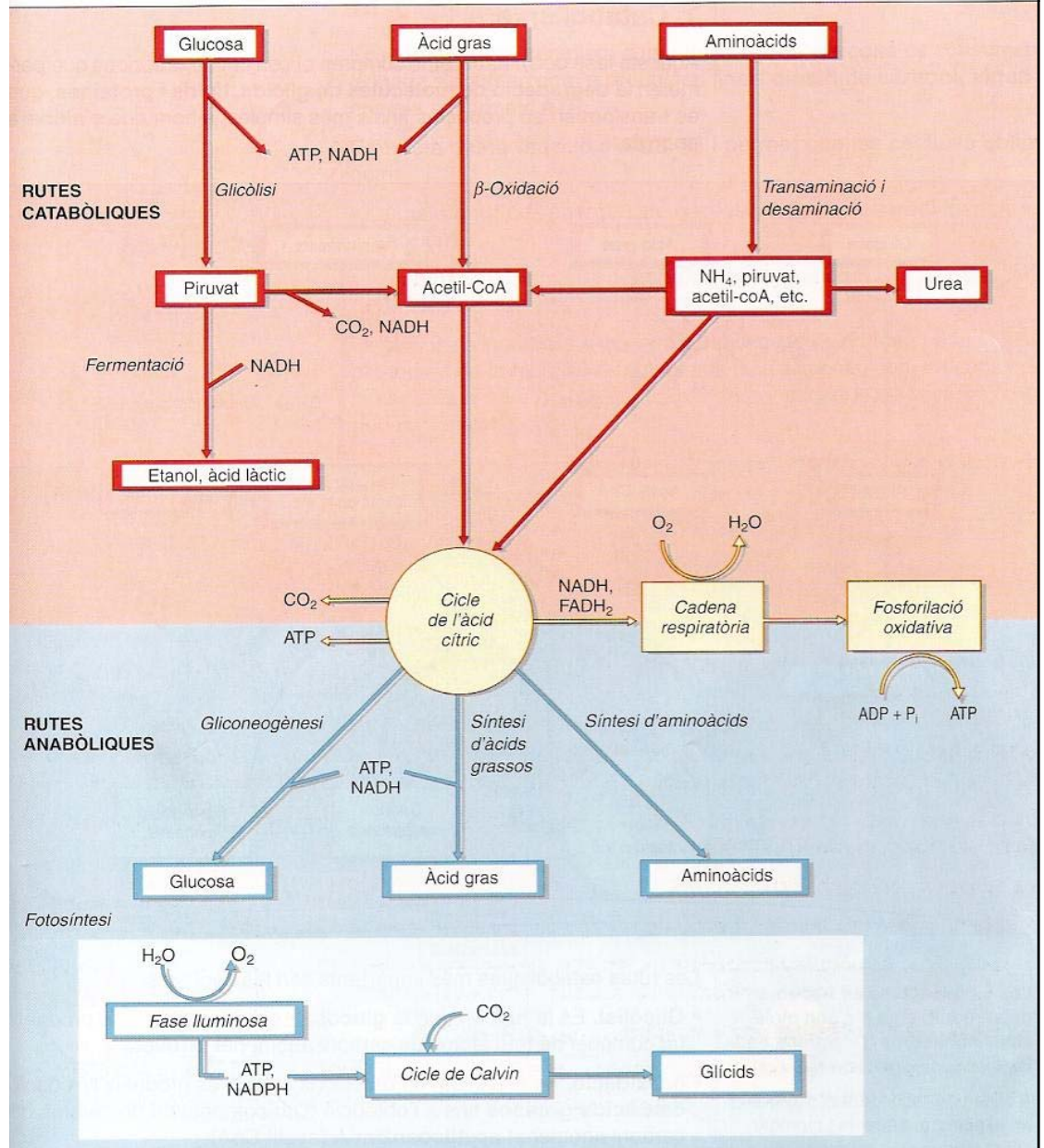


- 1: glicogenólisi
- 2: glicogènesi =glicogenogènesi
- 3: glucòlisi
- 4: cicle de Krebs o cicle de l'àcid citric
- 5: lipòlisi
- 6: esterificació /lipogènesi
- 7: beta-oxidació
- 8: lipogènesi
- 9: degradació (digestió) de proteïnes
- 10: síntesi de proteïnes
- 11: cadena respiratòria i fosforilació oxidativa
- 12: fermentació
- 13: transaminacions desaminacions / desaminació oxidativa
- 14: síntesi d'animoàcids
- 15: gluconeogenesis
- 16: oxidació del piruvat

