

**ZANICHELLI**

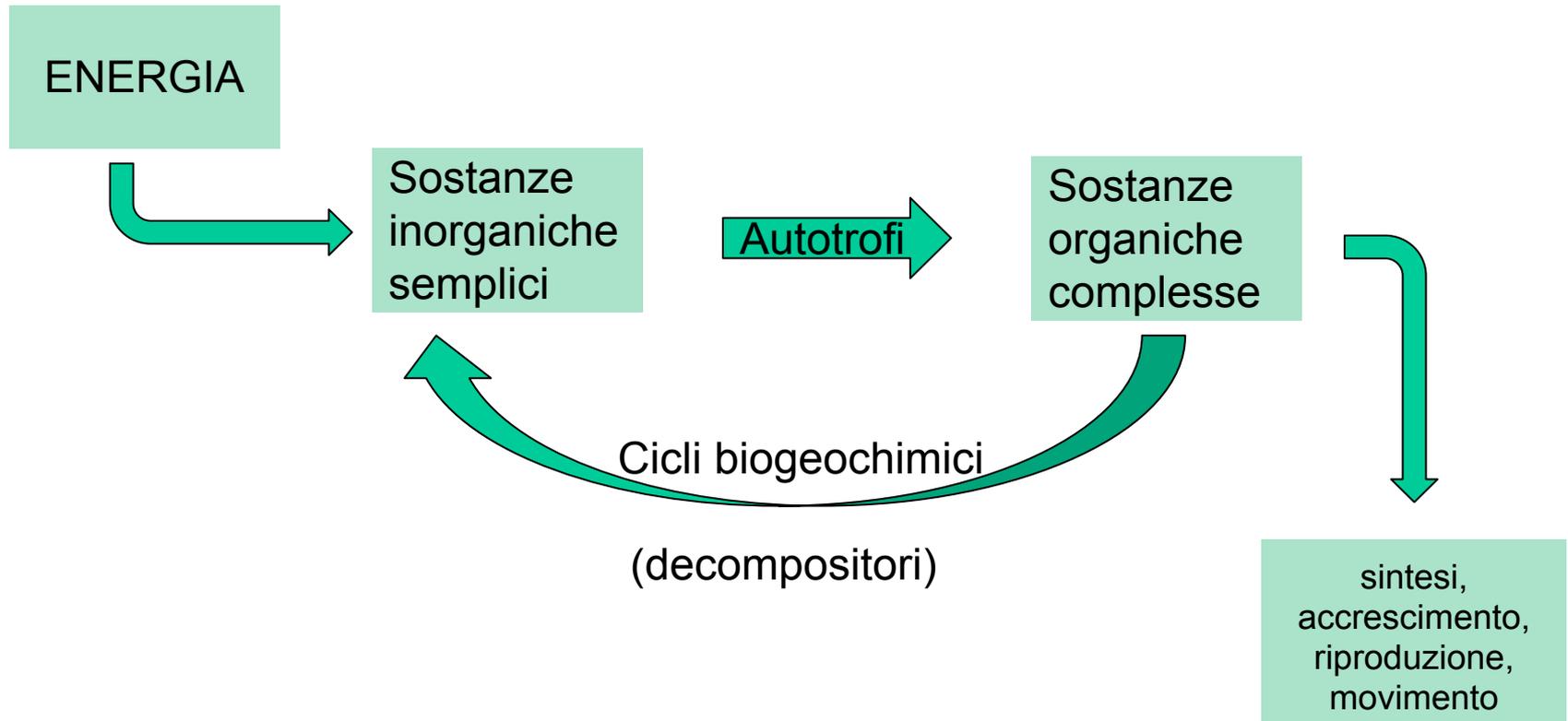
Fabio Fanti

**Biologia,  
microbiologia  
e tecniche di  
controllo sanitario**

## Capitolo 3

# Il metabolismo microbico

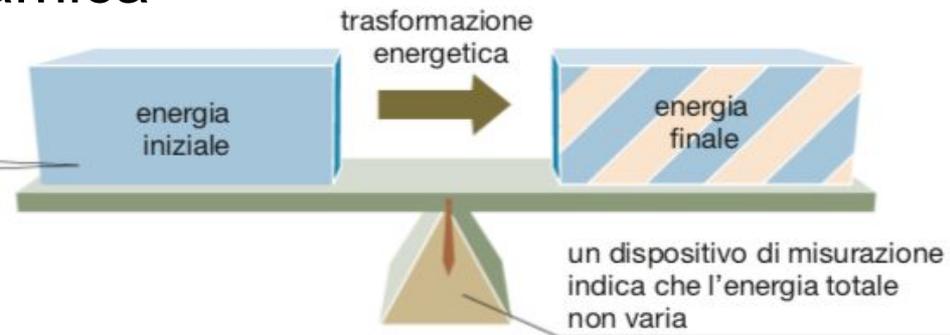
# 1. Gli scambi di energia e materia fra organismi e ambiente



## 2. La termodinamica e le trasformazioni energetiche

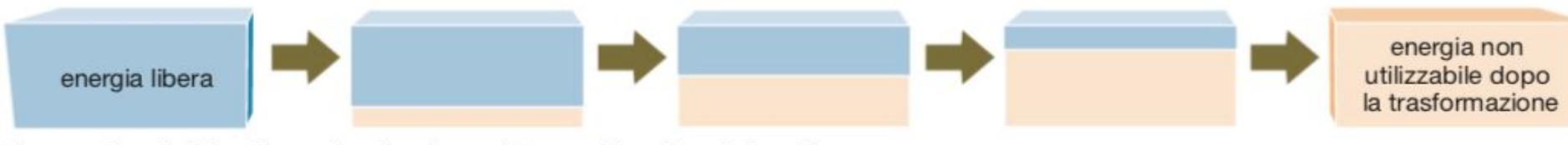
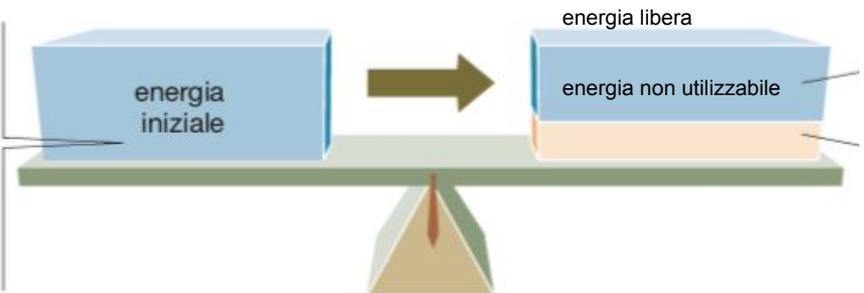
### Primo principio della termodinamica

L'energia non può essere creata, nè distrutta, ma solo trasformata



### Secondo principio della termodinamica

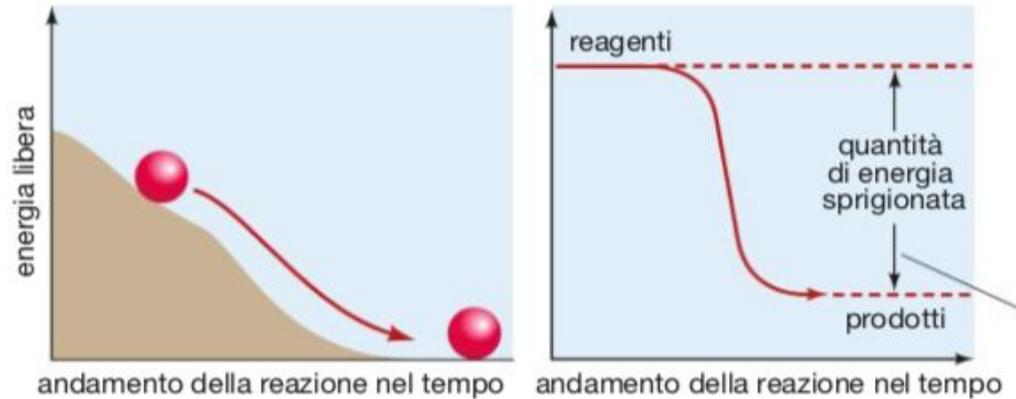
Nelle trasformazioni spontanee il disordine del sistema (*entropia*) aumenta



# 2. La termodinamica e le trasformazioni energetiche

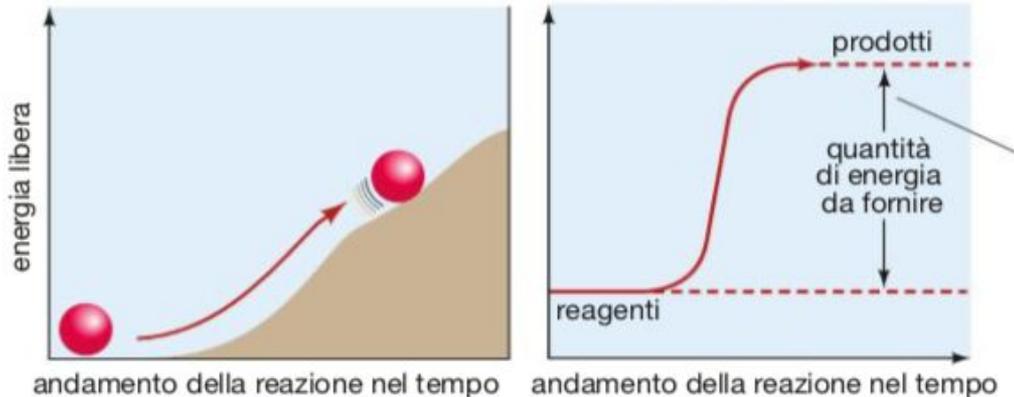
## Reazioni ESOERGONICHE

L'energia dei prodotti è inferiore a quella dei reagenti



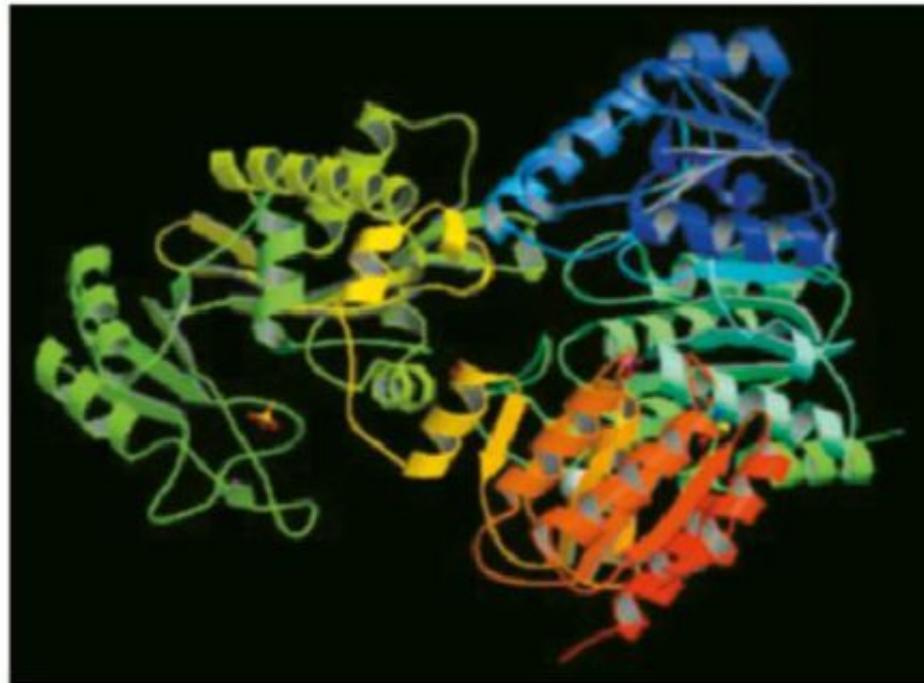
## Reazioni ENDOERGONICHE

L'energia dei prodotti è superiore a quella dei reagenti



### 3. Gli enzimi: catalizzatori biologici

Gli enzimi sono **proteine** globulari formate da una o più catene.



