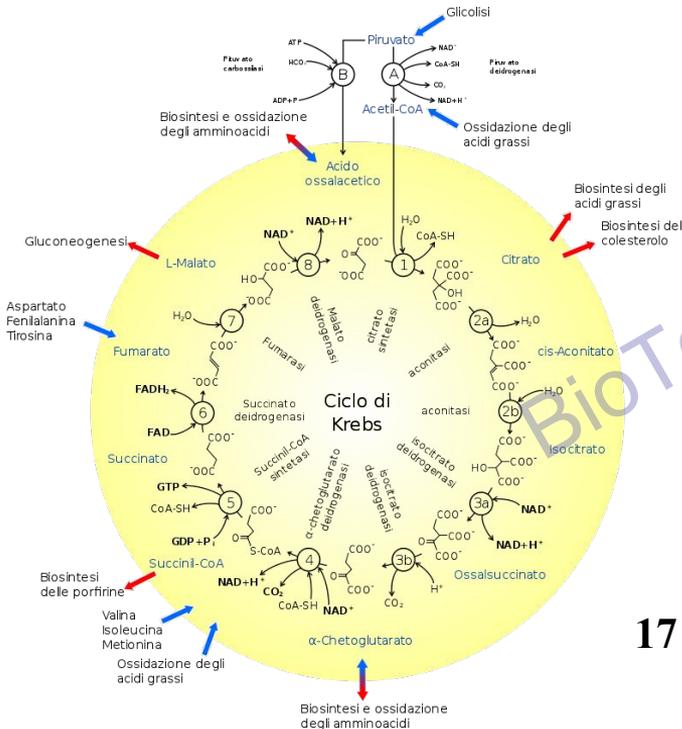
Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

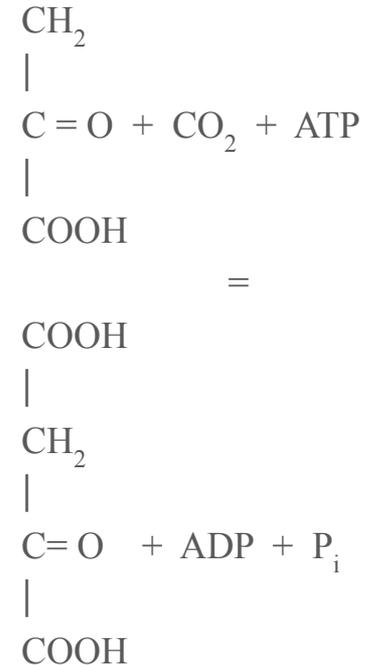
Respirazione aerobica



17

3. Ciclo di Krebs

Quindi viene garantito un surplus di ossalacetato che nel caso dei microrganismi deriva dalla carbossilazione dell'acido fosfoenolpiruvico o dell'acido piruvico grazie alla piruvato carbossilasi, come si può vedere di lato.



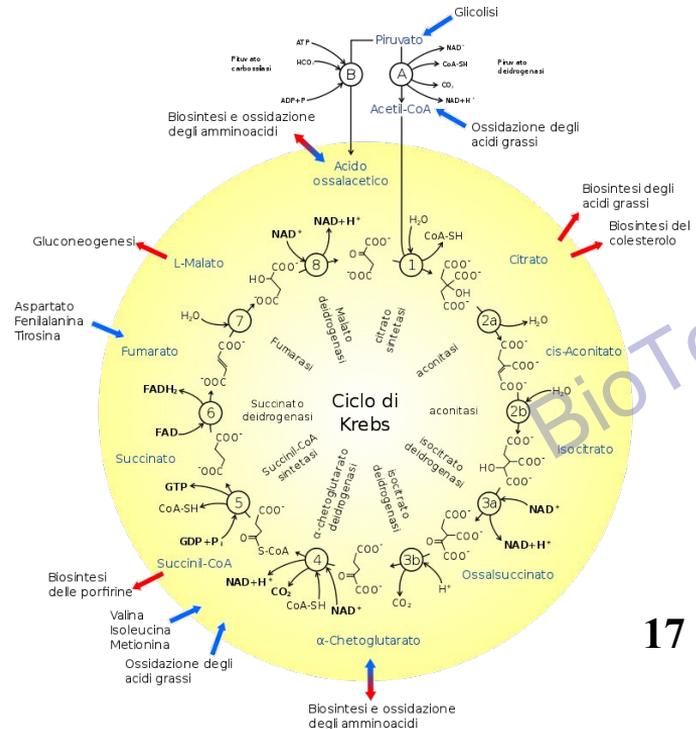
Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica



17

3. Ciclo di Krebs

Questa è una delle tante **reazioni anaplerotiche** che intervengono per rifornire dall'esterno il ciclo di Krebs degli intermedi che vengono sottratti per la sintesi di tanti composti. Oltre agli aminoacidi ricordiamo per esempio la sintesi del glucosio dall'acido ossalacetico oppure degli acidi grassi e degli steroli a partire dall'acido citrico.

Fonti di energia: composti organici

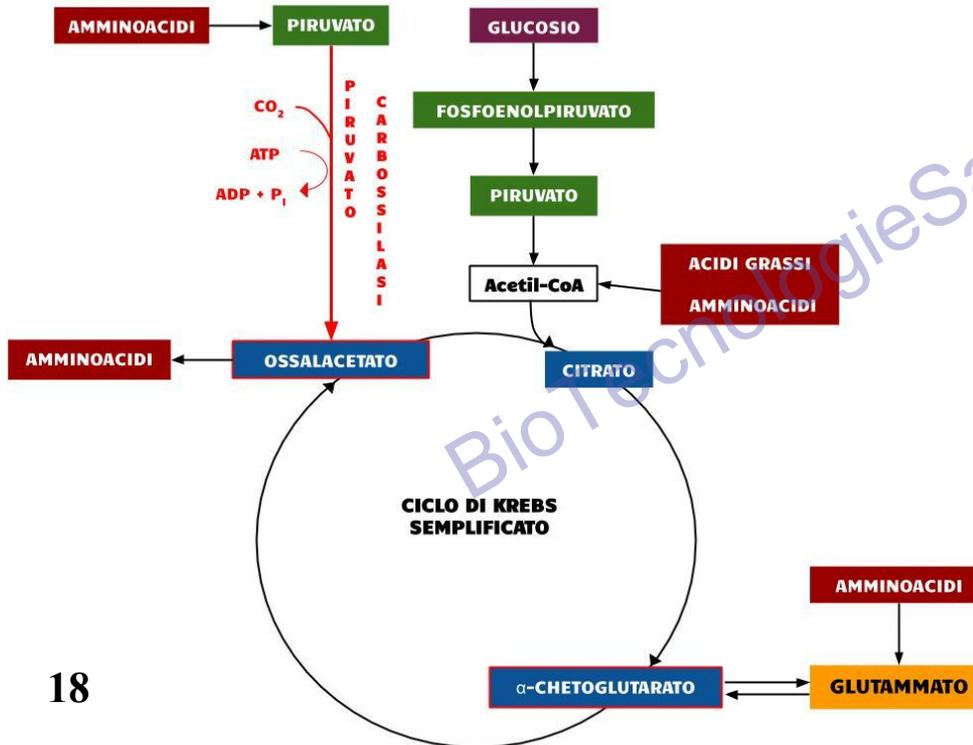
FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

CICLO DI KREBS E REAZIONE ANAPLEROTICA



3. Ciclo di Krebs

L'immagine di lato, con un ciclo di Krebs molto semplificato, mette in evidenza la reazione anaplerotica esaminata nelle slide precedenti (segnata con la freccia rossa).

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

4. Fosforilazione ossidativa

La fosforilazione ossidativa chiude la respirazione aerobica e serve a far tornare in forma ossidata tutti i coenzimi coinvolti nelle fasi precedenti. L'accettore terminale è ovviamente l' O_2 con produzione di H_2O e molecole di ATP.