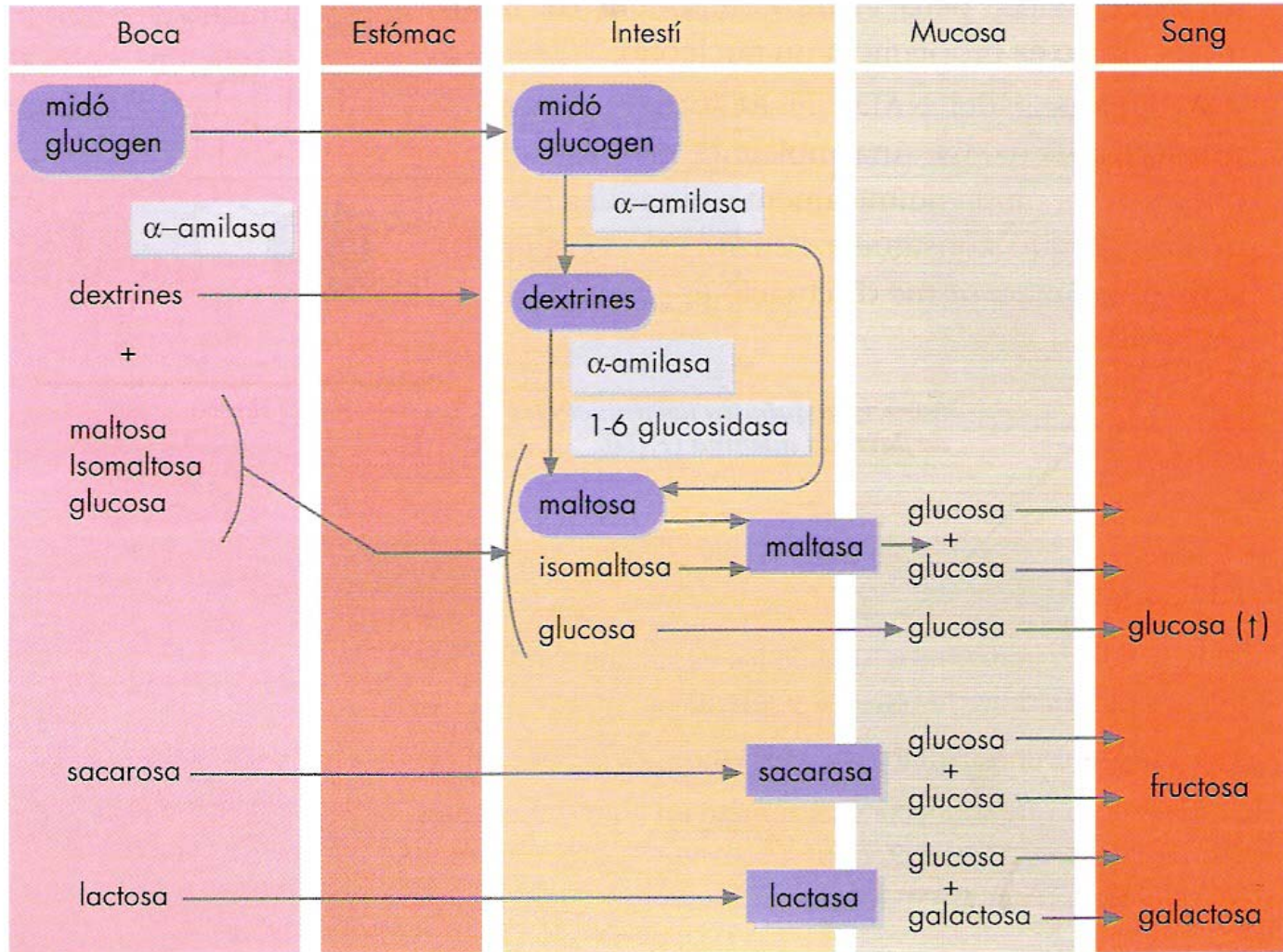
Metabolisme

Catabolisme



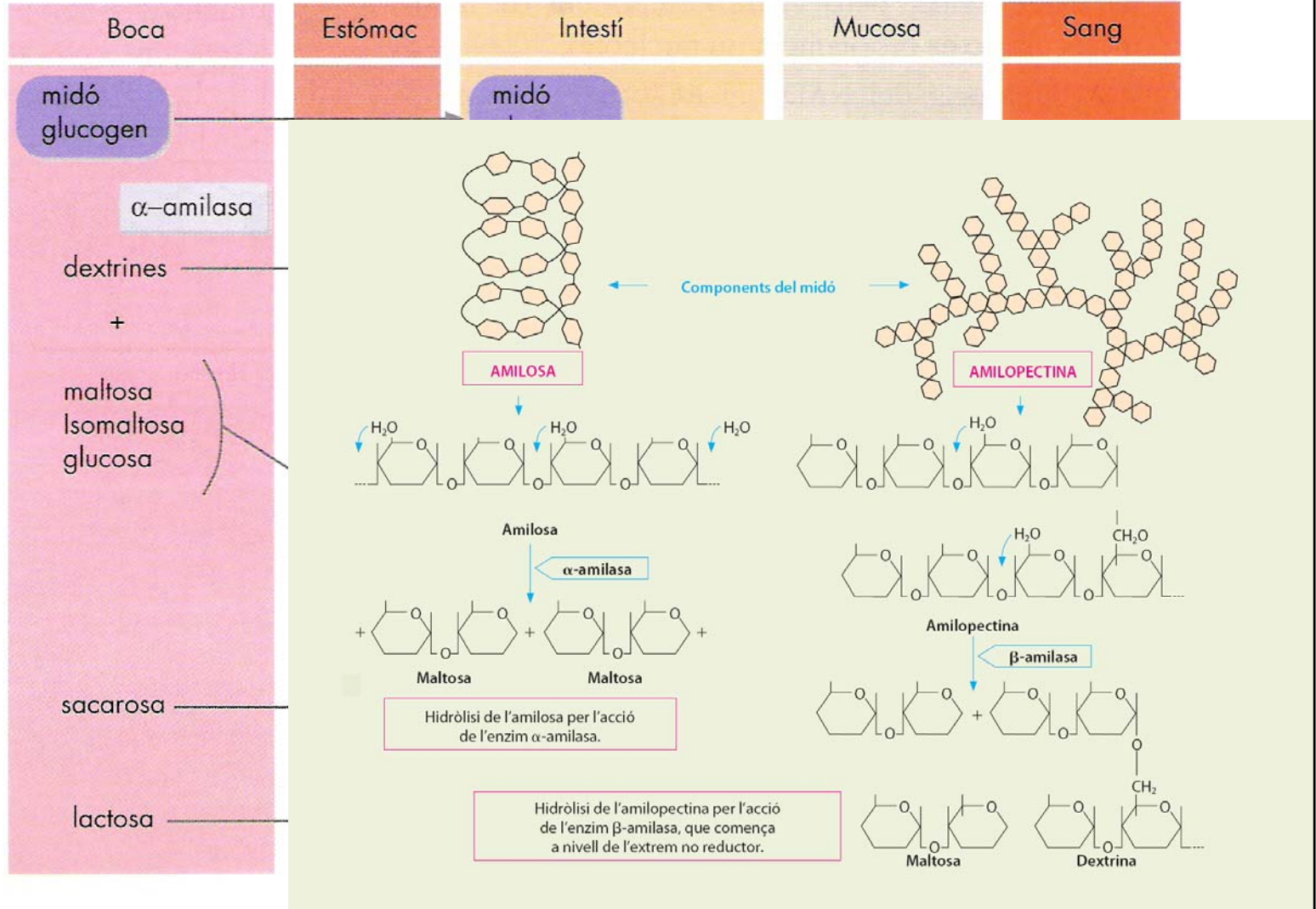
Catabolisme de glúcids

Digestió de glúcids



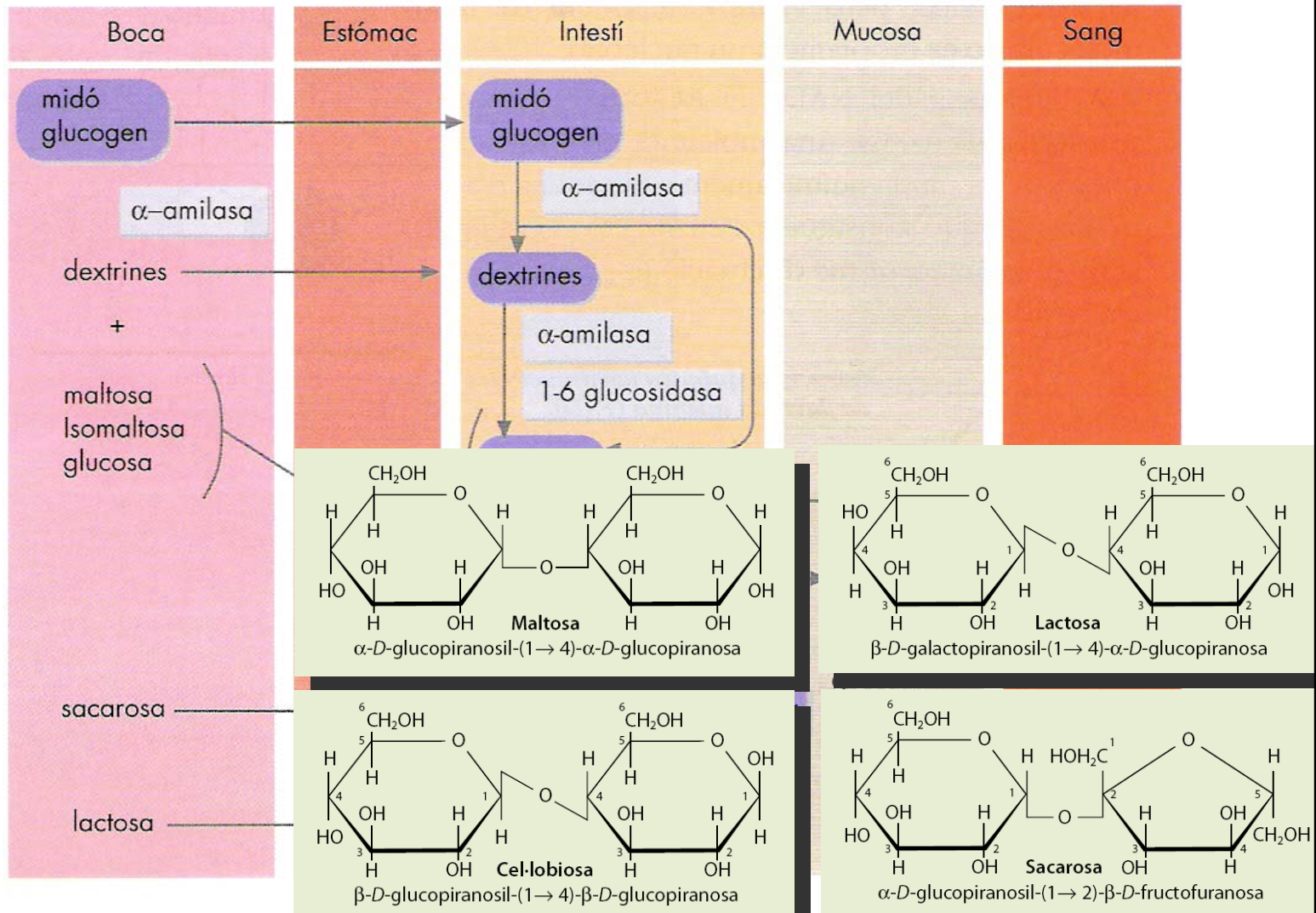
Catabolisme de glúcids

Digestió de glúcids



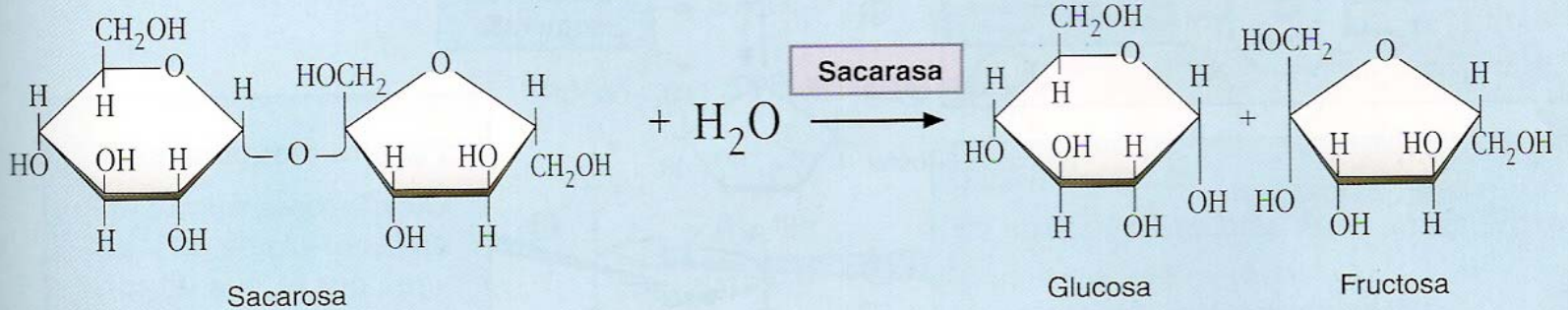
Catabolisme de glúcids

Digestió de glúcids

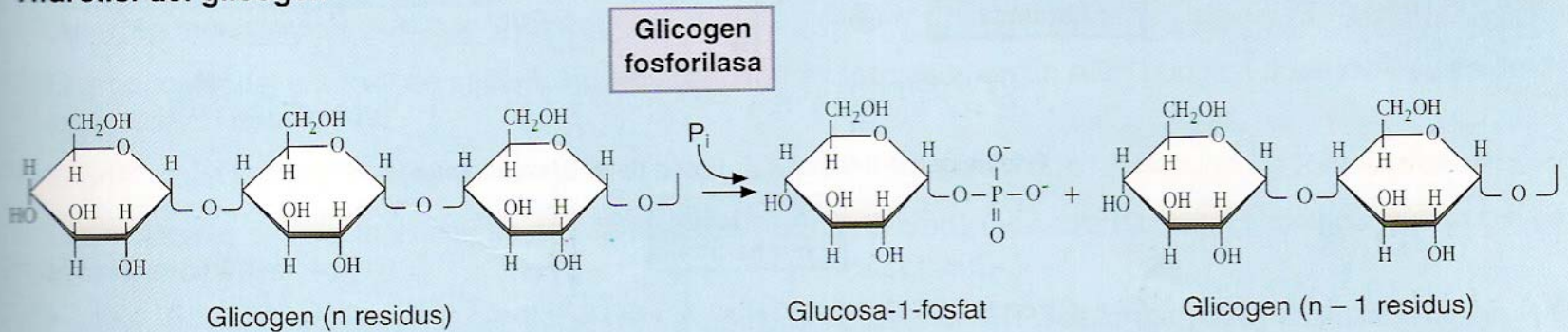


Hidròlisi de la sacarosa

Catabolisme de la glucosa



Hidròlisi del glicogen



Glicòlisi

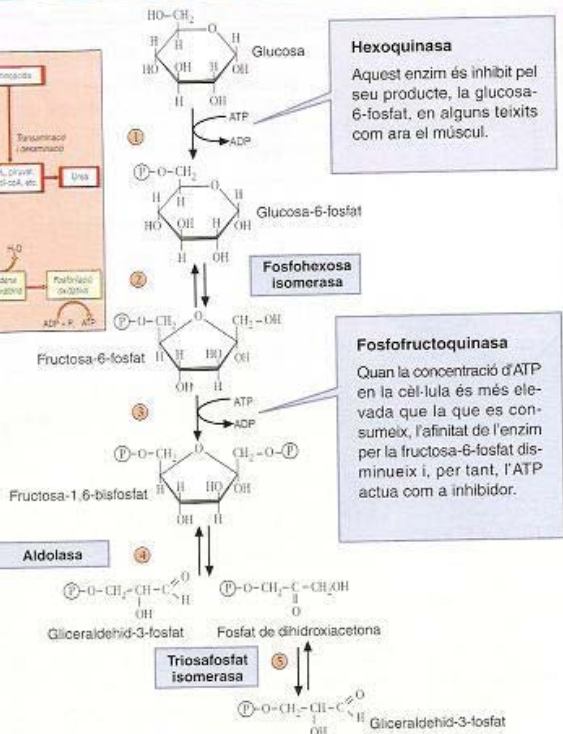
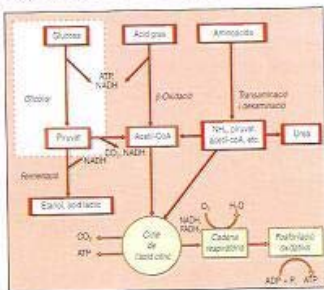


Glicòlisi

És la ruta catabòlica constituïda per una seqüència lineal de reaccions que condueixen a la formació de **piruvat**, a partir d'una molècula de **glucosa**.

En la glicòlisi es distingeixen dues etapes, una en què es consumeix energia i una altra en què se n'obté. Totes dues etapes es desenvolupen en el **citòsol**.