Struttura tridimensionale di un enzima di Escherichia coli.

Permettono di trasformare un **substrato** in un **prodotto** attraverso la formazione di un **complesso enzima-substrato (ES)**.

## 4. Caratteristiche e proprietà degli enzimi

- Restano inalterati dopo la reazione
- Sono efficaci a piccole concentrazioni
- Aumentano la velocità della reazione
- Sono substrato-specifici (modello chiave-serratura o adattamento indotto)
- Hanno un sito attivo in cui si inserisce il substrato e dove avviene la catalisi
- Possono avere bisogno di **cofattori (attivatori o coenzimi)**

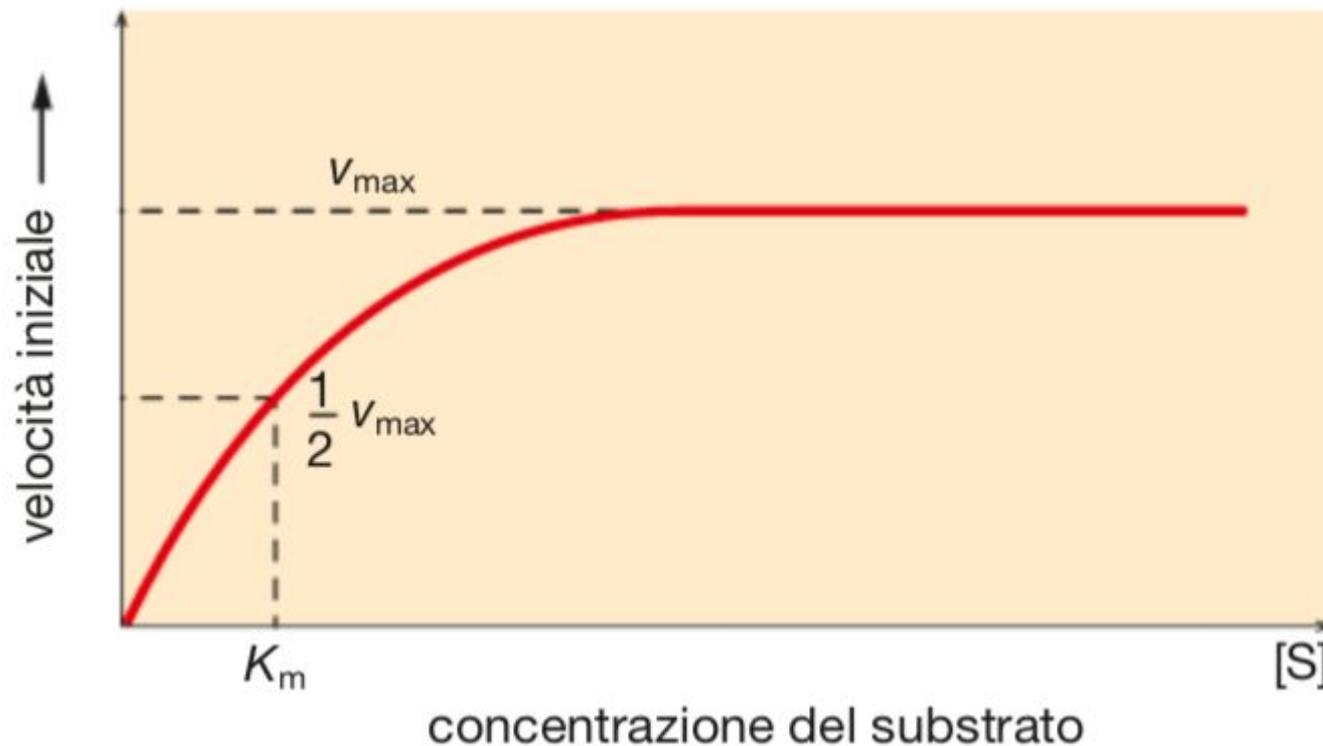


# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Concentrazione del substrato
- Concentrazione dell'enzima
- Presenza di cofattori
- Effetto della temperatura
- Effetto del pH
- Effetto di inibitori

# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Concentrazione del substrato

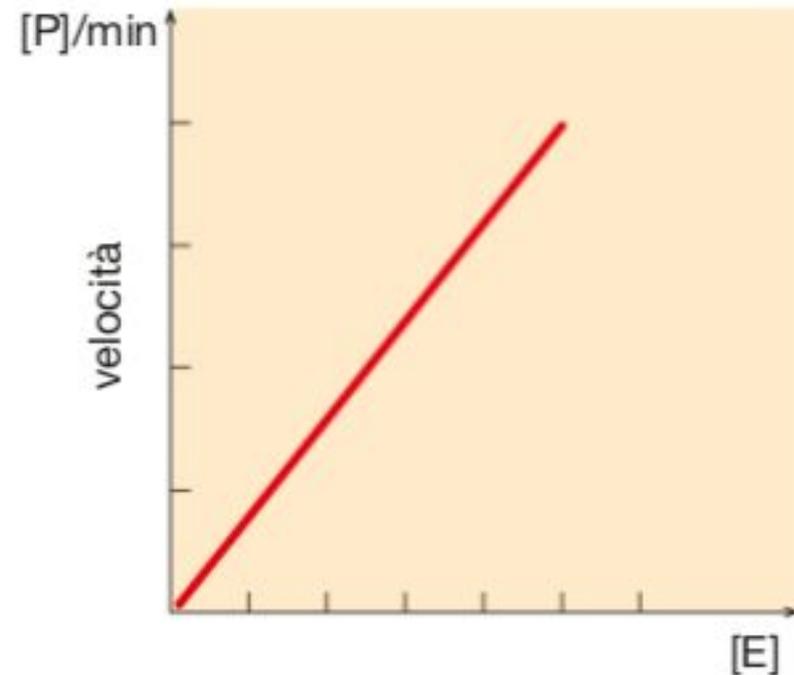
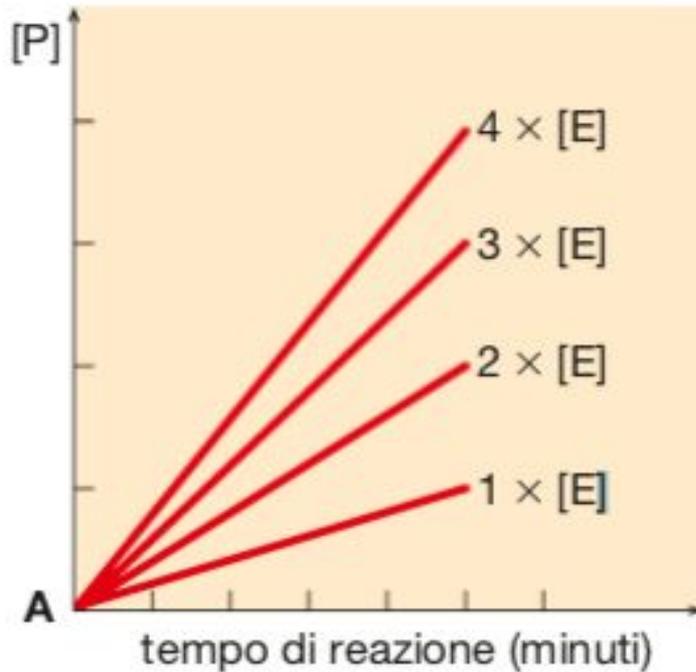


$K_m = [S]$  quando  $v = \frac{1}{2} v_{max}$

esprime l'affinità dell'enzima verso il substrato

# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Concentrazione dell'enzima

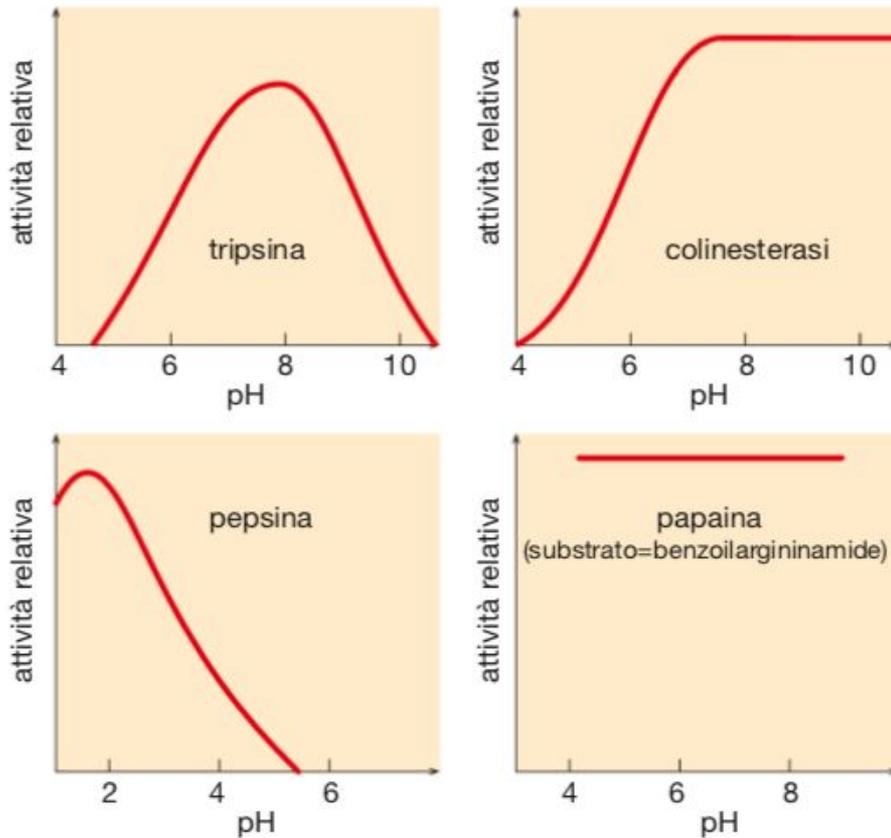


# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Presenza di cofattori
  - gli **attivatori** possono far parte del sito attivo o fungere da ponte tra enzima e substrato.
  - i **coenzimi** fungono generalmente da trasportatori di atomi o gruppi chimici.
- Effetto della temperatura
  - la temperatura è direttamente proporzionale alla velocità di reazione,
  - $T > 60^{\circ}\text{C}$  provocano la denaturazione delle proteine

# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Effetto del pH



| Enzima              | pH ottimale | Range efficienza |
|---------------------|-------------|------------------|
| Amilasi salivare    | 6,7         | 6,6 ÷ 6,8        |
| Amilasi pancreatica | 7,1         | 7,0 ÷ 7,2        |
| Pepsina             | 1,5         | 1,0 ÷ 2,0        |
| Tripsina            | 7,9         | 7,8 ÷ 8,0        |
| Chimotripsina       | 8,0         | 7,8 ÷ 8,1        |
| Lipasi              | 8,0         | 7,8 ÷ 8,1        |
| Saccarasi           | 6,0         | 5,0 ÷ 7,0        |
| Maltasi             | 6,0         | 5,8 ÷ 6,2        |
| Lattasi             | 5,8         | 5,4 ÷ 6,0        |
| Fosfatasi           | 8,6         | 8,2 ÷ 8,8        |
| Colinesterasi       |             |                  |
| Papaina             |             |                  |

## 6. La regolazione dell'attività enzimatica

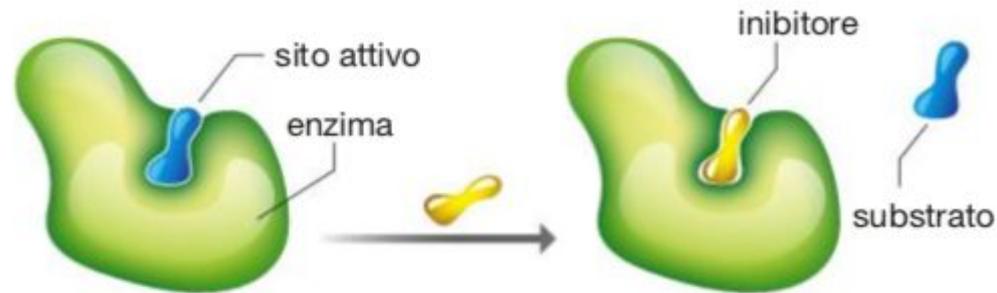
Gli enzimi **inducibili** sono prodotti solo quando e se necessario, gli enzimi **costitutivi** sono prodotti sempre.