Negli eucarioti le reazioni avvengono lungo le creste della membrana interna mentre nei procarioti direttamente sulla membrana plasmatica.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

4. Fosforilazione ossidativa

Sono coinvolti in questa fase dei complessi enzimatici con funzioni ossidoriduttive che danno vita ad una **catena di trasporto degli elettroni**.

I protoni e gli elettroni dei vari idrogeni trasferiti da NADH e FADH₂ prendono strade diverse.

Il trasferimento degli elettroni lungo la catena enzimatica avviene gradualmente ed è regolato dal potenziale redox dei singoli costituenti.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

4. Fosforilazione ossidativa

Infatti gli elettroni vengono trasferiti a cascata dal costituente a maggiore potenziale redox verso quello a minore potenziale. Il che comporta il rilascio degli elettroni da parte del NADH che ha la minima affinità verso gli stessi; e il movimento avviene spontaneamente verso l'ossigeno che ha una forte tendenza ad acquisirli.

I protoni, invece, sfruttano parte dell'energia liberata durante il trasferimento degli elettroni per essere pompati all'esterno della membrana plasmatica.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

4. Fosforilazione ossidativa

Il movimento dei protoni (H^+) genera una diversa distribuzione di cariche sui due lati della membrana e quindi una differenza di potenziale. E non solo. Infatti la diversa concentrazione di idrogenioni sui due lati determina anche una differenza di pH.

Da entrambe queste situazioni nasce una **forza proton-motrice** che spinge i protoni a rientrare all'interno della cellula procariote ma questo può avvenire solo grazie a proteine transmembrana, le **ATP sintetasi**

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione aerobica

4. Fosforilazione ossidativa

Oltre alla parte transmembrana che serve al passaggio dei protoni le ATP sintetasi hanno anche una porzione che sporge all'interno del citoplasma dei procarioti; ed è proprio grazie a questa porzione che può essere sfruttata l'energia rilasciata durante il passaggio dei protoni per legare il gruppo fosfato all'ADP e produrre le molecole di ATP.

La fosforilazione ossidativa sembra avvenire nei procarioti e negli eucarioti senza differenza sostanziali a parte la localizzazione.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

Le due molecole di piruvato ottenute dalla glicolisi proseguono l'iter della respirazione cellulare solo in presenza di ossigeno. Ma esistono batteri e lieviti anaerobi che non possono sopravvivere in queste condizioni per cui la via energetica è obbligatoriamente diversa.

Si parla in questo caso di fermentazione.

Vediamo in che cosa consiste.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

Il termine intanto assume più significati.

Nel linguaggio comune viene usato per indicare effervescenza o addirittura ebollizione. C'è una frase celebre della poesia San Martino di Giosuè Carducci da cui possiamo partire.

«dal ribollir de' tini / va l'aspro odor de i vini / l'anime a rallegrar»

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi



La foto si riferisce ad una fermentazione in corso in uve Pinot nero. Una fermentazione analoga deve aver suggerito a Carducci le rime che tutti noi abbiamo imparato a scuola. La maggior parte della gente sa oggi che “il ribollir” è dovuta a lieviti.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

Nello stesso tempo usiamo il termine effervescenza se notiamo una serie di bollicine accompagnate da un odore sgradevole quando apriamo una scatola di verdure avariate. In questo caso la parola ha una connotazione negativa e scartiamo il prodotto. Il cibo è andato a male. La causa è una contaminazione di microbi.

Anche questa è una certezza per tutti al giorno d'oggi.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

Il termine fermentazione viene anche usato in generale a livello industriale in relazioni a diversi tipi di processi dovuti a microrganismi che portano alla produzione di alimenti, farmaci e molecole di vario tipo indipendentemente dal fatto che avvenga o meno in assenza di ossigeno.

Dal punto di vista biochimico però il termine ha un significato molto preciso.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

In pratica, in assenza di ossigeno, la molecola di piruvato subisce ulteriori ma limitati passaggi che portano alla formazione finale di composti ancora organici e di nessun'altra molecola di ATP oltre alle due che derivano dalla glicolisi e che sono state ottenute dalla fosforilazione a livello di substrato.

La fermentazione è una via energetica tipica dei microrganismi anaerobi con una resa bassa bilanciata però dal fatto che essi sono in grado di modificare grandi quantità di substrato.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

Il primo che ha studiato le fermentazioni in modo scientifico è stato Pasteur ma l'uomo nella produzione di birra e vino, nella lievitazione del pane o nella preparazione di certe verdure le ha sempre sfruttate imparando con il buon senso e la pratica a ottenere prodotti più gustosi.

Oggi la conoscenza scientifica ci consente di avere risultati decisamente migliori e di poter spaziare in campi molteplici.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

Non solo. Si conoscono sempre meglio anche i microbi coinvolti e si sanno coltivare in grandi quantità per cui le rese industriali stanno diventando sempre più interessanti e sono sempre più numerose e diversificate.

Questo aspetto viene presentato nelle sezioni dedicate alle produzioni biotecnologiche suddivise fra alimenti, biomasse microbiche, molecole ad uso farmaceutico e metaboliti primari.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

Ricapitolando, fino ad ora abbiamo visto che:

- in assenza di ossigeno batteri e funghi non possono avvalersi del ciclo di Krebs e della fosforilazione ossidativa
- i prodotti della glicolisi (2 molecole di piruvato, 2 molecole di ATP e 2 NADH) devono prendere una via diversa

Soprattutto c'è da tenere presente che i NADH devono tornare allo stato ossidato per riavviare la glicolisi

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

Batteri e funghi chiudono pertanto la via energetica con pochi ulteriori passaggi che portano alla formazione di composti organici che diventano essi stessi accettori degli idrogeni trasferiti dalle molecole di NADH (formate durante la glicolisi).

Esistono diversi tipi di fermentazione a seconda dei prodotti che si ottengono: alcolica, lattica, malolattica, butirrica, propionica, acida mista ...

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Le fermentazioni.

Alcune di queste fermentazioni hanno un'importanza notevole nel campo dell'industria alimentare (vedi l'alcolica e la lattica).

Altre sono state studiate attentamente per poter distinguere i generi di batteri all'interno di una famiglia a scopo diagnostico (vedi la fermentazione acido-mista e 2,3-butilenglicolica). Oppure per diagnosticare la presenza di un gruppo particolare di clostridi (fermentazione butirrica).

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione alcolica

La fermentazione alcolica comporta la produzione di **alcol etilico** ed **anidride carbonica** a partire dal piruvato.

Viene effettuata per lo più da **lieviti** (in maggioranza saccaromiceti di cui *Saccharomyces cerevisiae* è il rappresentante più tipico) che in realtà sono anaerobi facoltativi ed è legata a diversi tipi di produzioni industriali, alimentari e non.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione alcolica

Il vino, la birra, il sidro e il sakè sono il risultato di fermentazioni alcoliche ma anche il pane o la pizza lo sono (lievitati da forno).

Nel caso di bevande alcoliche ovviamente il prodotto prioritariamente interessante è l'alcol.

Nella panificazione è l'anidride carbonica, la vera causa del rigonfiamento dell'impasto mentre l'alcol evapora durante la cottura.