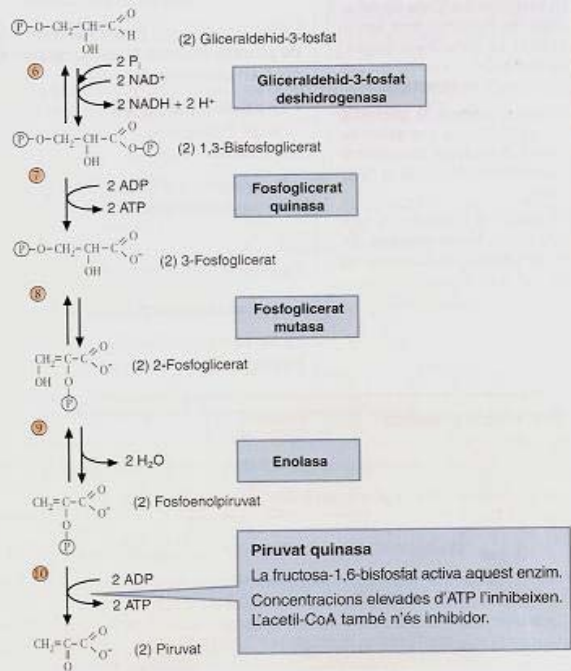
Etapa de consum d'energia



- Es produeix la transferència d'un grup fosfat procedent d'una molècula d'ATP al grup hidroxil en C-6 de la glucosa. S'obté una molècula de *glucosa-6-fosfat*.
- La glucosa-6-fosfat, mitjançant una isomerització, origina la *fructosa-6-fosfat*.
- La fructosa-6-fosfat es fosforila en C-1 mitjançant el consum d'una molècula d'ATP i produeix la *fructosa-1,6-bisfosfat*.
- La fructosa-1,6-bisfosfat s'escindeix en dues molècules de tres àtoms de carboni: una cetosa, el *gliceraldehid-3-fosfat*, i una aldosa, el *fosfat de dihidroxiacetona*.
- El fosfat de dihidroxiacetona, mitjançant una isomerització, origina el *gliceraldehid-3-fosfat*.

Balànç energètic: en aquesta etapa es consumeixen dues molècules d'ATP.