Alcune sostanze sono in grado di inibire l'azione degli enzimi.

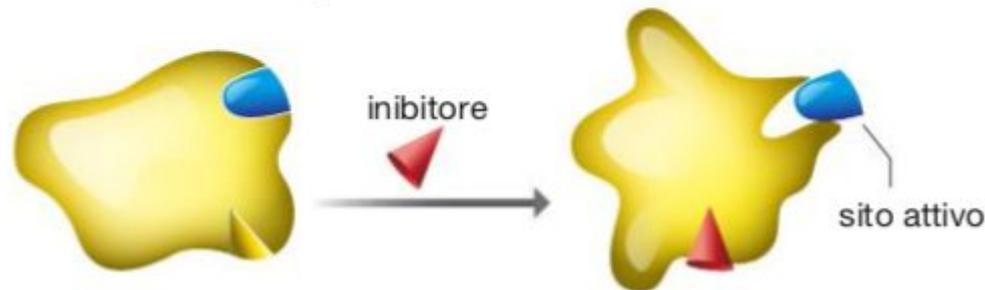
- In relazione alla stabilità di legame, si distinguono inibizioni di tipo:
  - **irreversibile**: l'inibitore si lega permanentemente al sito attivo (Es. gas nervini)
  - **reversibile**: l'inibitore non si lega in modo definitivo, e non necessariamente in corrispondenza del sito attivo.

## 6. La regolazione dell'attività enzimatica

- A livello del sito di legame, si distinguono inibizioni di tipo:
  - **competitiva**, in cui la struttura del substrato è simile a quella dell'inibitore, che lo sostituisce nel sito attivo.

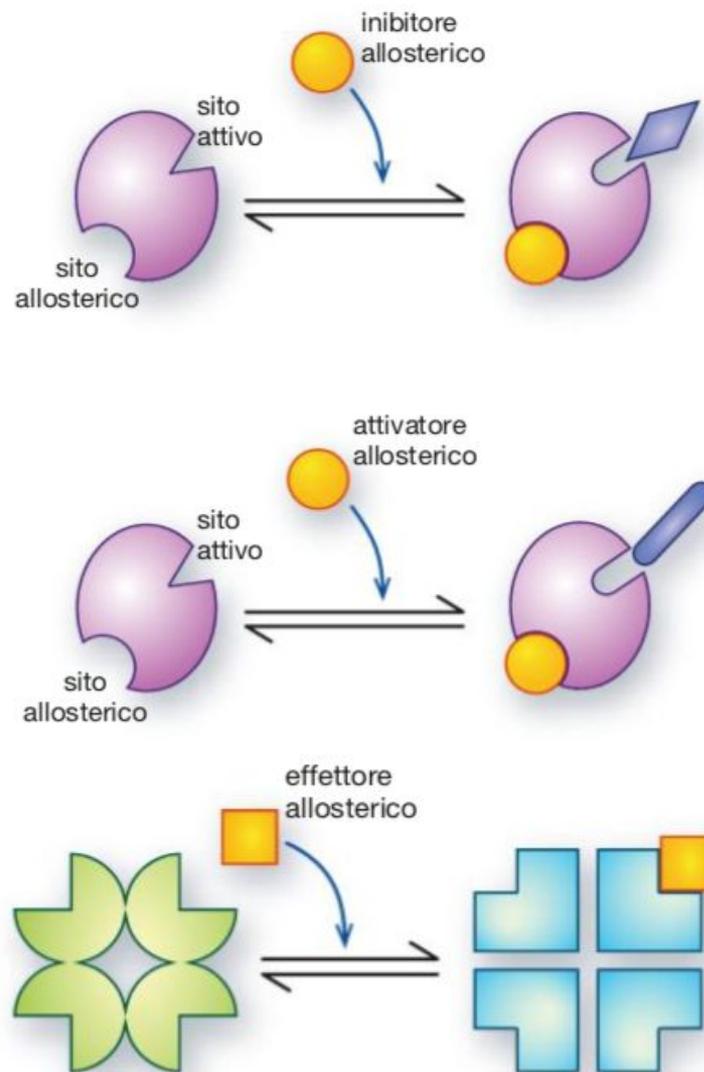
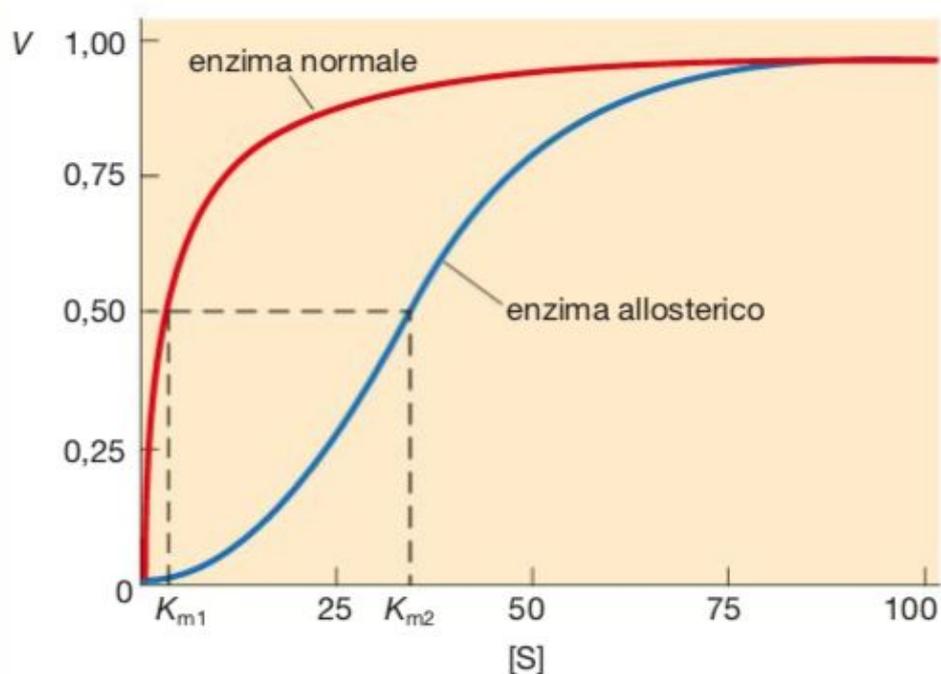


- **non competitiva**, in cui il sito cui si lega l'inibitore non coincide necessariamente con il sito attivo.



# 6. La regolazione dell'attività enzimatica

**Enzimi allosterici:** enzimi con un sito allosterico la cui attivazione può dare il via a una riorganizzazione sterica degli altri siti, attivandola o inibendola.



# 6. La regolazione dell'attività enzimatica

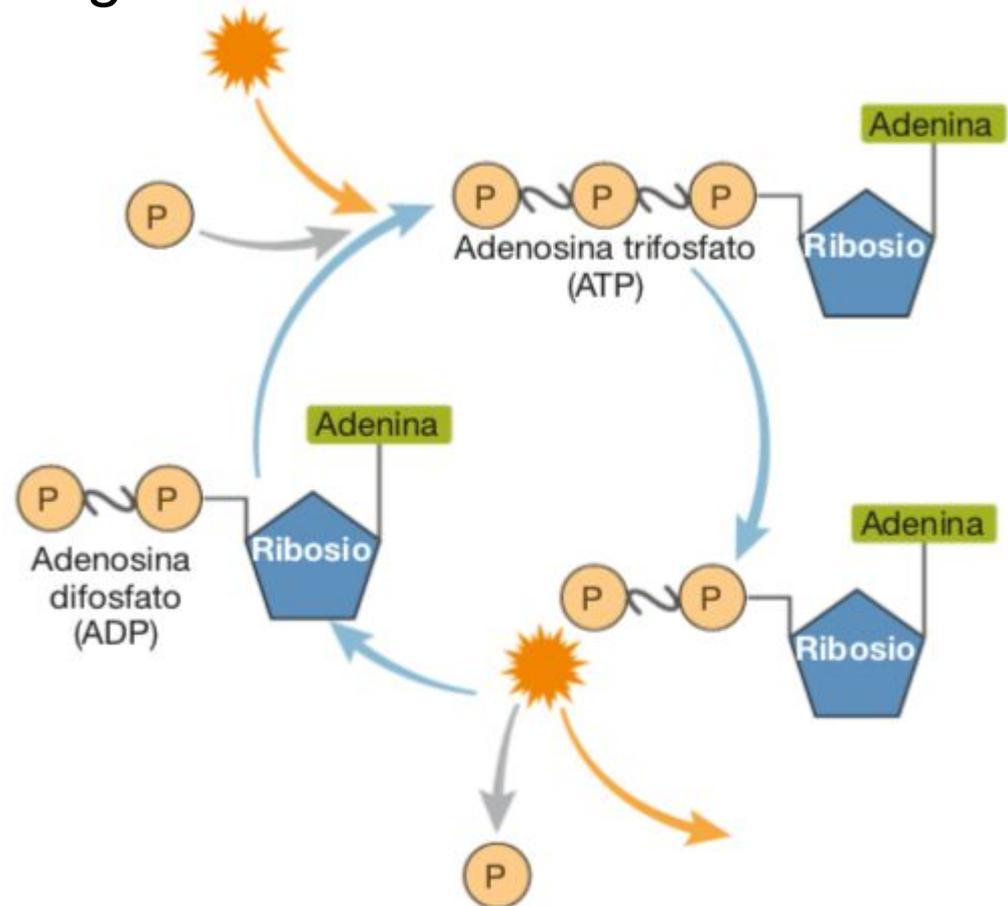
## Classificazione degli enzimi

1. **Ossidoreduttasi:** ossidoriduzioni
2. **Transferasi:** trasferimento di gruppi chimici funzionali
3. **Idrolasi:** reazioni di idrolisi
4. **Liasi:** rimozione di gruppi chimici (senza idrolisi)
5. **Isomerasi:** trasformazione in un isomero
6. **Ligasi:** unione di due molecole con consumo di ATP

# 7. Metabolismo, ATP ed energia per la cellula

**Metabolismo:** insieme di reazioni che consentono di immagazzinare o liberare energia

- **Catabolismo:**  
degradazione di  
composti organici  
(ESOERGONICHE)
- **Anabolismo:**  
costruzione di  
composti organici  
(ENDOERGONICHE)