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione alcolica

A livello industriale vengono utilizzati anche particolari **batteri** (*Zymomonas*); per esempio nella produzione del [bioetanolo](#), carburante su cui si concentrano grossi interessi economici ma anche molti problemi di varia natura.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi



20

Fonti di energia

La fermentazione alcolica

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

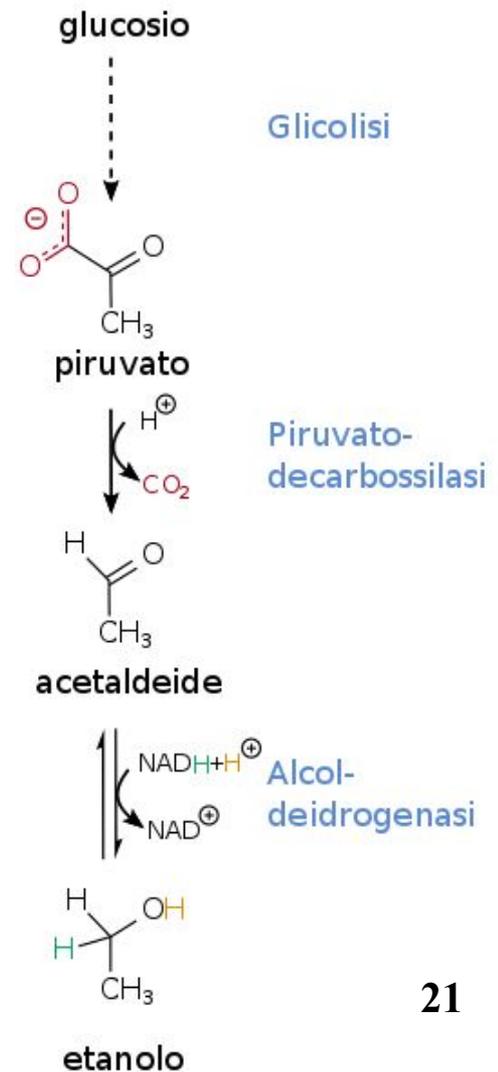
Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Le reazioni che portano alla produzione di alcool etilico e anidride carbonica e alla ossidazione del NADH sono due.

Prima di tutto l'acido piruvico viene decarbossilato ad acetaldeide e questa ridotta ad alcool etilico.

Questa la formula conclusiva:



Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione alcolica

I prodotti della fermentazione alcolica non si limitano al solo alcol etilico e all'anidride carbonica. Ad essi si devono aggiungere diversi sottoprodotti che in campo alimentare hanno un ruolo decisivo nelle caratteristiche organolettiche.

Ricordiamo l'acido acetico, l'acido piruvico, l'acido succinico, l'aldeide acetica, la glicerina ...

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

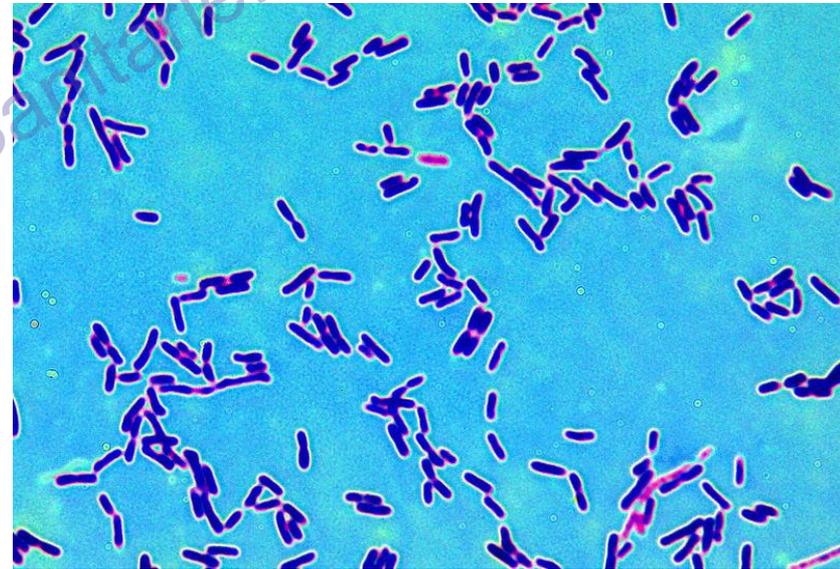
Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione lattica

La fermentazione lattica è operata da un gruppo di batteri noti come **lattobacilli** e indicati con la sigla **LAB** (lactic acid bacteria).

La fermentazione del glucosio in questo caso comporta la produzione di lattato oppure di lattato associato ad altri prodotti (alcol etilico e anidride carbonica)



Lattobacilli al M.O. (ingrandimento 1000x) **22**

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione lattica

Questo tipo di fermentazione ha una grande importanza dal punto di vista alimentare. I lattobacilli sono coinvolti nella produzione di yogurt, kefir, crauti, olive in salamoia, sottaceti. E non solo, anche nella maturazione di formaggi e insaccati e nella preparazione di pesce fermentato. Nelle produzioni biotecnologiche di yogurt e verdure fermentate vengono esaminate più dettagliatamente.

Il risvolto negativo è che in qualche caso i lattobacilli possono essere responsabili di alterazioni alimentari.

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione lattica

Prima di proseguire l'esame della fermentazione lattica vale la pena ricordare che i lattobacilli creano un ambiente acido che si oppone alla crescita di molti altri batteri. La spiegazione sta nel fatto che essendo queste reazioni a bassa resa energetica i lattobacilli devono fermentare una notevole quantità di substrato. Da qui la diminuzione del pH dell'ambiente in cui operano. Per questo motivo vengono utilizzati anche nella conservazione degli alimenti.

Interessante, a proposito dell'ambiente acido che creano, il loro ruolo nella normale flora batterica vaginale. In particolare è stato studiato **Lactobacillus acidophilus** (noto anche come bacillo di Döderlein dal nome del suo scopritore).

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

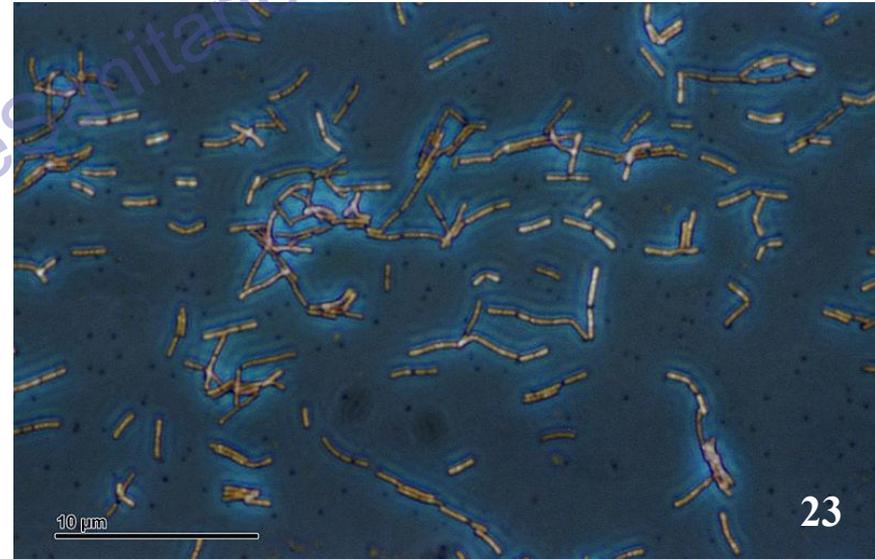
Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione omolattica

Lactobacillus acidophilus ha un ruolo fondamentale nel prevenire la crescita di microrganismi patogeni nella vagina.

In caso di reinfezioni ripetute con cistite una delle cure possibili è proprio il reintegro di questo batterio.