Etapa d'obtenció d'energia



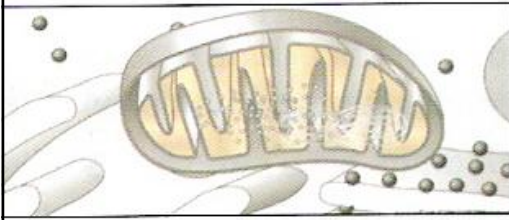
- El grup aldehid de cadascuna de les dues molècules de gliceraldehid-3-fosfat que s'han obtingut en l'etapa anterior reacciona amb un fosfat inorgànic i s'obtenen dues molècules d'*1,3-bisfosfoglicerat* i dos hidrògens que redueixen dues molècules de NAD⁺ a NADH.
- El grup fosfat del carboxil de cada 1,3-bisfosfoglicerat es transfereix a un ADP i origina dues molècules de 3-fosfoglicerat i dues d'ATP.
- El grup fosfat en C-3 de cada 3-fosfoglicerat se situa en C-2 i s'obtenen dues molècules de 2-fosfoglicerat.
- Les molècules de 2-fosfoglicerat es deshidraten, és a dir, perden una molècula d'aigua. El compost que s'obté és el *fosfoenolpiruvat*.
- Cada molècula de fosfoenolpiruvat transfereix el seu grup fosfat a un ATP i es formen dues molècules de *piruvat*.

Balànç energètic: en aquesta etapa es produeixen quatre ATP i dos NADH.

Balànç energètic de la glicòlisi

Tenint en compte que en la primera etapa es consumeixen dos ATP i que en la segona es formen quatre ATP i dos NADH, la glicòlisi es pot representar mitjançant l'equació següent:

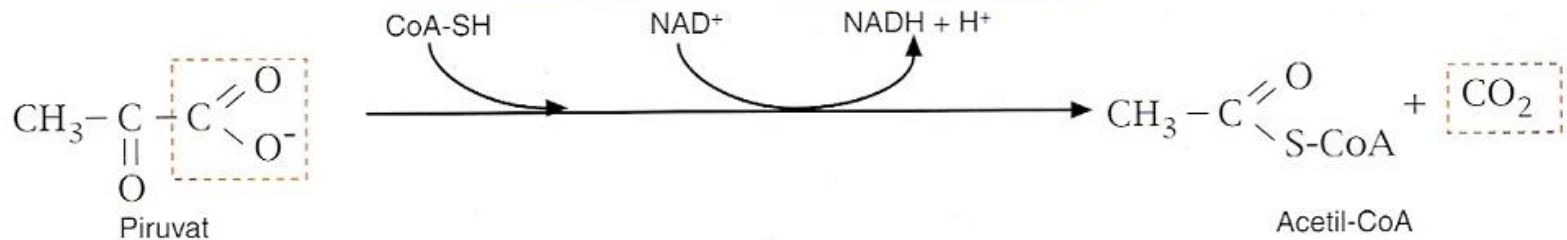




Oxidació del piruvat

Piruvat deshidrogenasa

El NAD i el CoA en són activadors. L'acetil-CoA, l'ATP i el NADH en són inhibidors.

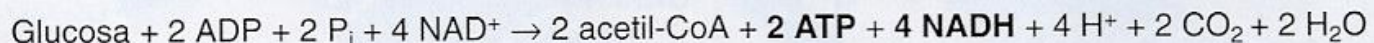


- La molècula de piruvat perd un grup carboxil en forma de CO_2 i origina *acetil-CoA* i NADH.

La reacció està catalitzada per un grup de tres enzims, el **complex piruvat deshidrogenasa**. Aquest complex regula la velocitat de formació de l'acetil-CoA i, per tant, la velocitat a la qual s'incorpora al cicle de l'àcid cítric.

Balanç energètic: la degradació d'una molècula de piruvat produeix un NADH; per tant, la degradació de dues molècules de piruvat **origina dos NADH**.

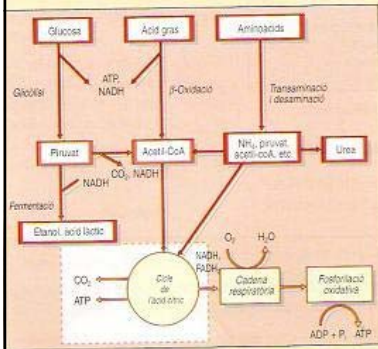
La degradació d'una molècula de **glucosa** fins a **acetil-CoA** es representa per l'equació següent:





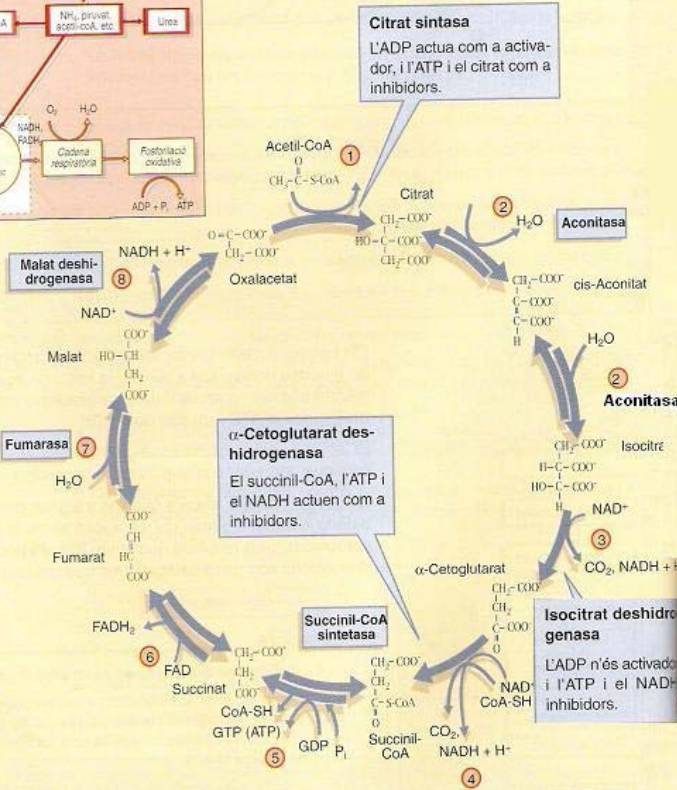
Cicle de Krebs

Animació: http://www.educared.org/wikiEducared/index.php?title=Ciclo_de_Krebs



Cicle de l'àcid cítric

MATRIU MITOCONDRIAL



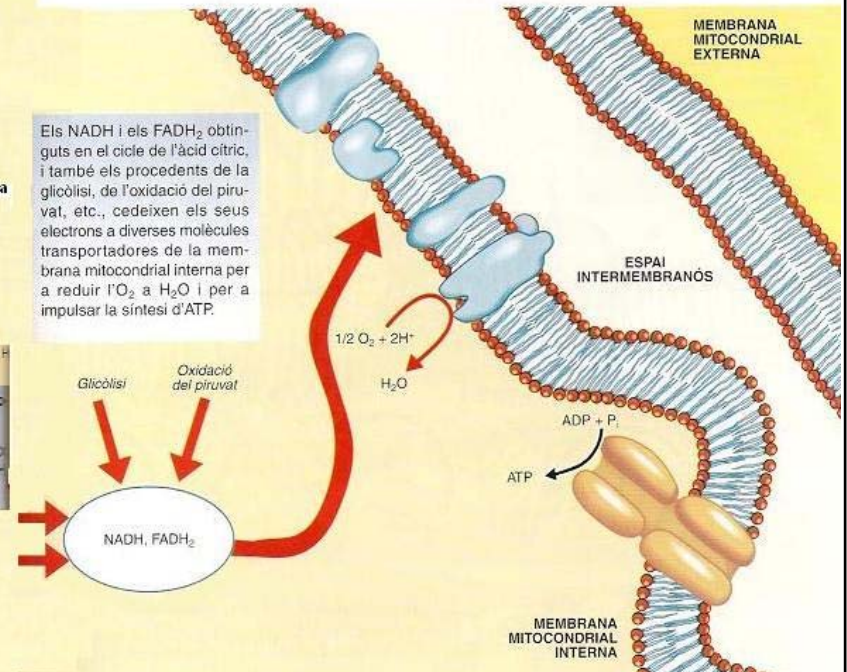
1. La condensació de l'acetyl-CoA amb oxalacetat origina citrat.
2. El citrat s'isomeritza a isocitrat mitjançant una deshidratació seguida d'una hidratació. En aquesta transformació es forma un compost intermedi, el *cis*-aconitat.