# 7. Metabolismo, ATP ed energia per la cellula

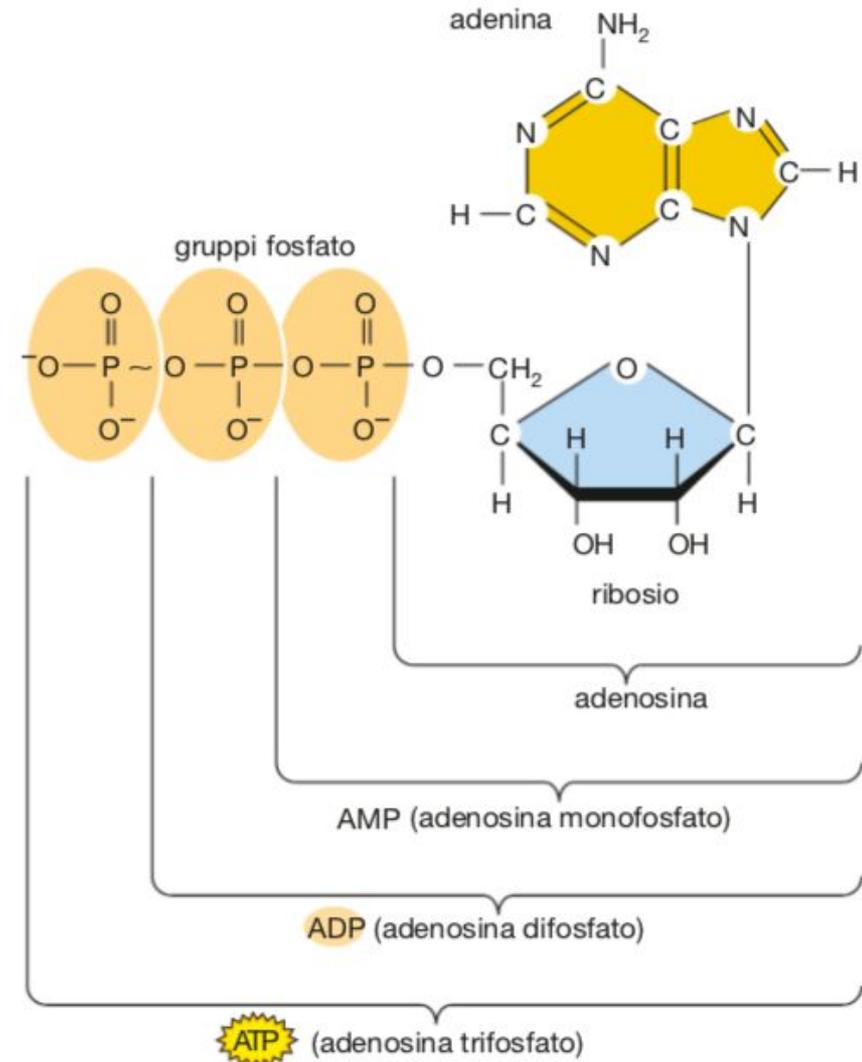
## ATP (adenosina trifosfato)

- la sua idrolisi rende disponibile molta energia
- può trasferire un gruppo fosfato ad altre molecole (**fosforilazione**)

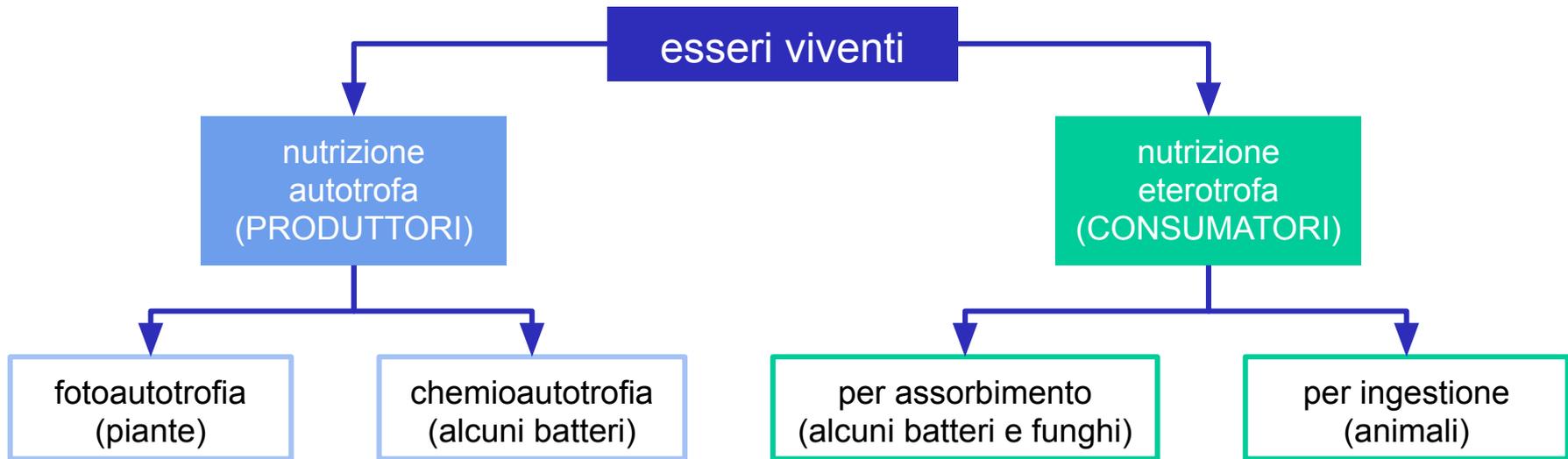


altre molecole energetiche:

- **GTP**: sintesi proteica e di RNA
- **UTP**: sintesi di RNA e metabolismo del galattosio
- **PK** (fosfocreatina): riserva di gruppi fosfato per rigenerare ATP



# 8. Le strategie nutritive dei viventi, autotrofi ed eterotrofi



Classi nutrizionali o metaboliche dei microrganismi

| Tipo nutrizionale           | Energia                        | Fonte di Idrogeno/Elettroni | Carbonio                                    | Microrganismi rappresentativi  |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---|--|
| Fotolitotrofi autotrofi     | Luce                           | Sostanze inorganiche        | CO <sub>2</sub>                             | Alghe, cianobatteri, solfobatteri rossi e verdi                              |
| Fotoorganotrofi eterotrofi  | Luce                           | Sostanze organiche          | Sostanze organiche [anche CO <sub>2</sub> ] | Batteri rossi e verdi (non solfo)  |
| Chemiolitotrofi autotrofi   | Chimica (sostanze inorganiche) | Sostanze inorganiche        | CO <sub>2</sub>                             | Batteri solfo-ossidanti, idrogenobatteri, batteri nitrificanti, ferrobatteri |
| Chemoorganotrofi eterotrofi | Chimica (sostanze organiche)   | Sostanze organiche          | Sostanze organiche                          | La maggior parte dei batteri non fotosintetici, protozoi, funghi             |

# 9. Vie anaboliche: la fototrofia

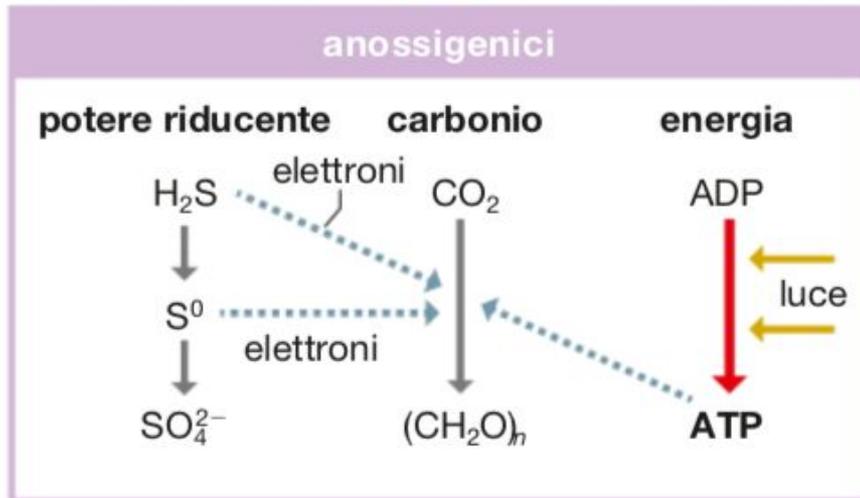
**Fototrofia** luce solare per produrre ATP e fissare CO<sub>2</sub>.

## Strutture coinvolte

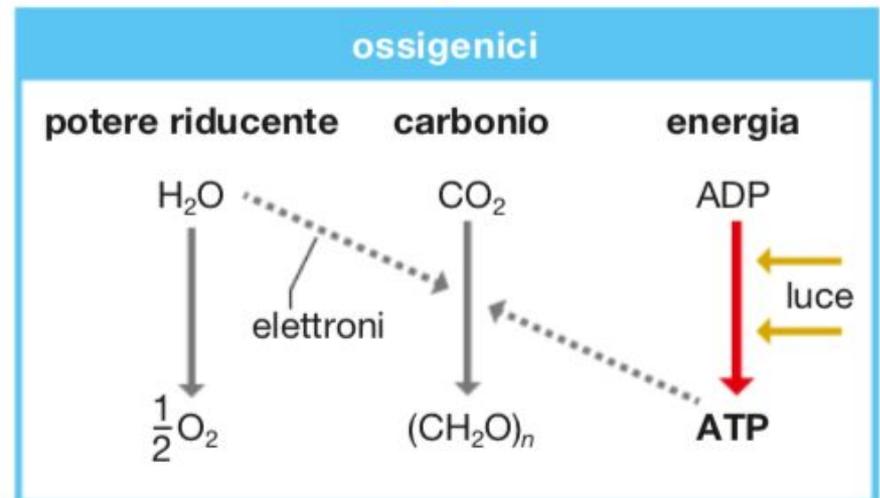
- pigmenti antenna
- centri di reazione
- catena di trasporto di elettroni

Fotosistemi

batteri purpurei rossi e verdi



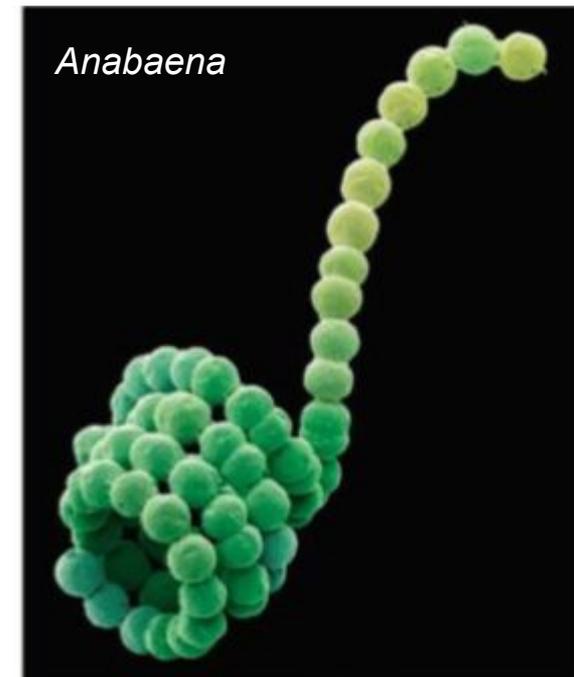
cianobatteri, alghe e piante verdi



## 9. Vie anaboliche: la fototrofia

### Batteri fotosintetici ossigenenici (cianobatteri)

- Primi organismi fototrofi produttori di ossigeno
- Gram negativi, a volte filamentosi
- Strutture fotosintetiche: **tilacoidi**
- Pigmenti: clorofilla a, carotenoidi, ficobiline.
- Molte specie possono fissare l'azoto
- *Generi: Oscillatoria, Spirulina, Nostoc, Anabaena, Microcystis*