L. acidophilus fotografato al microscopio a contrasto di fase dopo colorazione Gram.

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

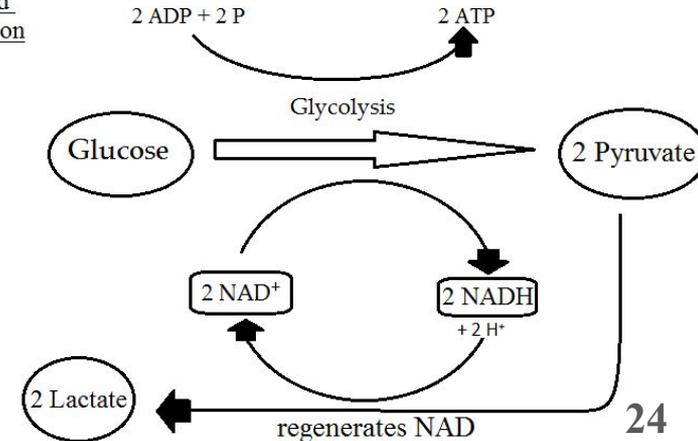
Fonti di energia: composti organici

La fermentazione omolattica

Cominciamo ad esaminare la fermentazione con produzione di solo lattato: la **fermentazione omolattica**.

Spesso viene anche chiamata glicolisi anaerobica perché via obbligata per ottenere energia.

Lactic Acid
Fermentation



FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

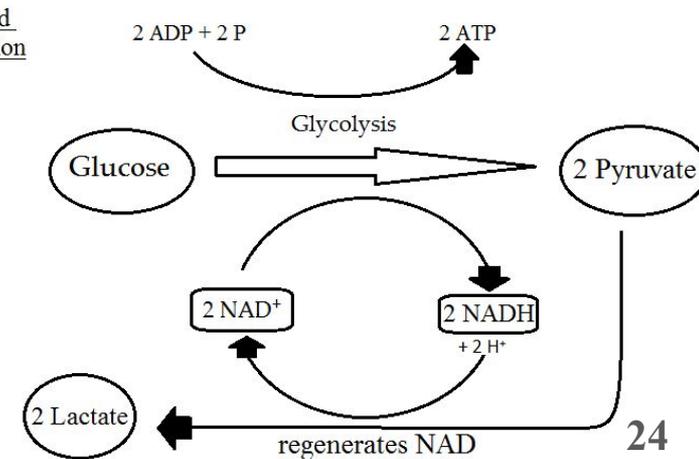
Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione omolattica

Il glucosio viene trasformato in piruvato e questo trasformato direttamente in lattato con la riossidazione del NADH ottenuto nella prima reazione.

Il bilancio di ATP è di sole due molecole. Ecco perché la resa energetica è molto bassa.



FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

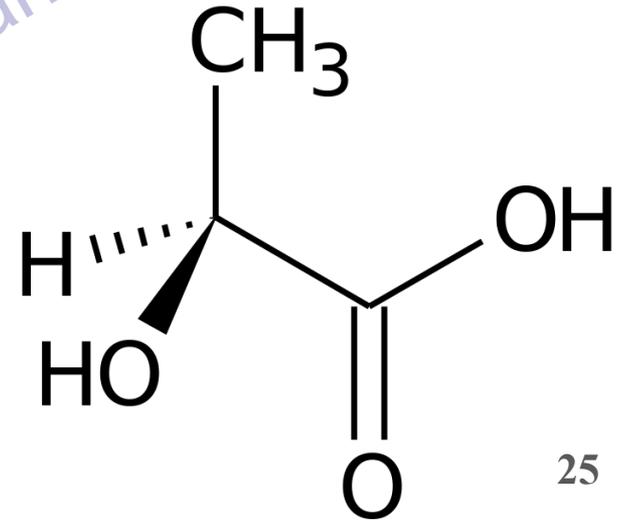
Fonti di energia: composti organici

La fermentazione omolattica

L'acido lattico è un acido carbossilico di formula $\text{CH}_3\text{-CHOH-COOH}$.

In ambiente endocellulare l'acido lattico è scisso al 99% in H^+ e $\text{CH}_3\text{-CHOH-COO}^-$.

Per questo motivo è sempre più corretto parlare di lattato.



Acido lattico

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

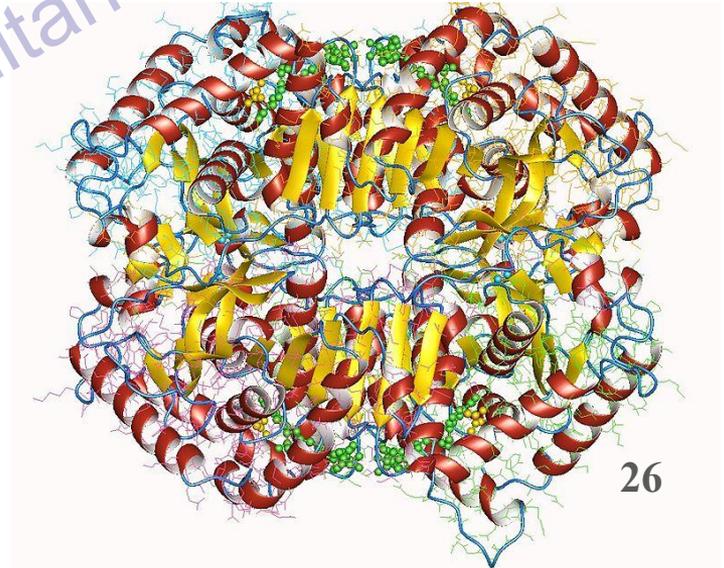
Fonti di energia: composti organici

La fermentazione omolattica

La conversione del piruvato in lattato e la riossidazione del NADH avviene grazie ad un enzima:

la **lattato deidrogenasi** (LDH).

Nell'immagine di lato oltre all'LDH sono rappresentate anche 4 molecole di NADH (in verde).



Fonti di energia: composti organici

La fermentazione omolattica

Fonte di energia

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Nelle produzioni alimentari la fermentazione lattica ha una notevole importanza nella preparazione di yogurt. Secondo le attuali normative i lattobacilli ammessi sono lo Streptococcus thermophilus e il Lactobacillus delbrueckii.



FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione omolattica

Ma la fermentazione omolattica avviene anche nell'organismo umano.

È il caso dei globuli rossi che essendo sprovvisti di mitocondri non possono certo ricavare energia dalla respirazione cellulare e quindi producono ATP attraverso questa via.

Oppure delle fibre muscolari sottoposte a sforzo intenso e in carenza di ossigeno.

Fonti di energia: composti organici

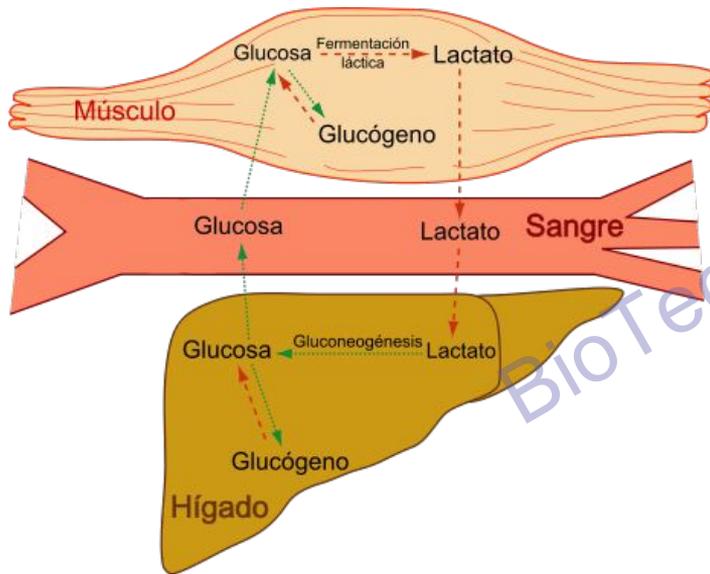
La fermentazione omolattica

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi



L'immagine di lato suggerisce quanto succede quando nelle fibre muscolari si accumula lattato. Le cellule non riescono a smaltirlo rapidamente e quindi lo eliminano nel circolo sanguigno.

Il sangue trasferisce il lattato nel fegato.