3. L'isocitrat es descarboxila i allibera una molècula de CO_2 . S'obtenen α -cetoglutarat i NADH.
4. L' α -cetoglutarat s'oxida i allibera una molècula de CO_2 . Com a conseqüència, es formen succinil-CoA i NADH.
5. El succinil-CoA es transforma en succinat. L'energia que s'allibera en aquesta reacció s'utilitza per a la síntesi de GTP. El GTP pot cedir el seu grup fosfat a l'ADP i originar ATP.
6. El succinat s'oxida a fumarat, alhora que el FAD es redueix a FADH_2 .
7. El fumarat incorpora una molècula d'aigua, és a dir, s'hidrata i produeix un isòmer, el malat.
8. En aquesta darrera reacció del cicle, el malat s'oxida i origina l'oxalacetat i NADH.

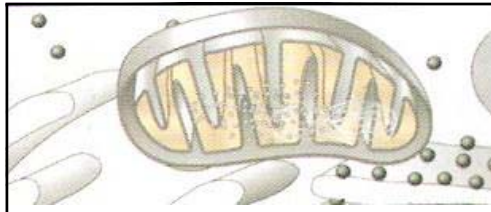
Balànç energètic: l'oxidació d'una molècula d'acetyl-CoA allibera 1 ATP, 3 NADH i 1 FADH_2 . Tanmateix, la degradació de dues molècules de piruvat origina dues molècules d'acetyl-CoA i, per tant, s'obtenen 2 ATP, 6 NADH i 2 FADH_2 .

Com a resultat de l'oxidació d'una molècula de glucosa a CO_2 i H_2O s'obtenen:

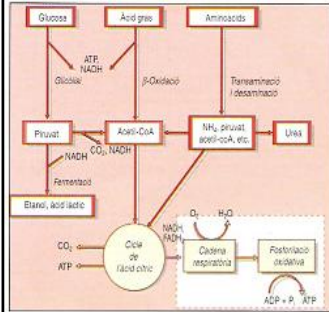
4 ATP / 10 NADH / 2 FADH_2



Els NADH i els FADH_2 obtinguts en el cicle de l'àcid cítric, i també els procedents de la glicòlisi, de l'oxidació del piruvat, etc., cedeixen els seus electrons a diverses molècules transportadores de la membrana mitocondrial interna per a reduir l' O_2 a H_2O i per a impulsar la síntesi d'ATP.



Cadena respiratòria i fosforilació oxidativa



ESPAI INTERMEMBRANÓS

Complex II o succinat deshidrogenasa

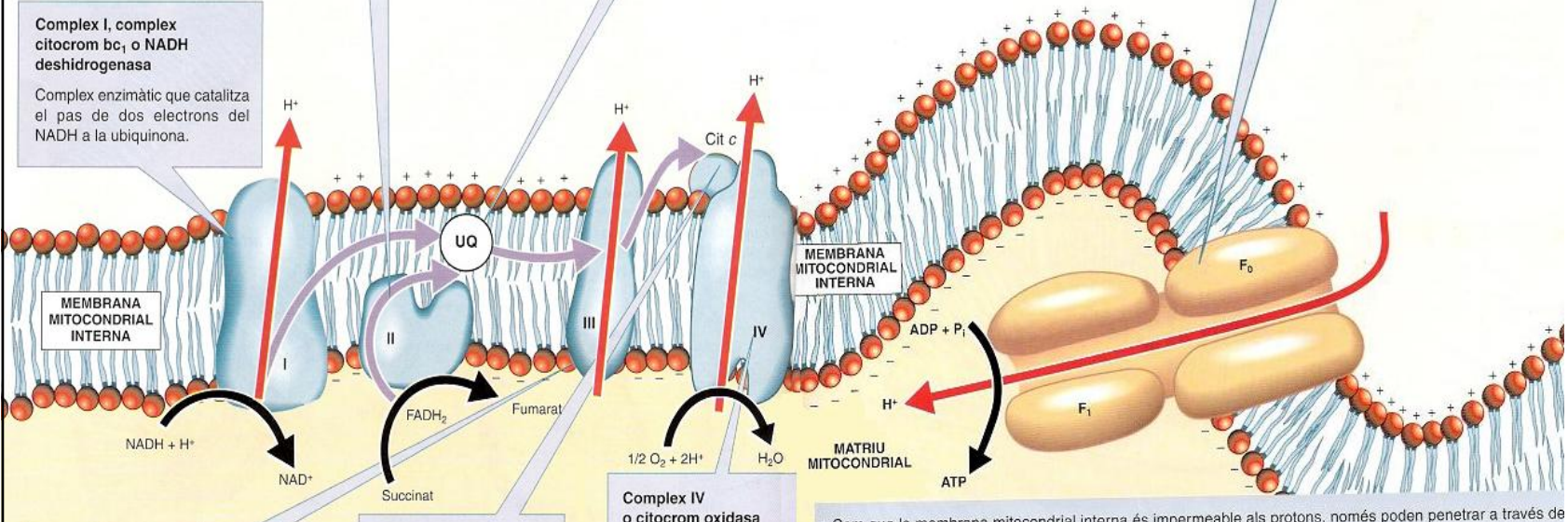
Catalitza la transferència d'electrons procedents del FADH_2 a la ubiquinona.

Ubiquinona (UQ) o coenzim Q

Compost que es desplaça per la membrana i transcorreix els electrons al complex III.

Complex I, complex citocrom bc₁ o NADH deshidrogenasa

Complex enzimàtic que catalitza el pas de dos electrons del NADH a la ubiquinona.



ESPAI INTERMEMBRANÓS

MEMBRANA MITOCONDRIAL INTERNA

MATRIU MITOCONDRIAL

Complex III o ubiquinona-citocrom c oxidoreductasa

Catalitza el transport d'electrons des de la ubiquinona fins al citocrom c.

Citocrom c (Cit c)

Compost que es desplaça per la membrana i transcorreix els electrons al complex IV.

Complex IV o citocrom oxidasa

Catalitza el transport d'electrons des del citocrom c fins a l'oxigen; se n'obté una molècula d'aigua.

En el complex ATP sintasa s'hi distingeixen dues subunitats:

- La subunitat F_0 està unida a la membrana mitocondrial interna i forma una estructura en canal per on circulen els protons des de l'espai intermembranós cap a la matriu.
- La subunitat F_1 es localitza en el costat de la matriu i la seva interacció amb F_0 la manté unida a la membrana. Aquesta subunitat conté el lloc actiu per a la síntesi d'ATP.

• Com que la membrana mitocondrial interna és impermeable als protons, només poden penetrar a través de canal de la subunitat F_0 .

• En la subunitat F_1 es produeix la reacció de síntesi d'ATP a partir de l'ADP i del P_i .

Balànç energètic: per cada NADH que s'oxida es formen tres ATP, mentre que per l'oxidació de cada FADH es produeixen dos ATP, ja que els seus electrons s'incorporen al complex II de la cadena respiratòria.

Balanç energètic global del catabolisme de la glucosa

A partir d'una molècula de glucosa s'obté el següent balanç energètic:

	<i>Nombre d'ATP formats</i>	<i>Nombre de NADH formats</i>	<i>Nombre de FADH₂ formats</i>
Glicòlisi	2	2	
Oxidació del piruvat		2	
Cicle de l'àcid cítric	2	6	2
TOTAL	4	10	2

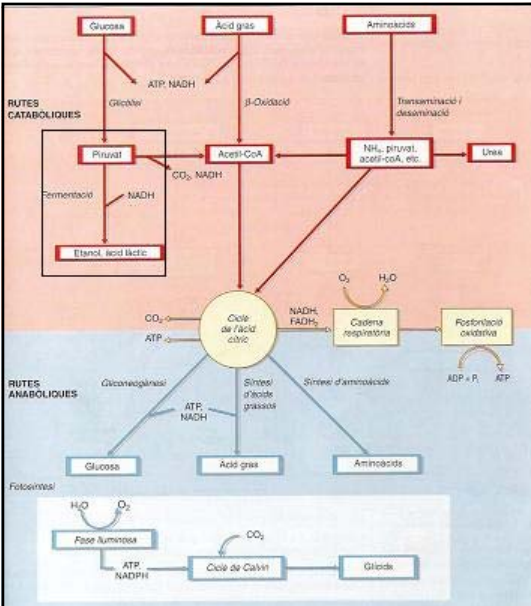
Cada molècula de NADH n'origina 3 d'ATP → $10 \times 3 = 30$ molècules d'ATP