## 9. Vie anaboliche: la fototrofia

### Batteri fotosintetici ossigenici (cianobatteri)

- Riproduzione per scissione binaria o frammentazione
- Costituiscono i principali componenti del **fitoplancton**
- Possono causare il fenomeno dell' **eutrofizzazione** (*Anabaena*)
- Sono responsabili della comparsa di odori e sapori sgradevoli in acque per il consumo umano
- Alcune specie sono tossinogene
- In associazione con funghi (*ascomiceti*) formano i **licheni**

# 9. Vie anaboliche: la fototrofia

## Batteri fotosintetici anossigenici

|                 | Batteri rossi  | Batteri verdi  |
|-----------------|--|--|
| <b>Sulfurei</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Anaerobi obbligati, Fotolitotrofi anossigenici</li><li>- donatore di elettroni: <math>H_2S</math> o <math>S</math></li><li>- Habitat: sorgenti sulfuree</li><li>- <i>Thiospirillum</i>, <i>Thiocapsa</i>, <i>Chromatium</i></li></ul>  <p><i>Chromatium</i></p> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Fototrofi, Azotofissatori</li><li>- donatore di elettroni: <math>H_2S</math> o <math>S</math> o <math>H_2</math></li><li>- Pigmenti: batterioclorofille</li><li>- Habitat: acque di lago e stagno in presenza di solfuri</li><li>- <i>Chlorobium</i></li></ul>  <p><i>Chlorobium</i></p> |

# 9. Vie anaboliche: la fototrofia

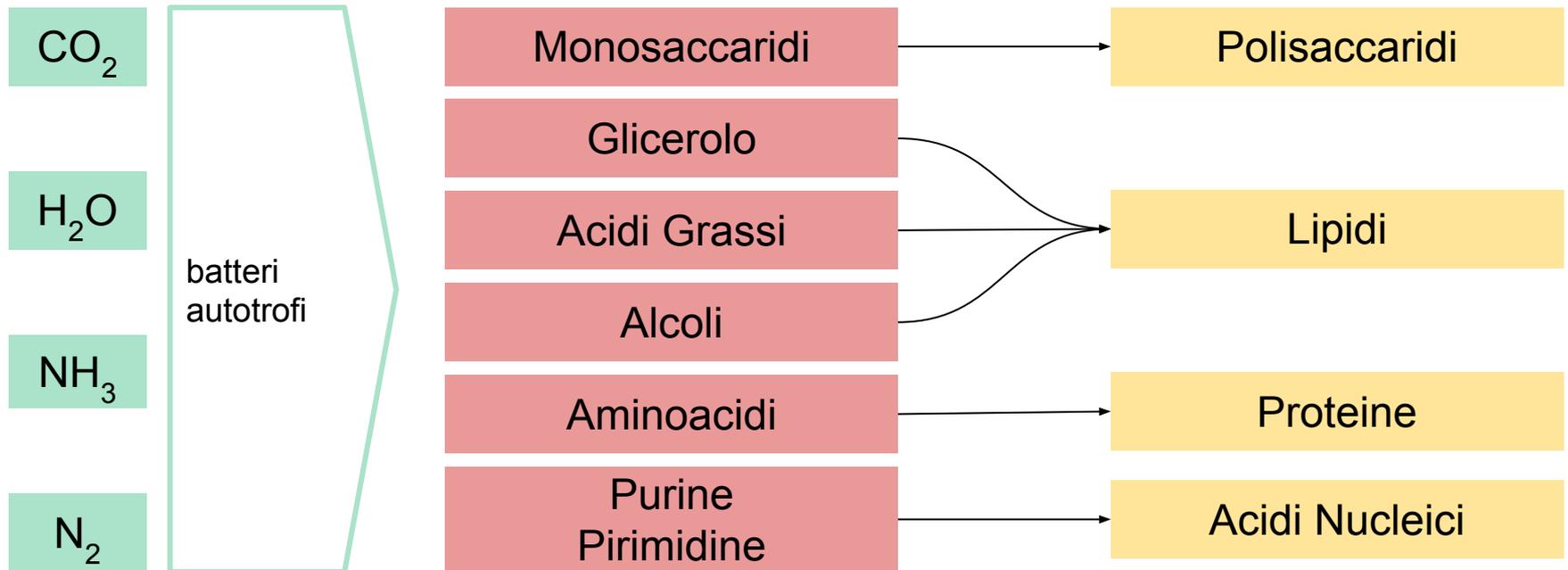
## Batteri fotosintetici anossigenici

|                     | Batteri rossi  | Batteri verdi  |
|---------------------|--|--|
| <b>Non sulfurei</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Anaerobi, Fotoeterotrofi (aerobi chemioeterotrofi in assenza di luce)</li><li>- donatore di elettroni: <math>H_2S</math>, <math>H_2</math>, Fe</li><li>- Habitat: limo, sedimenti, acque dolci</li><li>- <i>Rhodospirillum</i>, <i>Rhodobacter</i>, <i>Rhodoferax</i>.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Fototrofi</li><li>- donatore di elettroni: <math>H_2S</math>, <math>H_2</math></li><li>- Forme filamentose e striscianti, termofile</li><li>- Habitat: sorgenti di acqua calda a reazione neutra o alcalina.</li><li>- <i>Chloroflexus</i>, <i>Heliotrix</i>, <i>Thermomicrobium</i></li></ul> |

### Eliobatteri

- Fototrofi anossigenici, anaerobi obbligati, azotofissatori (chemioeterotrofi in assenza di luce)
- Producono endospore
- Habitat: suolo, risaie, ambienti alcalini
- *Heliobacterium*, *Heliophilum*

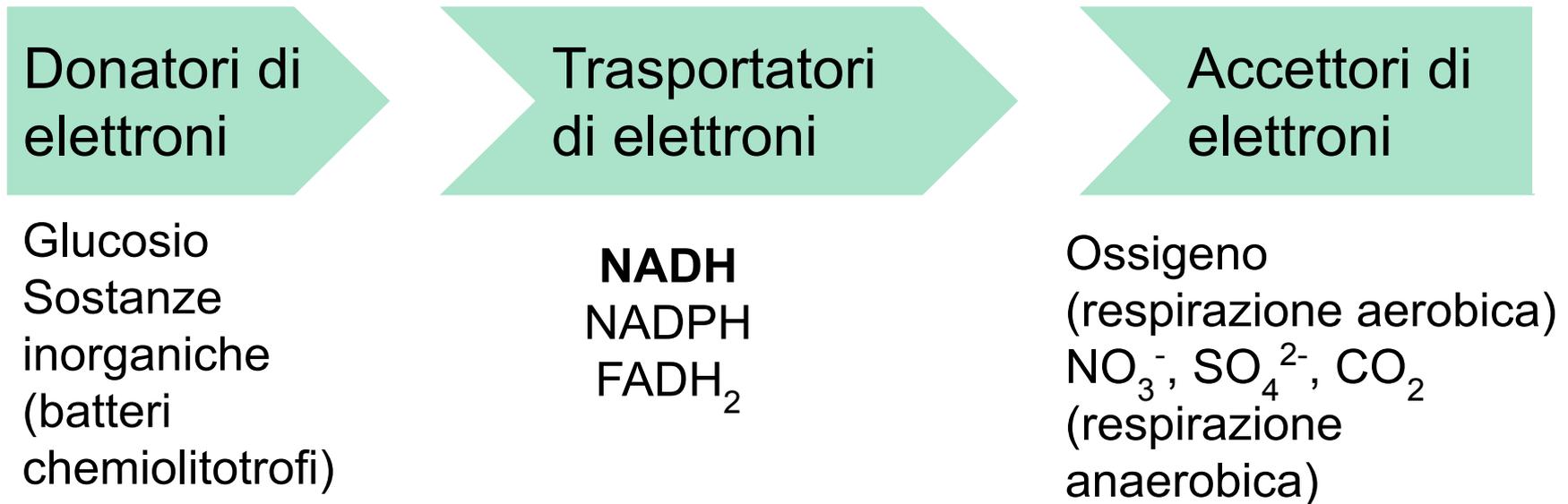
# 10. Vie anaboliche: le biosintesi microbiche



# 11. Le ossidazioni biologiche: fonte di energia

Modalità con cui avvengono le reazioni di ossidazione:

- perdita di elettroni
- addizione di ossigeno
- **rimozione di idrogeno** (forma più utilizzata dalle cellule)



## 12. Vie cataboliche: la glicolisi

Il catabolismo del glucosio è un processo comune a tutti i viventi, e la glicolisi è la via principale.

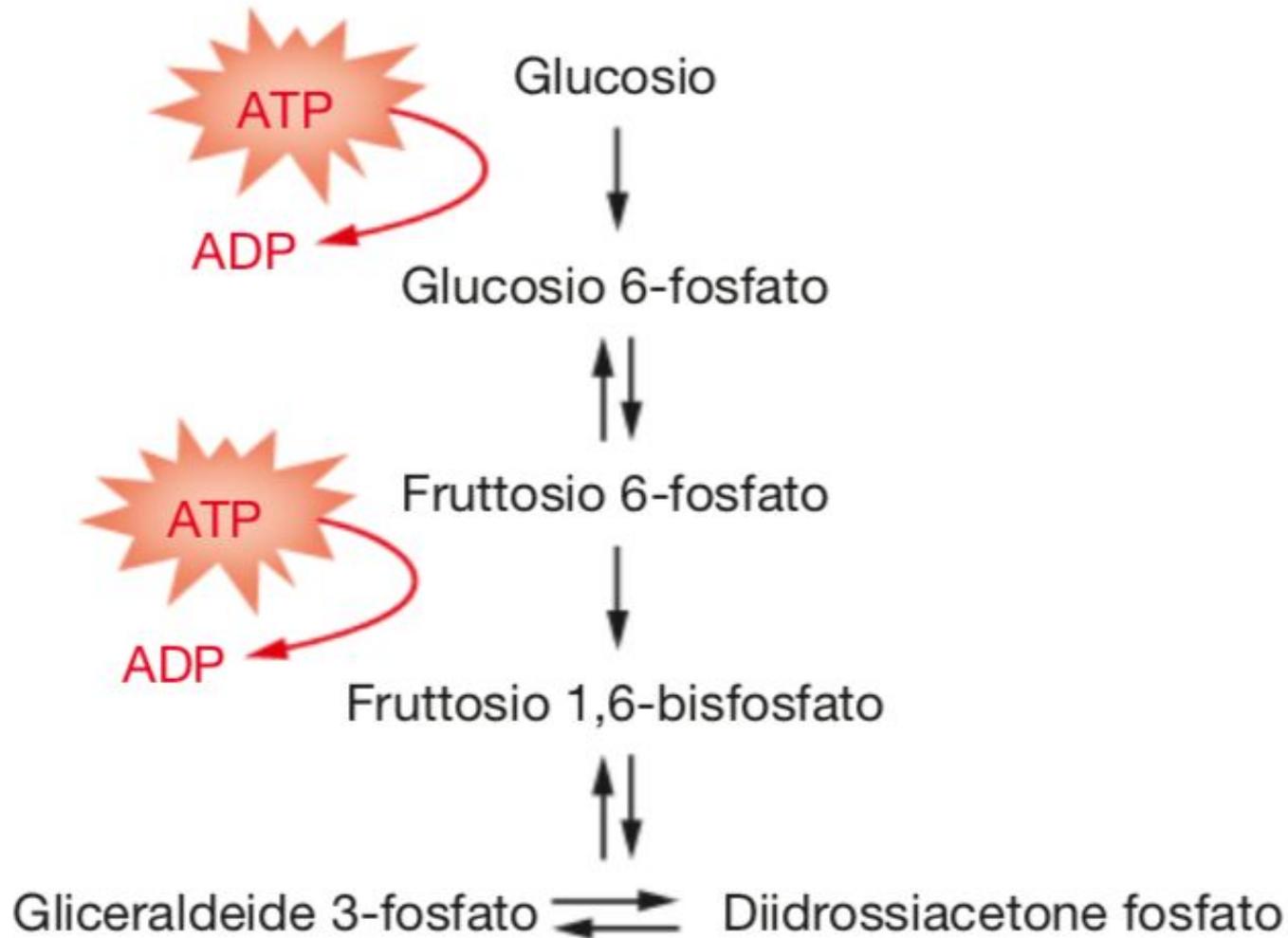
- Ha luogo nel citoplasma
- Degrada una molecola di glucosio ( $C_6H_{12}O_6$ ) in due molecole di acido piruvico ( $C_3H_4O_3$ )
- L'acido piruvico può seguire due destini alternativi:
  - ossidazione (respirazione aerobica)
  - riduzione (fermentazione in anaerobiosi)