FONTE DI ENERGIA

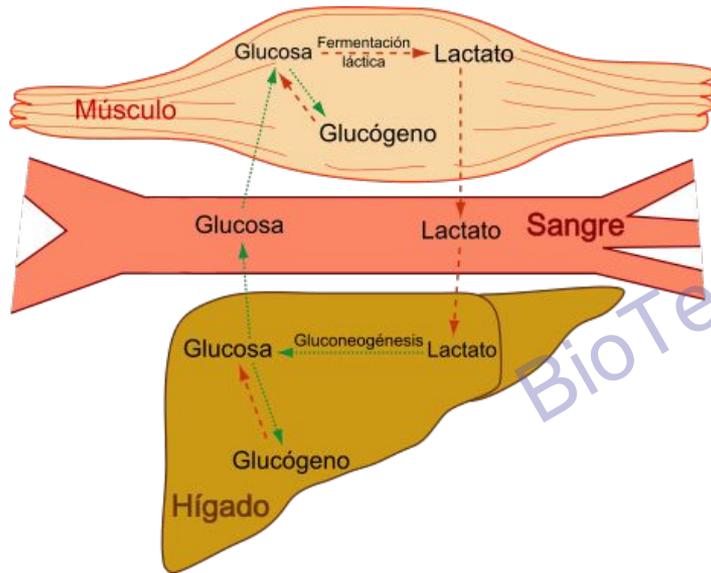
Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione omolattica



Il lattato viene riossidato a piruvato e poi attraverso la gluconeogenesi trasformato in glucosio.

Questa serie di reazioni è chiamata **ciclo di Cori**.

Il glucosio a questo punto a seconda delle esigenze metaboliche può essere accumulato nel fegato sotto forma di glicogeno o trasferito dal sangue in altri distretti.

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione eterolattica

Esaminiamo ora la fermentazione eterolattica. Lattobacilli del genere Leuconostoc e alcune specie particolari di Lactobacillus come L. brevis e L. fermentum, mancando di un enzima essenziale della glicolisi (l'aldolasi), seguono una via catabolica del glucosio diversa fin dall'inizio: la **via dei pentosofosfati**.

Si tratta di una serie di reazioni che partendo dal glucosio porta alla formazione di zuccheri pentosi a 5 atomi di carbonio, da cui il nome.

Alla fine del percorso si forma oltre al lattato anche etanolo e anidride carbonica. Si contano 2 molecole di NADPH e una sola molecola di ATP.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione eterolattica

Nell'industria alimentare la fermentazione eterolattica viene sfruttata per la produzione del **kefir**, nella foto di lato, bevanda che si ottiene dal latte. Originaria del Caucaso è ormai diffusa in molti paesi.



29

FONTI DI ENERGIA

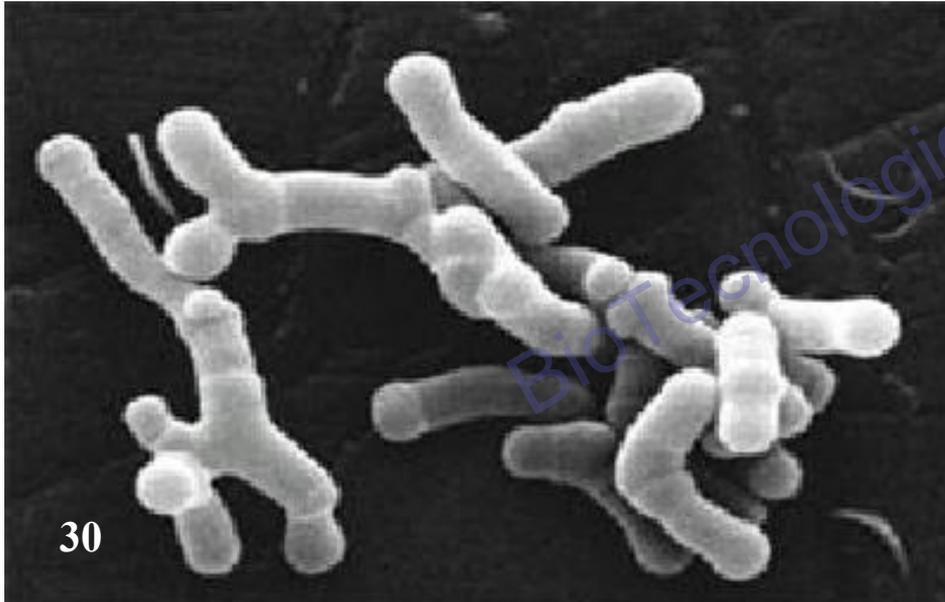
Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione dei bifidobatteri



Bifidobacterium longum

Il genere Bifidobacterium comprende specie che operano una fermentazione particolare con produzione di 2 molecole di lattato e 2 molecole di acetato a partire da una molecola di glucosio.

Si tratta di batteri a forma di Y

FONTI DI ENERGIA

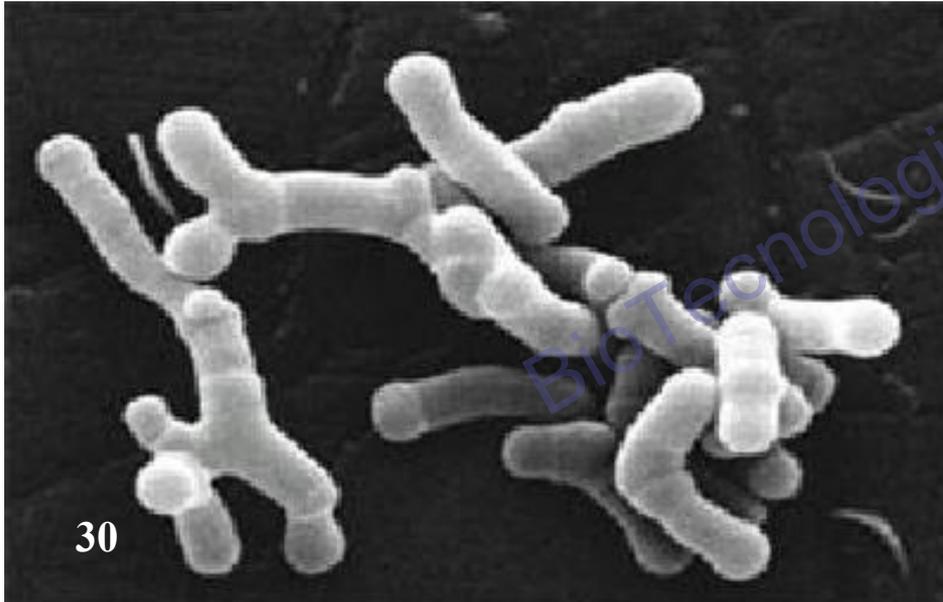
Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

La fermentazione dei bifidobatteri



Bifidobacterium longum

Sono presenti nel microbiota intestinale; in particolare la specie nella foto è stata catalogata tra i primi colonizzatori nei neonati.

Recentemente è stata individuata anche nelle feci degli ultracentenari.

Grazie alle sue vie metaboliche particolari viene considerata un pulitore dell'intestino

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione acido-mista

Come si può intuire dal nome, questo tipo di fermentazione porta alla formazione di acidi organici (acidi lattico, acetico, succinico e formico) + etanolo + CO_2 + H_2 . Si tratta di una via metabolica tipica degli **Enterobatteri** (*Escherichia coli*, *Shigella*, *Salmonella*) e di altri generi quali **Photobacterium**, **Proteus** e **Vibrio**. Sono tutti bacilli gram-negativi che sono in grado di degradare il glucosio anche in presenza di ossigeno. Gli Enterobatteri vivono nell'intestino dell'uomo mentre gli altri generi sono ubiquitari e popolano suolo e acque.