Cada molècula de FADH₂ n'origina 2 d'ATP → $2 \times 2 = 4$ molècules d'ATP

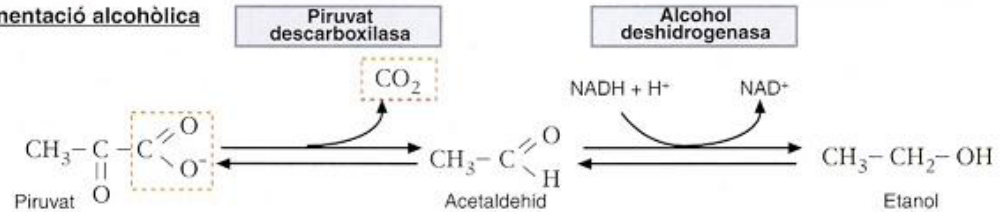
$$4 \text{ ATP} + 30 \text{ ATP} + 4 \text{ ATP} = 38 \text{ molècules d'ATP}$$

Balanç energètic

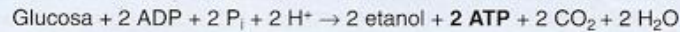
Fermentacions



Fermentació alcohòlica



- La molècula de piruvat es descarboxila i origina *acetaldehid*.
 - L'acetaldehid es redueix com a conseqüència de l'oxidació del NADH i s'obté *etanol*.
- Balànç energètic:** en aquesta reacció es consumeix un NADH; per tant, si es degraden dues molècules de piruvat **es consumeixen dos NADH**. La degradació d'una molècula de glucosa fins a **etanol** es representa per l'equació següent:



Fermentació butírica

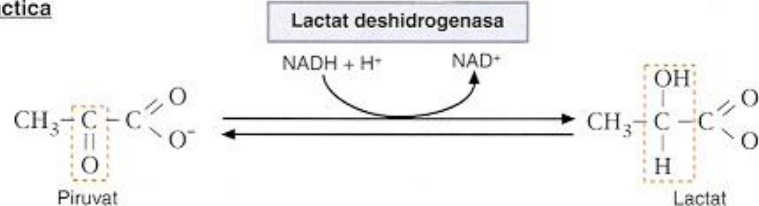
Àcid butíric
Fa pudor

Fermentació pútrida

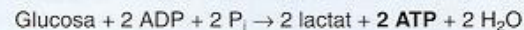
Es degraden productes proteïcs.
Fa pudor
Alguns en la fabricació de formatges i vins

La **fermentació làctica** és un procés freqüent en teixits animals com el múscul esquelètic i en alguns microorganismes procarïotes (*Lactobacillus*, *Streptococcus*, etc.).

Fermentació làctica

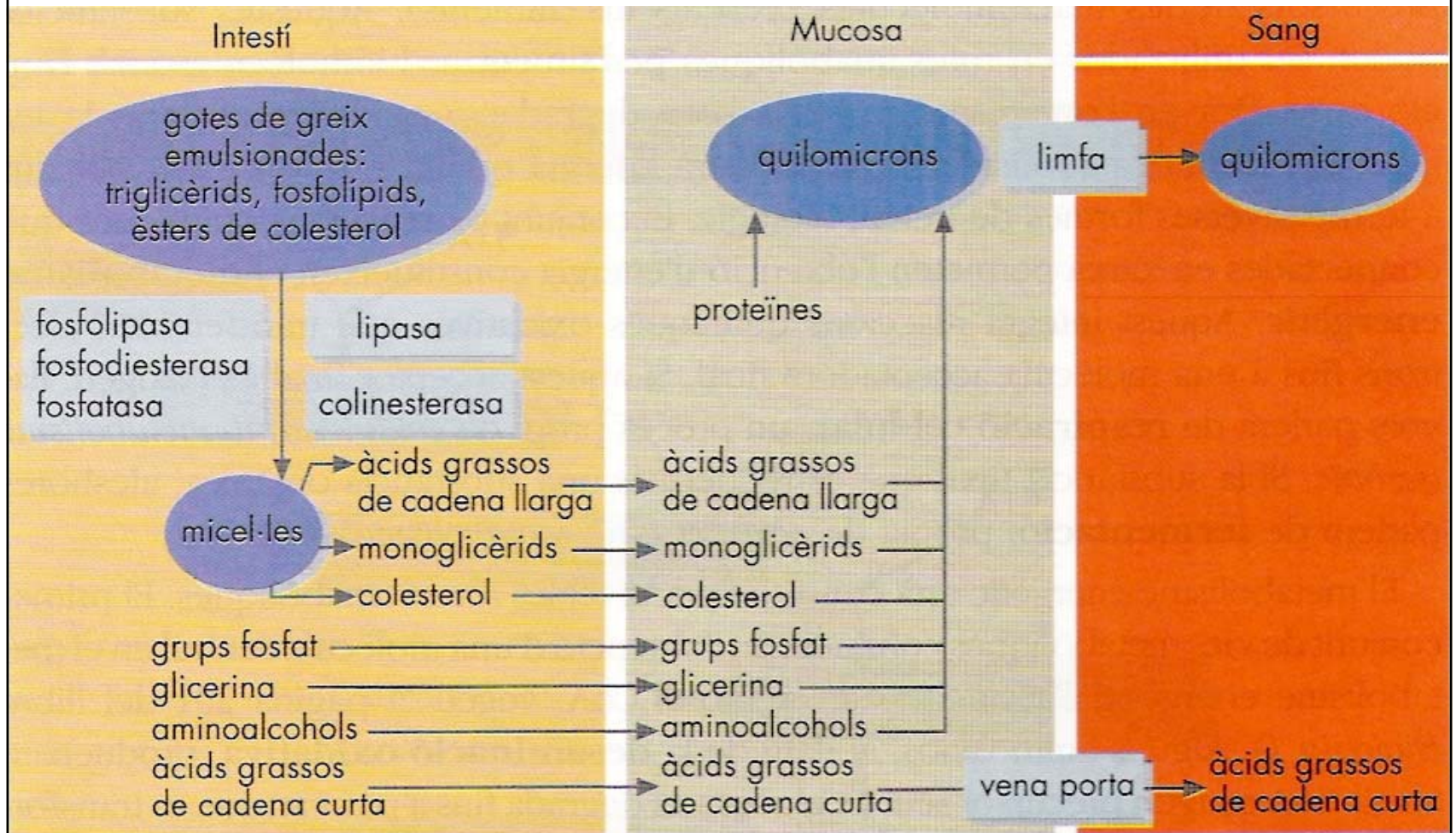


- La molècula de piruvat es redueix com a conseqüència de l'oxidació del NADH i produeix *lactat*.
- Balànç energètic:** en aquesta reacció es consumeix un NADH. Com en el cas anterior, si es degraden dues molècules de piruvat **es consumeixen dos NADH**. La degradació d'una molècula de glucosa fins a **lactat** es representa per l'equació següent:



Catabolisme de lípids

Digestió de lípids



Catabolisme dels àcids grassos

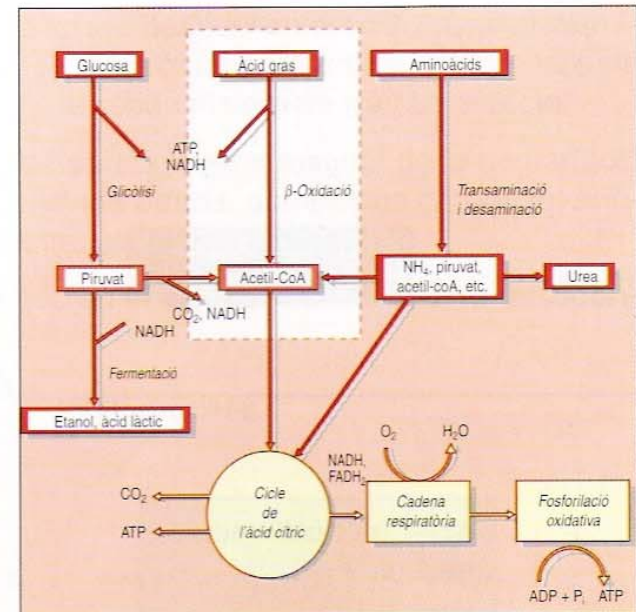


Catabolisme dels àcids grassos

L'oxidació dels àcids grassos proporciona a les cèl·lules energia i productes intermedis. Els àcids grassos s'obtenen de la hidròlisi de triacilglicerols emmagatzemats o procedents de la dieta. Aquesta hidròlisi es produeix mitjançant l'acció en el **citòsol** d'uns enzims anomenats **lipases**.