## 12. Vie cataboliche: la glicolisi

- Oltre all'acido piruvico vengono prodotte:
  - due molecole di ATP
  - due molecole di NADH
- La glicolisi è costituita da 10 reazioni, suddivise in due fasi, una di preparazione e una di recupero energetico

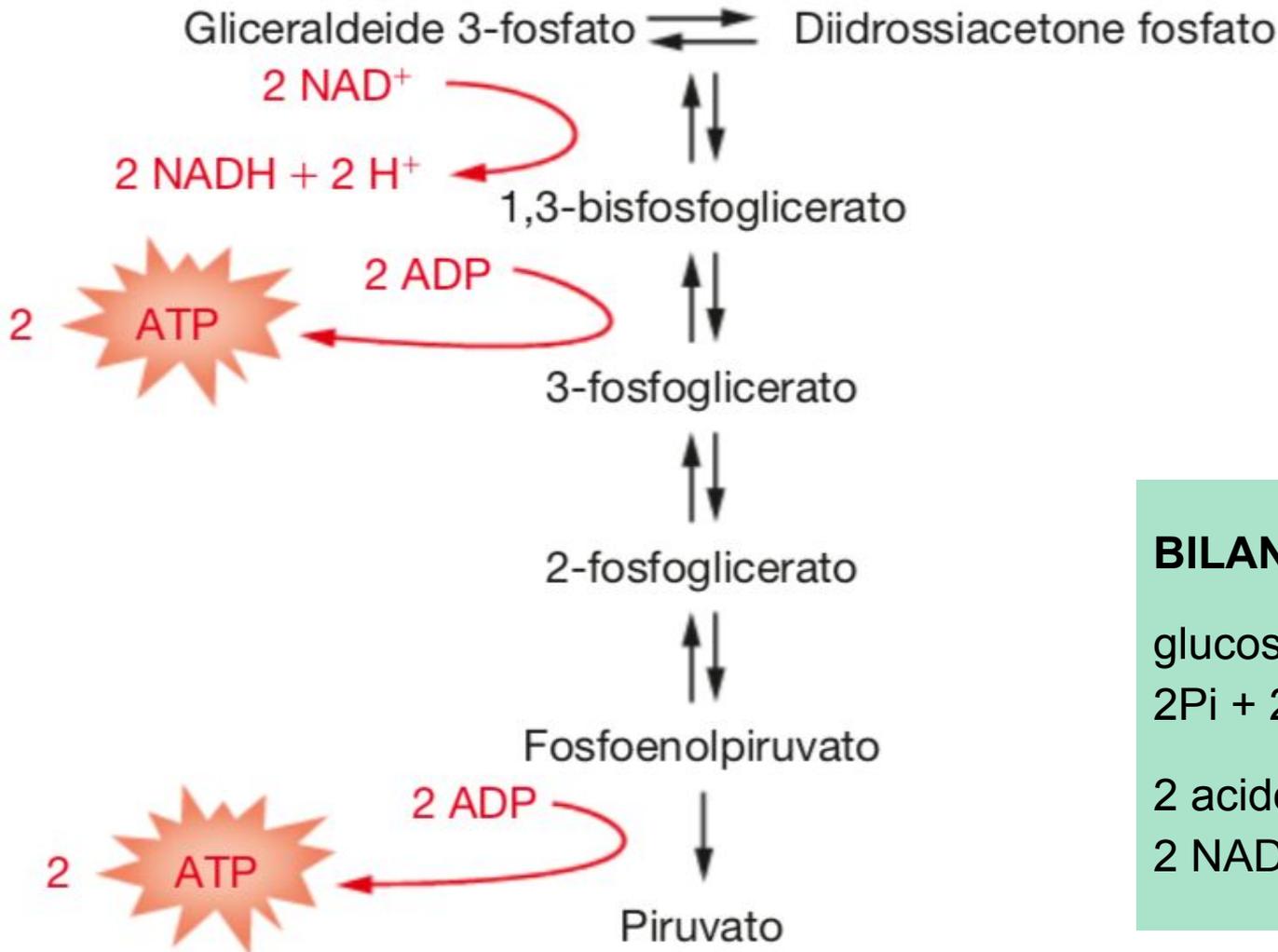
# 12. Vie cataboliche: la glicolisi

## Fase preparatoria

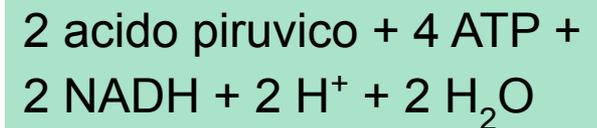
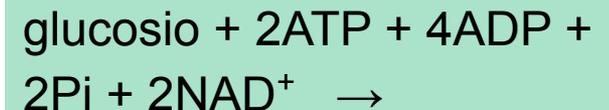


# 12. Vie cataboliche: la glicolisi

## Fase di recupero energetico



### BILANCIO ENERGETICO



# 13. Vie alternative alla glicolisi nei batteri

## Via dei pentoso-fosfati

- Alternativa alla glicolisi
- Avviene sia in aerobiosi che in anaerobiosi
- Indispensabile per la sintesi di carboidrati a 4 o 5 atomi di C.
- Importante per la produzione di NADPH da NADP<sup>+</sup>.
- La G3P è il punto di interconnessione con la glicolisi.

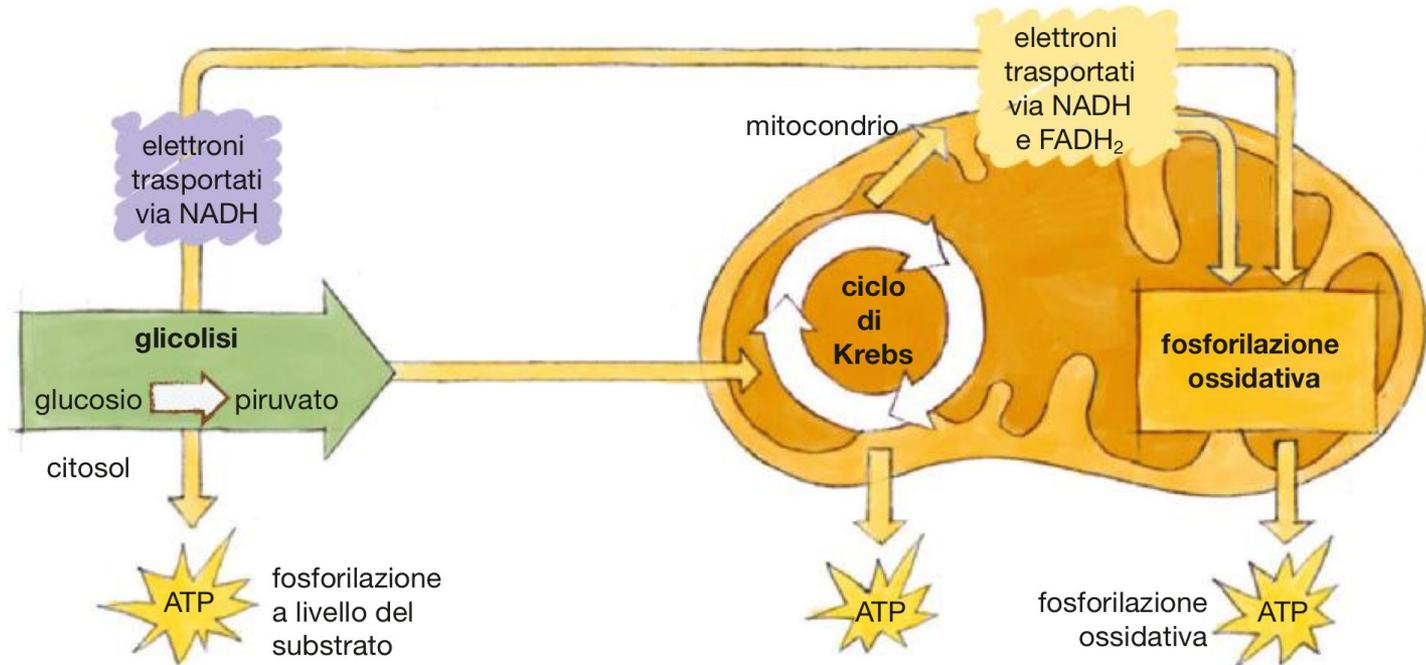
## Via dei *Entner-Doudoroff*

- Alternativa alla glicolisi, solo in alcuni procarioti privi dell'enzima per la sintesi di fruttosio 1,6-PP
- il glucosio-6P viene ossidato ad acido 6-fosfogluconico
- processo aerobico
- La resa energetica è di un solo ATP