Fotoautotrofi o fototrofi

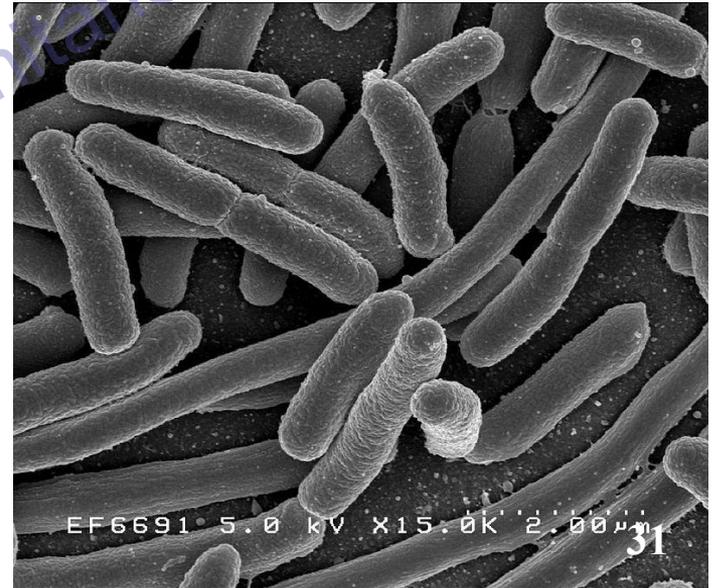
Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione acido-mista

Non è detto però che si abbiano tutti i prodotti citati. Ad esempio la produzione di CO_2 è tipica di *Escherichia coli* e dei bacilli appartenenti al genere *Proteus* ma non negli altri. Quindi un test formulato su queste caratteristiche può essere importante a scopo **diagnostico** per discriminare tra le varie specie di questa famiglia.



Escherichia coli

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione acido-mista

Da notare che nella fermentazione acido-mista la quantità di acidi prodotti è talmente elevata che possono essere rilevati semplicemente con l'indicatore rosso metile.

Infatti quando il pH si abbassa sotto 4,4 l'indicatore vira da giallo a rosso.

La situazione è analizzata nella slide successiva.

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione acido-mista

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi



Transizione di colore della soluzione di rosso metile in diverse condizioni acido-base.

A sinistra: acido

Al centro: circa pH 5,1

A destra: alcalino

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione 2,3-butilenglicolica

Questo tipo di fermentazione porta anch'essa alla produzione di acidi ma in quantità molto minore per cui non può essere utilizzato il test al rosso metile.

Però le tecniche diagnostiche sfruttano un altro dato, cioè la molecola di acetoina ottenuta dal piruvato e precursore del butilenglicole.

I batteri coinvolti in questa serie di reazioni sono **Enterobacter**, **Serratia** e **Klebsiella**.

Il test utilizzato per la ricerca di acetoina è detto di Voges-Proskauer

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

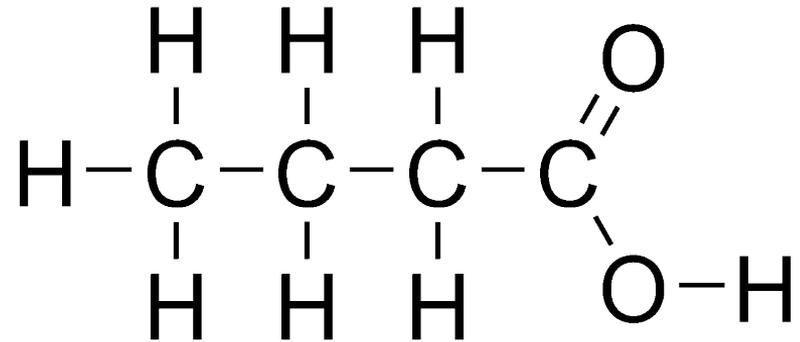
Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione butirrica

La fermentazione butirrica viene effettuata da batteri gram-positivi, sporigeni e anaerobi obbligati, soprattutto del genere **Clostridium** (a cui appartengono anche alcune specie patogene di rilievo).

Il processo, scoperto da Pasteur nel 1861 e che porta alla formazione dell'acido butirrico, inizia con la divisione glicolitica del glucosio in due molecole di piruvato.

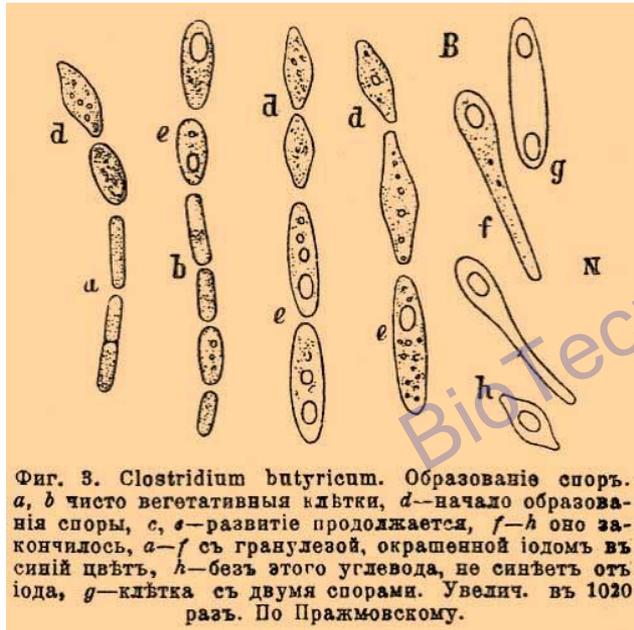


Acido butirrico

33

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione butirrica



Successivamente i piruvati vengono ossidati ad acetil-CoA. Questo processo porta alla liberazione di due molecole di CO₂ e 2 molecole di H₂.

Una serie complessa di reazioni trasforma l'acetil-CoA in acido butirrico e 3 ATP.



Sporogenesi in Clostridium butyricum 34

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione butirrica

La fermentazione butirrica è responsabile del rigonfiamento tardivo di formaggi stagionati come il grana e il parmigiano vista la contemporanea produzione di idrogeno gassoso e anidride carbonica. Non ci si deve stupire di ciò visto che i clostridi sono ubiquitari ed è possibile isolarli nel suolo, nell'acqua e negli scarichi fognari (sono anche ospiti abituali dell'intestino dell'uomo e di diversi animali. Per questo motivo la ricerca di clostridi nei formaggi è abituale.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione butirrica

Per maggiore precisione bisogna ricordare che i clostridi vengono suddivisi in diversi gruppi a seconda della capacità di fermentare substrati diversi.

- Clostridi butirrici, responsabili della fermentazione appena spiegata e azotofissatori; vi appartiene anche la specie patogena *C. perfringens* responsabile della gangrena gassosa e di una tossinfezione alimentare
- Clostridi amminoacidi fermentanti esaminati nella prossima slide.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione degli amminoacidi

Questo tipo di fermentazione viene effettuata da un gruppo di **clostridi proteolitici stretti** come il **C. tetani**, oppure **proteolitici e saccarolitici**.

Gli amminoacidi più spesso utilizzati sono il glutammato, la glicina, l'alanina, la cisteina ...

I prodotti emettono un odore decisamente sgradevole che è il tipico odore della putrefazione.

L'ATP viene prodotto in seguito a fosforilazione a livello del substrato

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione propionica

La fermentazione propionica è piuttosto complessa e vede molto spesso il coinvolgimento di associazioni batteriche in cui un genere sfrutta il lavoro di un'altra.

Si può capire il perché partendo dall'esame della fermentazione che può originarsi da due prodotti diversi: il glucosio e il lattato.



I batteri del genere **Propionibacterium** prendono questo nome per il fatto che compiono questa fermentazione a partire dal glucosio.

Fonti di energia: composti organici

Fermentazione propionica

I propionobatteri vivono spesso in associazione con i lattobacilli che fermentano il glucosio in lattato, fornendo quindi il substrato ideale. I propionobatteri sono responsabili della maturazione del formaggio Emmentaler il cui sapore è determinato dai prodotti della fermentazione. L'anidride carbonica è invece responsabile della occhiatura.