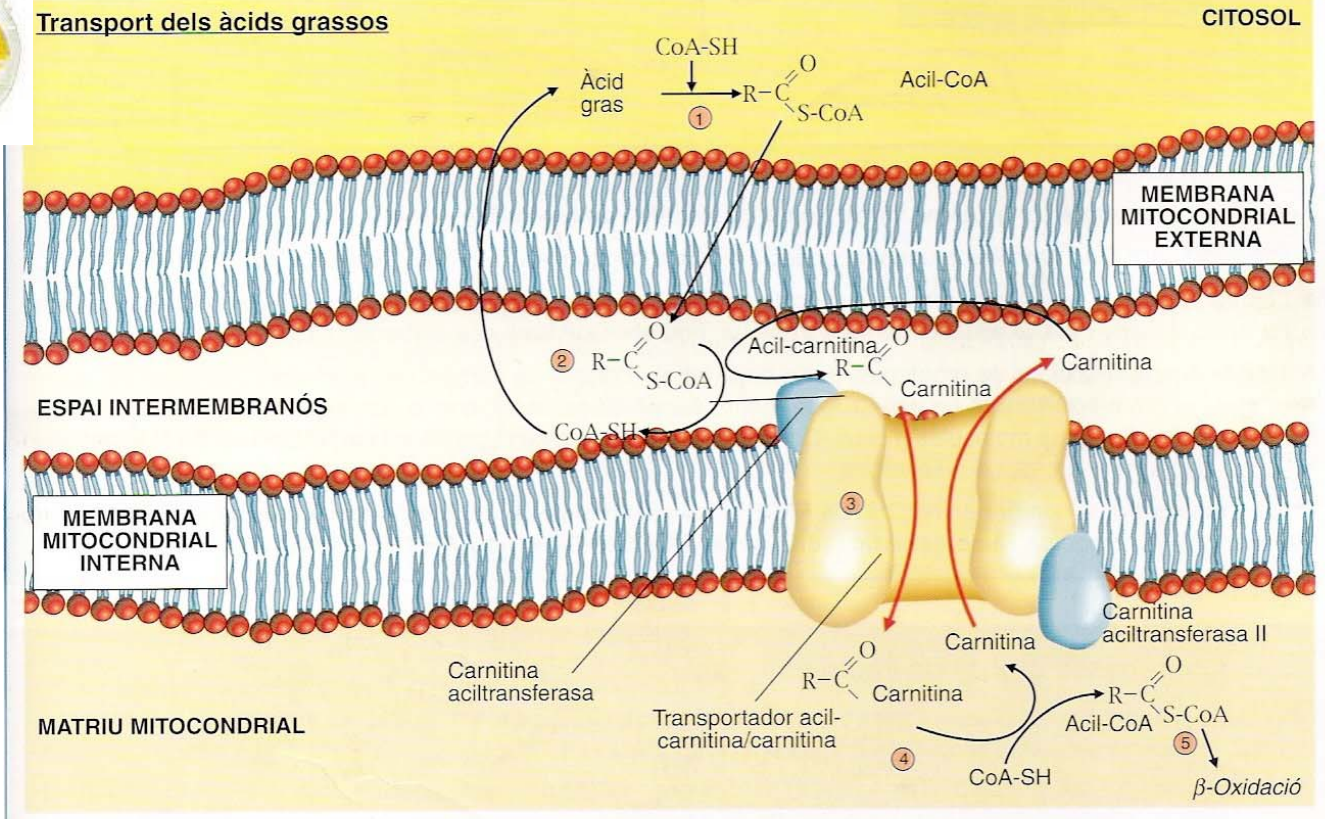
Com a resultat, s'obtenen **glicerina**, que origina el **gliceraldehid-3-fosfat** i s'incorpora a la **glicòlisi**, i **àcids grassos**, que es transporten a la **matriu mitocondrial**, on es degraden en el procés anomenat **β -oxidació**.

En la descripció d'aquests processos prenem com a exemple els àcids grassos saturats amb una cadena formada per un nombre parell d'àtoms de carboni, ja que la seva oxidació és menys complexa que la dels àcids grassos insaturats o la dels àcids grassos amb un nombre imparell d'àtoms de carboni.





Transport dels àcids grassos



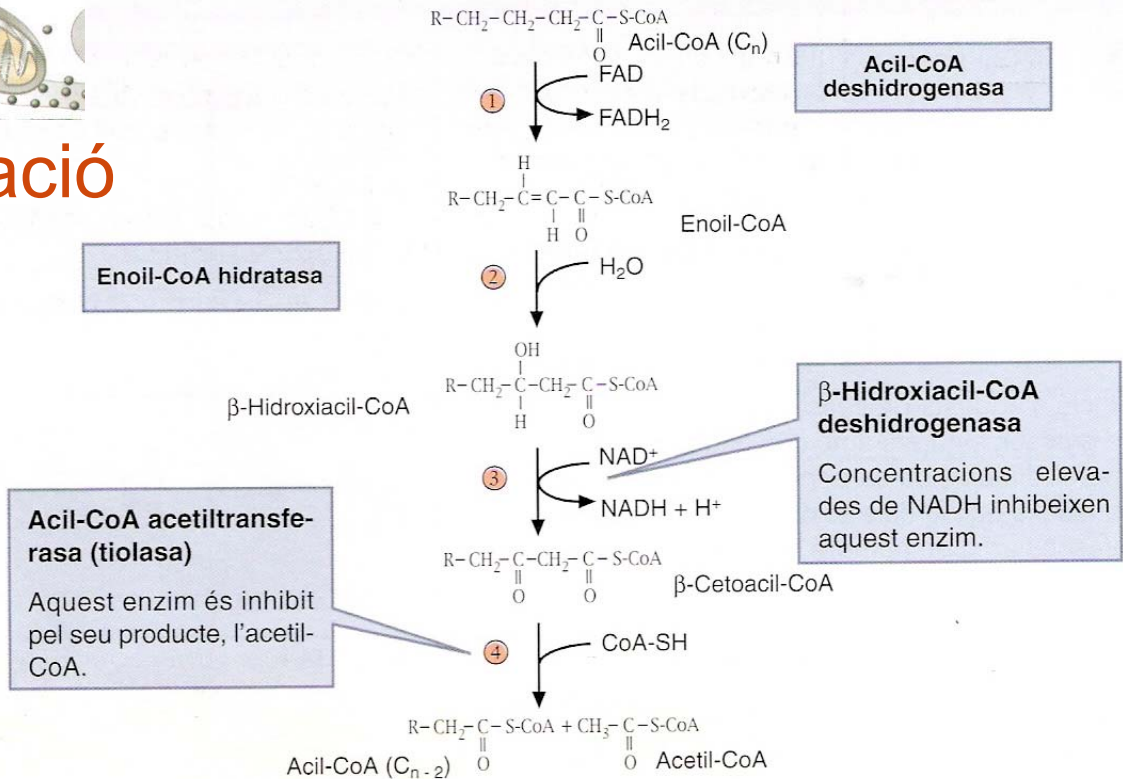
1. El grup carboxil de cada àcid gras i el grup tiol (HS) d'un CoA s'uneixen mitjançant un enllaç tioèster, i originen un *acil gras-CoA*. En aquesta reacció es consumeixen dos equivalents de l'ATP.
2. L'*acil gras-CoA* o *acil-CoA* travessa la membrana mitocondrial externa i s'uneix transitòriament a la carnitina, la qual cosa produeix un compost anomenat *acil-carnitina*.
3. L'*acil-carnitina* travessa la membrana mitocondrial interna mitjançant un transportador de membrana que rep el nom d'*acil-carnitina/carnitina*.
4. Un cop l'*acil-carnitina* és a la matriu mitocondrial, es dissocia i origina l'*acil-CoA* i la *carnitina*, la qual torna a l'espai intermembranós mitjançant el transportador.
5. L'àcid gras que constitueix l'*acil-CoA* s'oxida en la β -oxidació.