# 14. Vie cataboliche: la respirazione cellulare

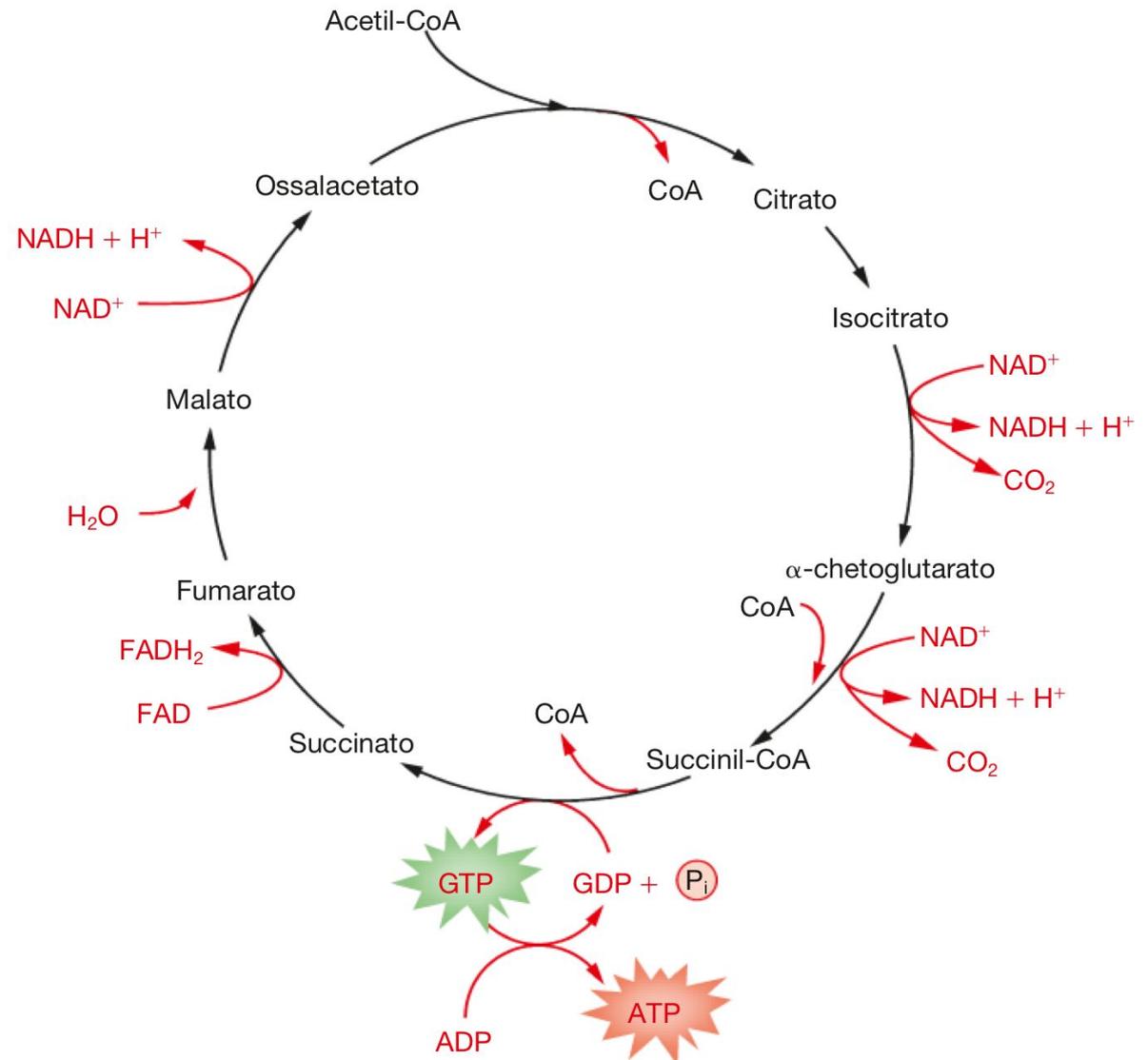
Le reazioni avvengono all'interno dei mitocondri.

- Ossidazione dell'acido piruvico (3C) ad Acetil-CoA (2C)
- Ciclo di Krebs
- Catena di trasporto degli elettroni



# 14. Vie cataboliche: la respirazione cellulare

## Ciclo dell'acido citrico



# 14. Vie cataboliche: la respirazione cellulare

## Catena di trasporto degli elettroni

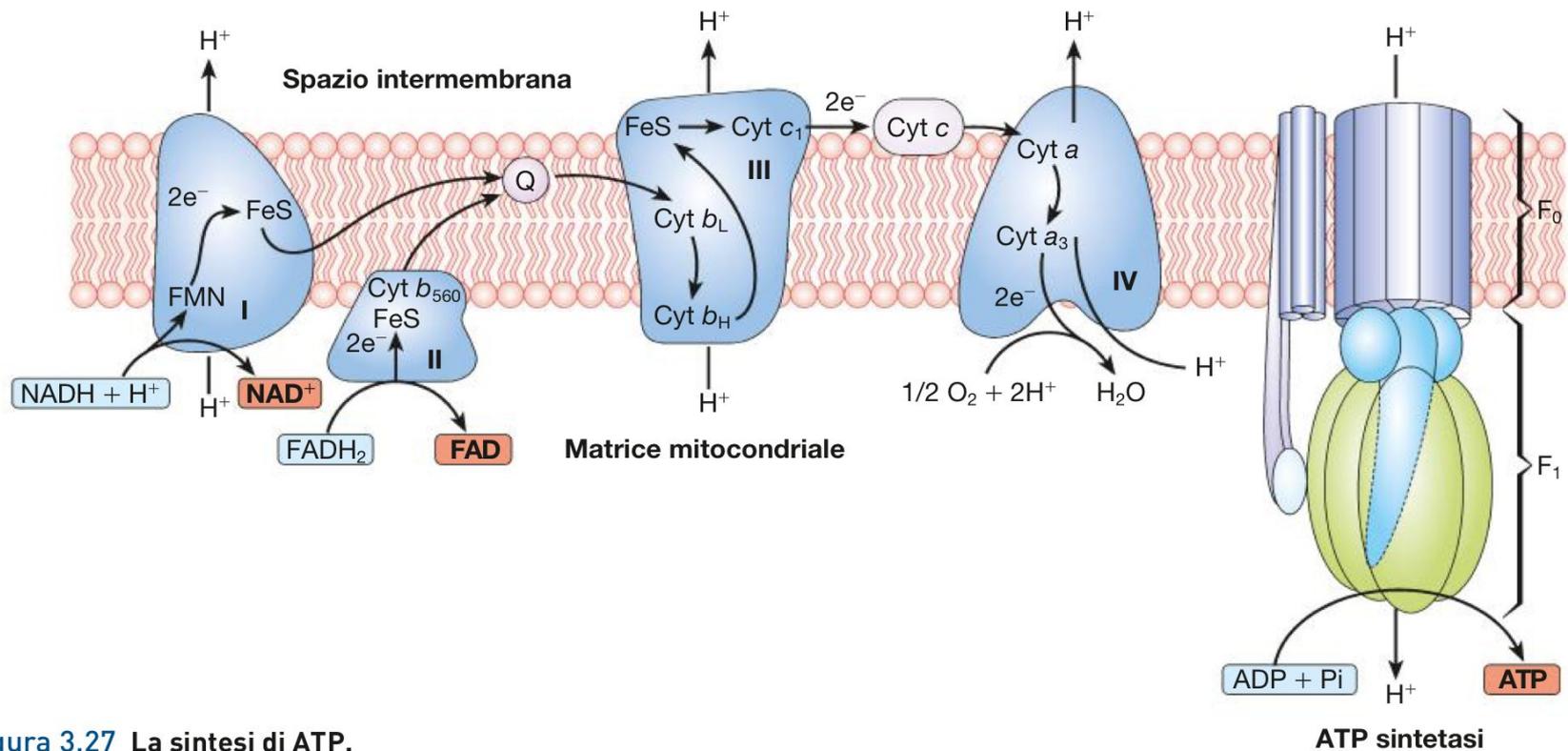


Figura 3.27 La sintesi di ATP.

# 15. Vie cataboliche: la respirazione anaerobica

Riduzione di composti in assenza di ossigeno.

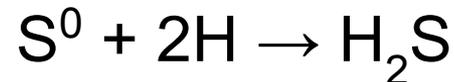
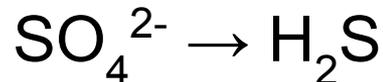
- **assimilativa**: i composti sono usati come nutrienti
- **dissimilativa**: i composti sono usati come fonte di energia

## NITRATI ( $\text{NO}_3^-$ ) - batteri denitrificanti

- Denitrificazione:  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$
- Anammox:  $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$

Queste reazioni sono utili nella depurazione delle acque reflue, e quando è necessario rimuovere ammoniaca dall'ambiente, ma risultano svantaggiose nel suolo, perchè impoveriscono il terreno

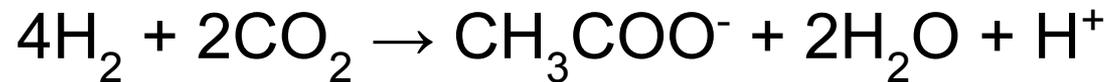
## SOLFATI ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) - batteri solfato-riduttori



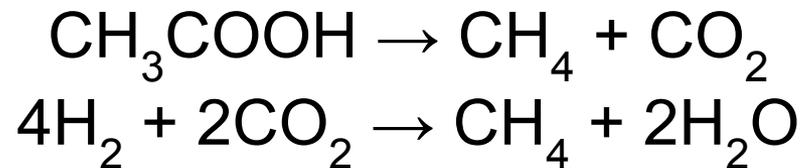
# 15. Vie cataboliche: la respirazione anaerobica

## Produzione di acetato - batteri acetici e acetogeni

I batteri acetici producono acido acetico a partire da zuccheri ed alcool, i batteri acetogeni usano la “via dell’Acetil CoA”.



## Metanogenesi - *Archaea* metanogeni



Produzione  
di biogas

# 16. La chemiolitotrofia: energia da sostanze inorganiche

**Chemiolitotrofia:** ossidazione di molecole inorganiche.

- I batteri chemiolitotrofi hanno un ruolo rilevante nei **cicli biogeochimici**.
- L'ATP viene prodotta con catene di trasporto di elettroni similmente alla respirazione aerobica.

**IDROGENO** (idrogenobatteri):  $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

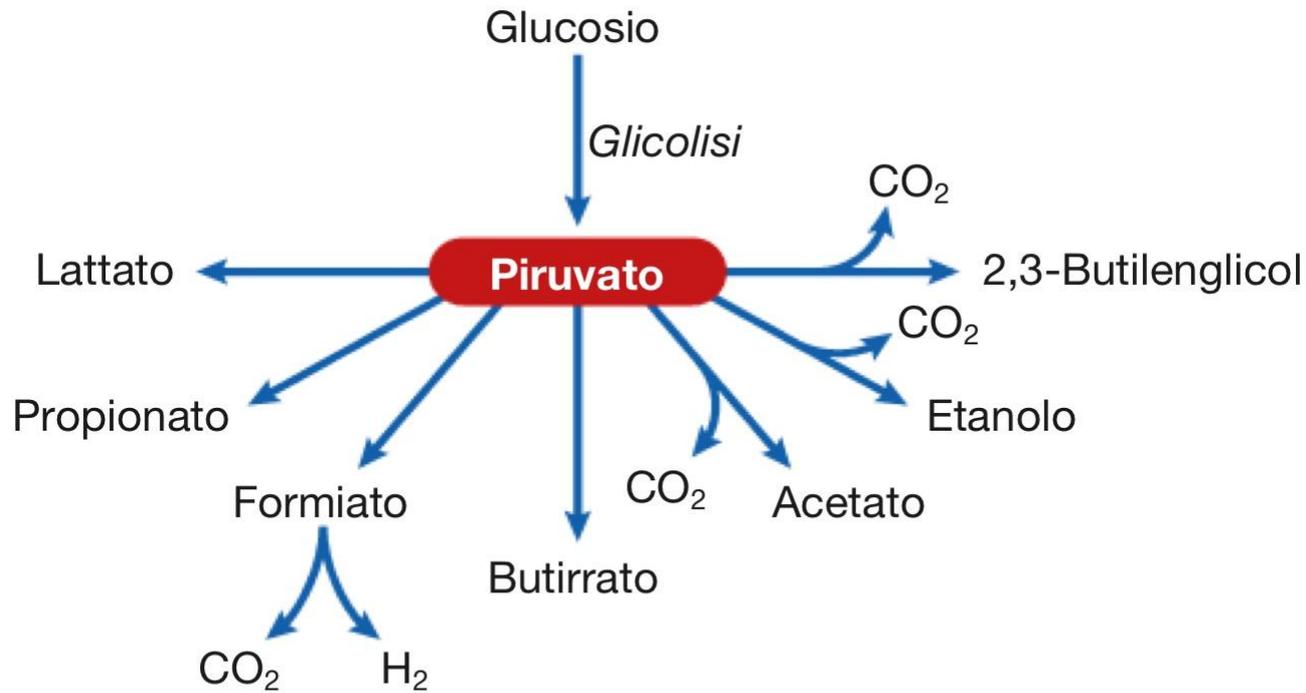
**ZOLFO** (solfobatteri incolori):  $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \text{ o } \text{S}^0$