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi



35

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Sicuramente il gruppo dei chemioeterotrofi evidenzia in maniera significativa la grande variabilità metabolica dei microrganismi e dei batteri in particolare.

La respirazione anaerobica ne è l'esempio più eclatante.

La fonte di energia è sempre legata a composti organici (fonte riducente) ma la fonte ossidante non è più l'ossigeno molecolare ma molecole inorganiche come il nitrato (NO_3^-), il solfato (SO_4^{2-}), l'anidride carbonica (CO_2), l'idrogeno (H_2).

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

La produzione di ATP si avvale, come nella respirazione aerobica, di una catena di trasporto di elettroni (chinoni, citocromi, proteine ferro-zolfo), della formazione di una forza proton-motrice e di una ATP sintasi.

La respirazione anaerobica può essere esclusiva (anaerobi obbligati) ma può essere anche una via alternativa quando viene consumato tutto l'ossigeno disponibile per chi è in grado di convertire il suo metabolismo.

Il bilancio della produzione di ATP è inferiore rispetto alla respirazione aerobica (il potenziale di riduzione del nitrato ad esempio è più o meno la metà di quello dell'ossigeno). Risulta però sempre maggiore rispetto alla fermentazione.

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

C'è da puntualizzare subito che la riduzione di nitrato, solfato, CO_2 ... può avere anche un'altra finalità oltre alla formazione di ATP (**riduzione dissimilativa**). Infatti può essere effettuata solo come fonte di azoto, zolfo e carbonio per le esigenze di biosintesi, cioè di formazione di costituenti cellulari (**riduzione assimilativa**). In quest'ultimo caso il processo si ferma quando sono state acquisite le molecole necessarie.

Un'altra grande differenza tra i due tipi di riduzione sono i prodotti. La riduzione dissimilativa porta a molecole completamente diverse che vengono eliminate dai microrganismi.

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei nitrati.

Per capire meglio la respirazione anaerobica è necessario entrare nei dettagli di questa via metabolica a seconda della fonte ossidante.

Cominciamo con la riduzione dei nitrati. Chi ha già studiato i cicli biogeochimici dovrebbe intuire che stiamo per esaminare la

denitrificazione.

Gli ioni nitrato (NO_3^-) vengono ridotti progressivamente a ioni nitrito (NO_2^-), ossido nitrico (NO) e ancora a ossido nitroso (N_2O) e infine a azoto gassoso (N_2).

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei nitrati.

Responsabili di tale riduzione sono alcuni batteri anaerobi facoltativi come Bacillus, Pseudomonas, Thiobacillus, Acinetobacter, Campylobacter che quindi possono anche sfruttare la via della respirazione aerobica che, come già detto, è sicuramente più vantaggiosa.

Nel genere Propionibacterium la respirazione anaerobica è alternativa invece alla fermentazione.

Oltre ai batteri c'è da ricordare anche un foraminifero isolato spesso nei sedimenti marini privi di ossigeno.

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei nitrati.

Di seguito la reazione complessiva della denitrificazione:



Da cui si può dedurre che il nitrato accetta 6 elettroni.

La denitrificazione è una reazione dissimilativa che avviene a tappe ad opera di enzimi diversi. Indubbiamente sottrae azoto dal terreno, cosa che comporta poi la necessità di effettuare concimazioni ma nello stesso tempo contribuisce a diminuire il problema dell'eutrofizzazione.

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei nitrati.

Interessante una recente scoperta sempre a proposito della denitrificazione.

Di seguito la reazione anammox (ANaerobic AMMonium OXidation) di ossidazione degli ioni ammonio grazie ai nitriti come agenti ossidanti.



Ne sono responsabili un gruppo di batteri scoperti nel 1999 e isolati in ambienti marini e impianti di depurazione delle acque reflue su cui si stanno compiendo numerosi studi come testimonia la slide successiva.

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei nitrati.

Reazione anammox

“Anammox” è anche il nome registrato per una tecnologia di rimozione dell'ammonio sviluppata dalla Delft University of Technology (università olandese).

A destra. Un bioreattore contenente il batterio anammox *Kuenenia stuttgartensis*, Radboud University Nijmegen



FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

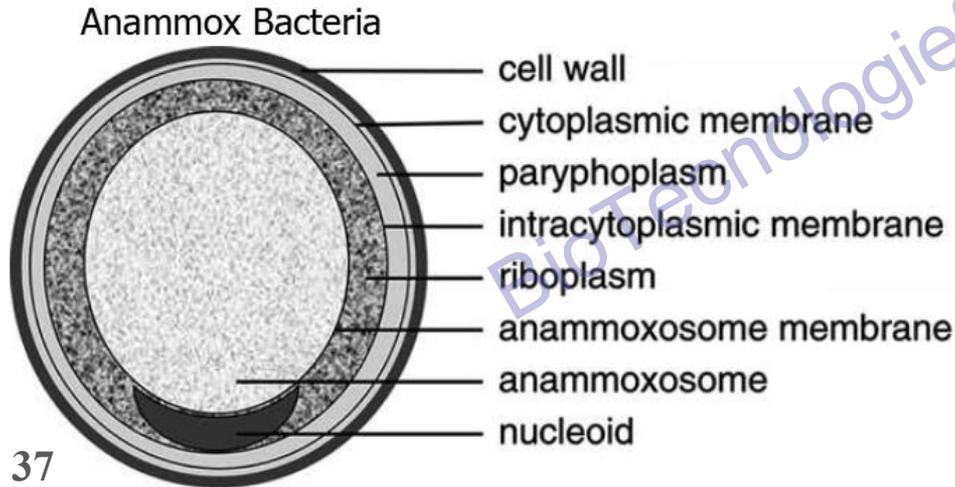
Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei nitrati. *Reazione anammox.*



37

La conversione diretta di ioni ammonio e ioni nitriti in azoto molecolare e acqua avviene nei batteri anammox all'interno di veri e propri organelli citoplasmatici limitati da una membrana estremamente densa e formata da lipidi specifici di questi batteri.

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei nitrati. *Per chi vuole saperne di più.*

La variabilità batterica non si esaurisce con i batteri anammox. Bisogna ricordare anche quelli che associano la riduzione dei nitrati all'ossidazione di composti organici come nel caso della reazione riportata di seguito



È il caso di alcune specie dei generi Bacillus e Pseudomonas che iniziano la produzione di energia con la glicolisi e il ciclo di Krebs per poi utilizzare la catena respiratoria a nitrati.

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei composti ossidati dello zolfo.

L'utilizzo del solfato può essere diverso a seconda delle esigenze dei microrganismi.

Alghe, funghi e molti procarioti sono in grado di assimilarlo come fonte nutritiva per sintetizzare biomolecole e questo fa parte del metabolismo assimilativo.

Esiste però un gruppo ristretto di batteri, anaerobi obbligati, che utilizzano il solfato o altri composti ossidati dello zolfo come accettori finali in una catena di trasporto degli elettroni (metabolismo dissimilativo).

FONTE DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

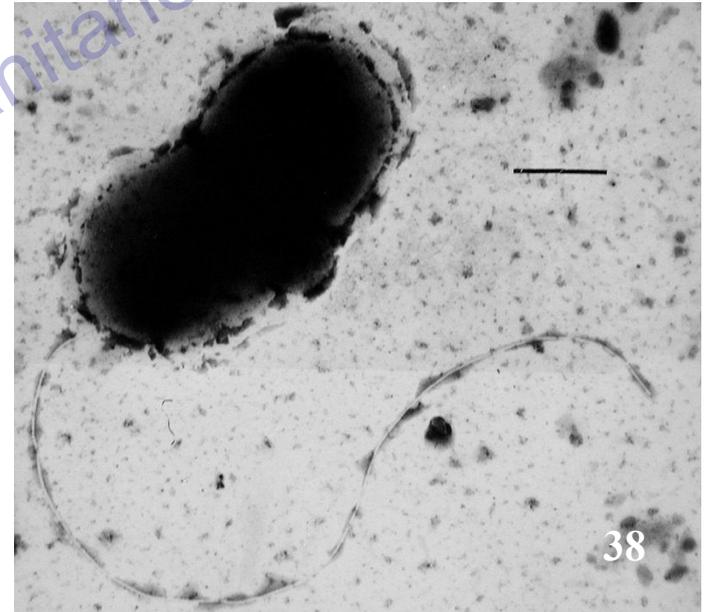
Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei composti ossidati dello zolfo.

Sono batteri chiamati solforiduttori a cui appartengono specie dei seguenti generi: Desulfovibrio, Desulfobacter, Desulfomonas.

Di lato Desulfovibrio vulgaris.



Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei composti ossidati dello zolfo.

Sono presenti in numerosi ambienti anaerobi ricchi di solfati. Li ospitano acquitrini, sedimenti marini ma anche rumine e intestino di alcuni animali. Vivono spesso in comunità con batteri fermentanti che producono acido lattico, acido butirrico, acido propionico, etanolo e idrogeno gassoso. I solfobatteri utilizzano questi composti come fonte nutritiva per poi liberare nell'ambiente solfuri.



FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemioautotrofi o chemiolitotrofi

Chemioeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei composti ossidati dello zolfo.



La reazione è la somma di tante reazioni mediate che consentono una riduzione graduale del numero di ossidazione dello zolfo da +6 del solfato a -2 del solfuro.

I solforiduttori esercitano un ruolo fondamentale negli ambienti anaerobi perché grazie al loro metabolismo garantiscono la sopravvivenza dei solfobatteri rossi e verdi e di alcuni chemioautotrofi.

FONTI DI ENERGIA

Fotoautotrofi o fototrofi

Chemoautotrofi o chemiolitotrofi

Chemoeterotrofi o chemiorganotrofi

Fonti di energia: composti organici

Respirazione anaerobica

Riduzione dei composti ossidati dello zolfo. *Per chi vuole saperne di più*

I solfobatteri sono la principale causa della corrosione microbiologica proprio grazie al loro metabolismo. La **corrosione microbiologica** o **MIC** (Microbiological Induced Corrosion) o **biocorrosione** è la corrosione di metalli interrati o sommersi dovuta all'azione di diversi microrganismi (capaci di formare veri e propri film) che grazie alla respirazione anaerobica riescono a cambiare il numero di ossidazione ad elementi quali il ferro, il manganese o lo zolfo. Oltre ai batteri bisogna ricordare anche le alghe, i funghi e le diatomee.

Author credits

1. Anabolismo e catabolismo - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Catabolism,_energy_carriers_and_anabolism.png
2. Cianobatteri (Nostoc) - Di L'utente che ha caricato in origine il file è stato Gibon di Wikipedia in ceco - Trasferito da cs.wikipedia su Commons da Vojtech.dostal., Copyrighted free use, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5105178>
3. Colonie sferiche di Nostoc - Di Christian Fischer, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=434776>
4. Struttura interna di un cianobatterio - By Kelvinsong - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24126121>
5. Coltura di spirulina - foto scattata nel laboratorio di microbiologia dell'ITI Omar
6. Spirulina al MO - foto scattata nel laboratorio di microbiologia dell'ITI Omar
7. Stromatoliti - https://eu.m.wikipedia.org/wiki/Fitxategi:Lake_Thetis-Stromatolites-LaRuth.jpg
8. Anabaena - By Environmental Protection Agency - http://www.epa.gov/glnpo/image/viz_nat6.html, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2776675>
9. Confronto tra fotosintesi ossigenica e anossigenica - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OSC_Microbio_08_06_PhotoEquat.jpg
10. Chlorobium - Di Salah-ad-din - Opera propria, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24646794>
11. Chromatium - Di Mariiantonietta - Opera propria, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35945579>

Author credits

12. Schema fotosintesi batteri verdi sulfurei - Realizzato da Studio Associato R&D sulla base di diagrammi diversi
13. Rhodospirillum - By Maulucioni - Own work/Based on File:Botony Exam 1 004.JPG, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32290740>
14. Rhodopseudomonas palustris - By Source (WP:NFCC#4), Fair use, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=42926452>
15. Nitrosomonas eutropha - By Asw-hamburg - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40875507>
16. Nitrobacter winogradskyi - Di Professor William Hickey - <https://www.flickr.com/photos/153251285@N05/33585754286/in/shares-vW80iS/>, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57365919>
17. Ciclo di Krebs - Di L'utente che ha caricato in origine il file è stato .jhc. di Wikipedia in italiano - Trasferito da it.wikipedia su Commons da Calipper utilizzando CommonsHelper., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10024220>
18. Ciclo di Krebs semplificato e reazione anaplerotica - di proprietà dello Studio associato R&D
19. "Stefano Lubiana Pinot Noir ferment vintage 2010" by Mark Smith - originally posted to Flickr as Stefano Lubiana Pinot Noir ferment vintage 2010. Licensed under CC BY 2.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stefano_Lubiana_Pinot_Noir_ferment_vintage_2010.jpg#/media/File:Stefano_Lubiana_Pinot_Noir_ferment_vintage_2010.jpg
20. Auto alimentata a bioetanolo - By Luftfahrrad - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4513003>

Author credits

21. Fermentazione alcolica - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ethanol_fermentation_it.svg
22. Lattobacilli - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lattobacilli.jpg>
23. Lactobacillus acidophilus - Di Doc. RNDr. Josef Reischig, CSc. - Author's archive, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31554845>
24. Fermentazione omolattica - By Sjantoni - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17293840>
25. Acido lattico - Di Paginazero - mio disegno, Pubblico dominio, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=48206104>
26. Lattato deidrogenasi - By Deposition authors: Read, J.A., Winter, V.J., Eszes, C.M., Sessions, R.B., Brady, R.L.; visualization author: User:Astrojan - <http://www.rcsb.org/pdb/explore/explore.do?structureId=1i10>, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=48834556>
27. Yogurt - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turkish_strained_yogurt.jpg
28. Ciclo del Cori - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CoriCycle-es.svg>
29. Kefir - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beneficio-do-kefir.jpg>
30. Bifidobacterium longum - Di Julie6301 - Opera propria, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15311964>
31. Escherichia coli - Di Credit: Rocky Mountain Laboratories, NIAID, NIH - NIAID: These high-resolution (300 dpi) images may be downloaded directly from this site. All the images, except specified ones from the World Health Organization (WHO), are in the public domain. For the public domain images, there is no copyright, no permission required, and no charge for their use., Pubblico dominio, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=104228>

Author credits

32. Variazioni di colore del rosso metile - By LHcheM - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18649055>
33. Acido butirrico - By Cacycle - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4734514>
34. Sporogenesi di Clostridium butyricum - Di painter from Brockhaus and Efron Encyclopedic Dictionary - reproduction from DVD <http://www.iddk.ru/ru/cdrom/73147.html>, Pubblico dominio, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7236906>
35. Emmentaler - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Emmentaler_Premier_Cru.jpg
36. Bioreattore con coltura di Kuenenia - By Kinestetika, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17268207>
37. Anammoxosoma - Di LoPorto - Opera propria, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=69655654>
38. Desulfovibrio vulgaris - Di Nessun autore leggibile automaticamente. Graham Bradley presunto (secondo quanto affermano i diritti d'autore). - Nessuna fonte leggibile automaticamente. Presunta opera propria (secondo quanto affermano i diritti d'autore)., Pubblico dominio, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=221792>

BioTechnology