**FERRO** (ferrobatteri):  $\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$

La reazione provoca acidificazione nell'ambiente

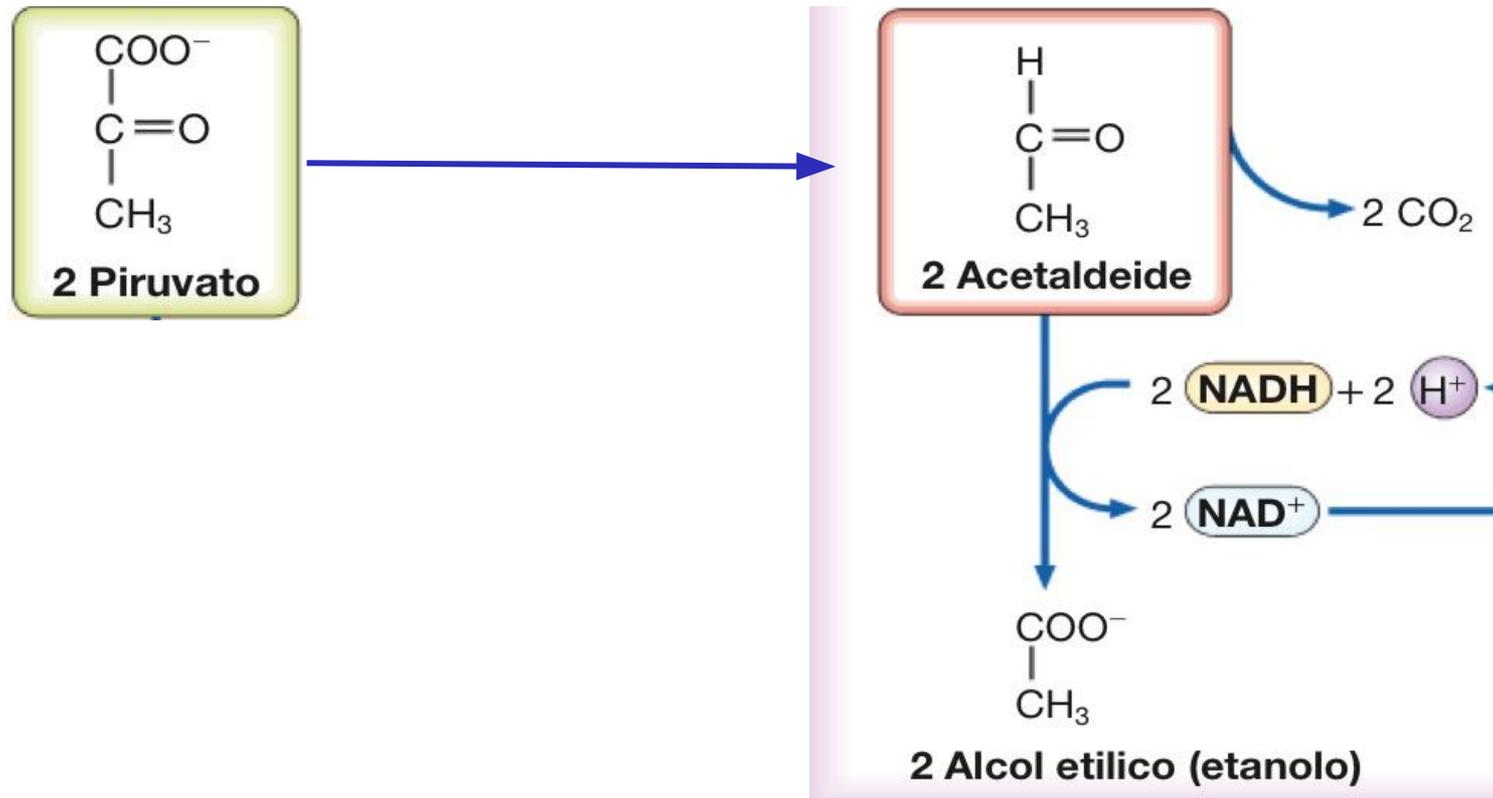
# 17. Vie cataboliche: la fermentazione microbica

**Scopo della fermentazione:** riossidare il NADH a NAD<sup>+</sup> (se non avvenisse, si bloccherebbe la glicolisi)



# 17. Vie cataboliche: la fermentazione microbica

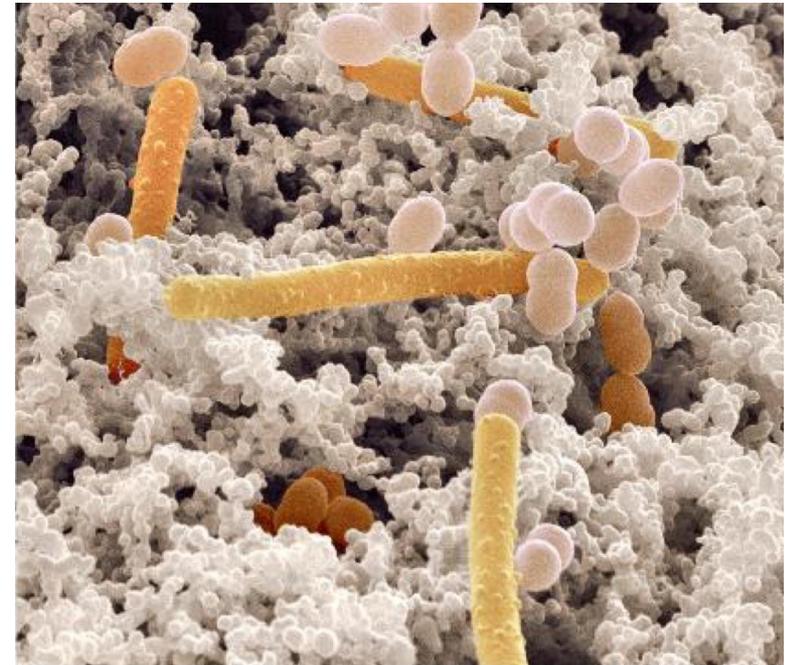
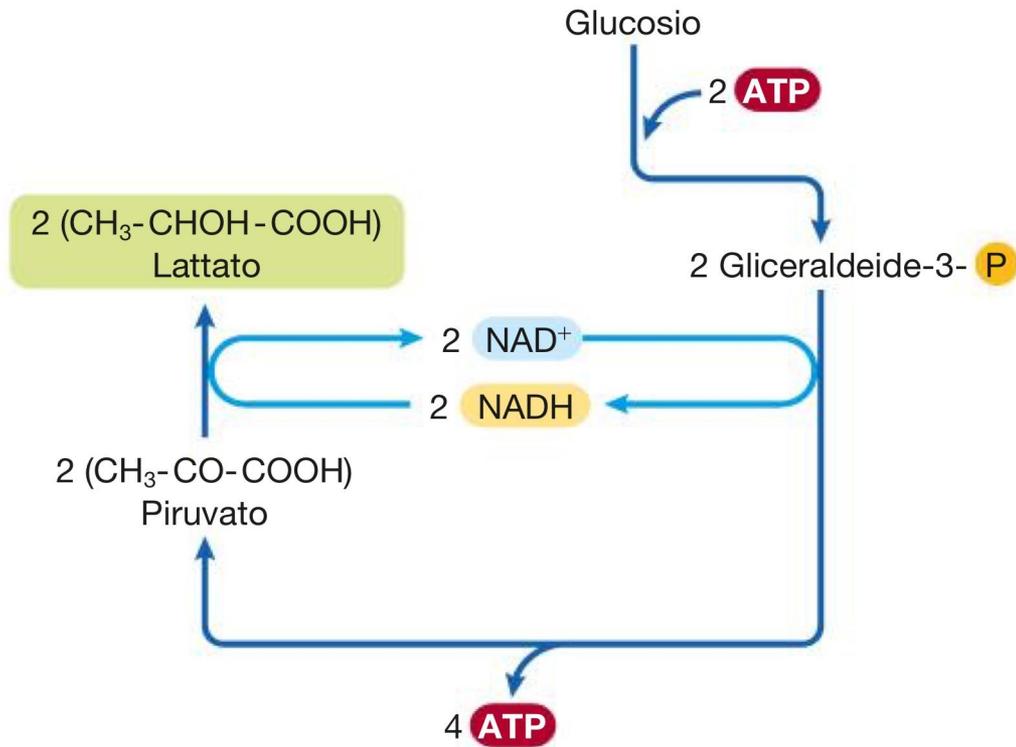
## Fermentazione alcolica



| Fermentazione | Principali prodotti dell'acido piruvico | Microrganismi | Principali applicazioni da parte dell'uomo       |
|---------------|---|---------------|--|
| Alcolica      | Etanolo<br>$\text{CO}_2$                | Lieviti       | Produzione di bevande alcoliche<br>Panificazione |

# 17. Vie cataboliche: la fermentazione microbica

## Fermentazione omolattica



| Fermentazione | Principali prodotti dell'acido piruvico | Microrganismi   | Principali applicazioni da parte dell'uomo                                    |
|---------------|---|---|---|
| Omolattica    | Acido lattico                           | Molti batteri lattici:<br><i>Streptococcus</i><br><i>Pediococcus</i><br>alcuni <i>Lactobacillus</i> | Prodotti lattiero-caseari<br>Prodotti vegetali fermentati (crauti, sottaceti) |

# 17. Vie cataboliche: la fermentazione microbica

| Fermentazione   | Principali prodotti dell'acido piruvico                                  | Microrganismi   | Principali applicazioni da parte dell'uomo   |
|-----------------|--|---|--|
| Acido mista     | Acidi lattico, acetico, succinico, formico<br>$\text{CO}_2 + \text{H}_2$ | Molti enterobatteri, inclusi:<br><i>Escherichia</i><br><i>Salmonella</i><br><i>Shigella</i><br><i>Enterobacter</i><br><i>Yersinia</i> | Utilizzata per identificare i batteri della famiglia delle <i>Enterobacteriaceae</i> |
| Butirrica       | Acido butirrico, acido acetico<br>$\text{CO}_2$<br>$\text{H}_2$          | <i>Clostridium</i><br><i>Fusobacterium</i>  | Processi di macerazione per fibre tessili  |
| Propionica      | Acido propionico, acido acetico, acido succinico<br>$\text{CO}_2$        | <i>Propionibacterium</i><br><i>Veillonella</i>  | Produzione di alcuni formaggi tipo emmenthal   |
| Aceton butilica | Butanolo, acetone, isopropanolo, etanolo                                 | Alcuni clostridi  | Produzione di acetone ed etanolo   |
| Butandiolica    | 2,3-butandiolo<br>$\text{CO}_2$  | <i>Enterobacter</i><br><i>Serratia</i><br><i>Erwinia</i><br><i>Aeromonas</i>  | Utilizzata per identificare i batteri della famiglia delle <i>Enterobacteriaceae</i> |