Balanç energètic: per cada àcid gras transportat es consumeixen dos equivalents de l'ATP.





β-Oxidació



1. L'acil-CoA pateix una deshidrogenació i origina un compost anomenat *enoil-CoA* i un FADH_2 .
2. L'enoil-CoA s'hidrata i origina una forma isomèrica, el *β-hidroxiacil-CoA*.
3. El *β-hidroxiacil-CoA* pateix una deshidrogenació i, com a conseqüència, s'obté *β-cetoacil-CoA* i NADH .
4. El *β-cetoacil-CoA* reacciona amb una molècula de CoA lliure i es produeix la separació de dos àtoms de carboni en forma d'*acetil-CoA*. D'aquesta manera s'obté un nou acil-CoA amb dos carbonis menys.

Aquestes quatre reaccions es repeteixen per a cada parell d'àtoms de carboni de l'àcid gras. Les darreres quatre reaccions es produeixen sobre un acil-CoA de quatre àtoms de carboni i, com a conseqüència, s'obtenen directament dos acetil-CoA. Les molècules d'acetil-CoA s'oxiden en el cicle de l'àcid cítric i els NADH i els FADH_2 cedeixen els seus electrons a la cadena respiratòria.

Balanç energètic: el nombre de NADH i de FADH_2 obtinguts depèn del nombre d'àtoms de carboni de l'àcid gras. Per exemple, l'oxidació de l'àcid **estèàric (18:0)** genera **9 acetil-CoA**, **8 NADH** i **8 FADH_2** .



Balanç energètic de la β -Oxidació

Balanç energètic global de l'àcid esteàric

L'oxidació d'una molècula d'acetil-CoA en el cicle de l'àcid cítric origina 1 ATP, 3 NADH i 1 FADH₂. Així, doncs, l'oxidació de nou molècules d'acetil-CoA origina **9 ATP**, 27 NADH i 9 FADH₂.

Com que cada NADH origina 3 ATP \rightarrow (3 x 27 NADH procedents de l'oxidació de 9 acetil-CoA) + (3 x 8 NADH obtinguts directament de l'oxidació de l'àcid esteàric) = **105 ATP**

Com que cada FADH₂ origina 2 ATP \rightarrow (2 x 9 FADH₂ procedents de l'oxidació de 9 acetil-CoA) + (2 x 8 FADH₂ obtinguts directament de l'oxidació de l'àcid esteàric) = **34 ATP**

A partir d'una molècula d'àcid esteàric:

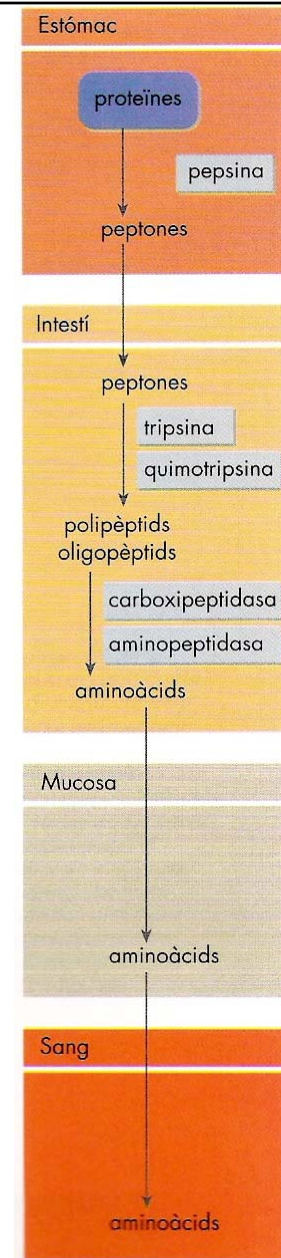
$$9 \text{ ATP} + 105 \text{ ATP} + 34 \text{ ATP} - 2 \text{ ATP consumits en el transport} = \mathbf{146 \text{ ATP}}$$

Tot i que algunes d'aquestes reaccions són diferents segons que es tracti d'**àcids grassos saturats** o bé **insaturats**, els productes finals són sempre molècules d'acetil-CoA, NADH i FADH₂.

En l'oxidació dels **àcids grassos** formats per un **nombre imparell d'àtoms de carboni** s'originen diverses molècules d'acetil-CoA i una molècula de *propionil-CoA*. El propionil-CoA, a partir de diverses reaccions, es transforma en succinil-CoA, el qual es pot incorporar al cicle de l'àcid cítric.

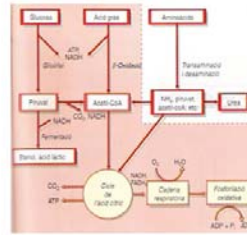
Catabolisme de proteïnes

Digestió de proteïnes





Catabolisme d'aminoàcids

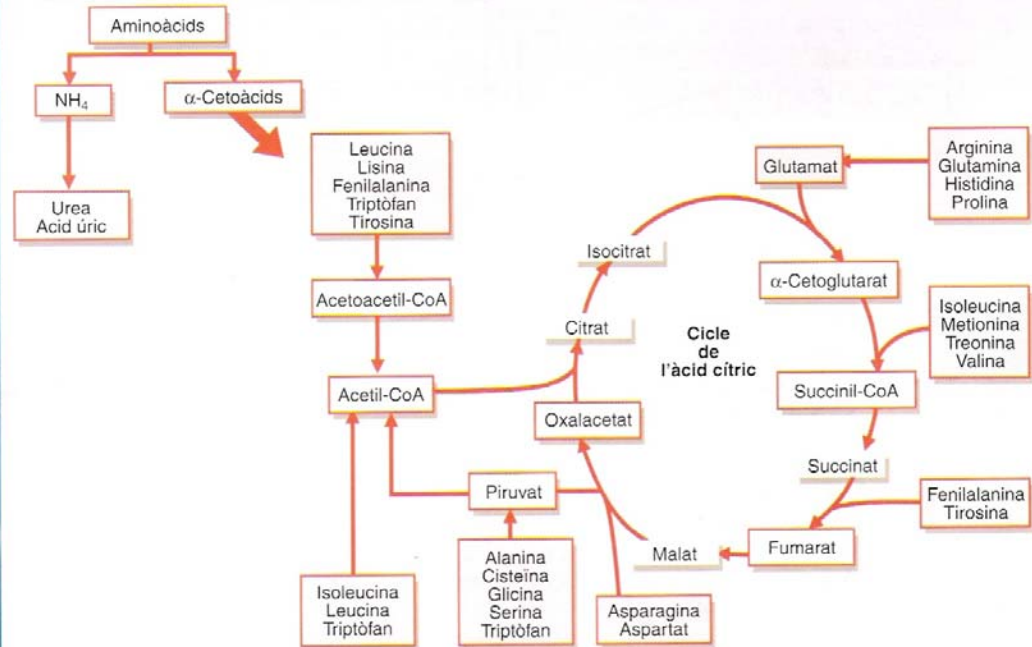


En la degradació dels aminoàcids s'esdevenen processos de **desaminació**, és a dir, la pèrdua o separació del grup amina, i processos de transferència d'aquest grup, que reben el nom de **transaminació**.

D'aquesta manera, en els vertebrats, com a resultat de la degradació dels aminoàcids, s'obtenen, d'una banda, compostos carbonats anomenats **α -cetoàcids** i, de l'altra, els **grups amina**.

Aquests processos tenen lloc en el **citosol** i en la **matriu mitocondrial**.

Transaminació i desaminació dels aminoàcids



- Generalment, l'**amoníac** es transforma en *urea* en la majoria dels vertebrats terrestres, o bé en *àcid úric*, com en el cas de les aus i els rèptils. La urea i l'àcid úric s'eliminen per diverses rutes, atesa l'elevada toxicitat de l'amoníac per als animals.

- Els **α -cetoàcids** es transformen en diversos compostos, alguns dels quals són intermedis del cicle de l'àcid cítric

El **balanç energètic** és diferent per a cadascun dels vint aminoàcids. En el cas de l'ésser humà, la degradació dels aminoàcids només proporciona entre un 10% i un 15% de la producció energètica. L'altre 85-90% el proporcionen la glicòlisi i l'oxidació dels àcids grassos.

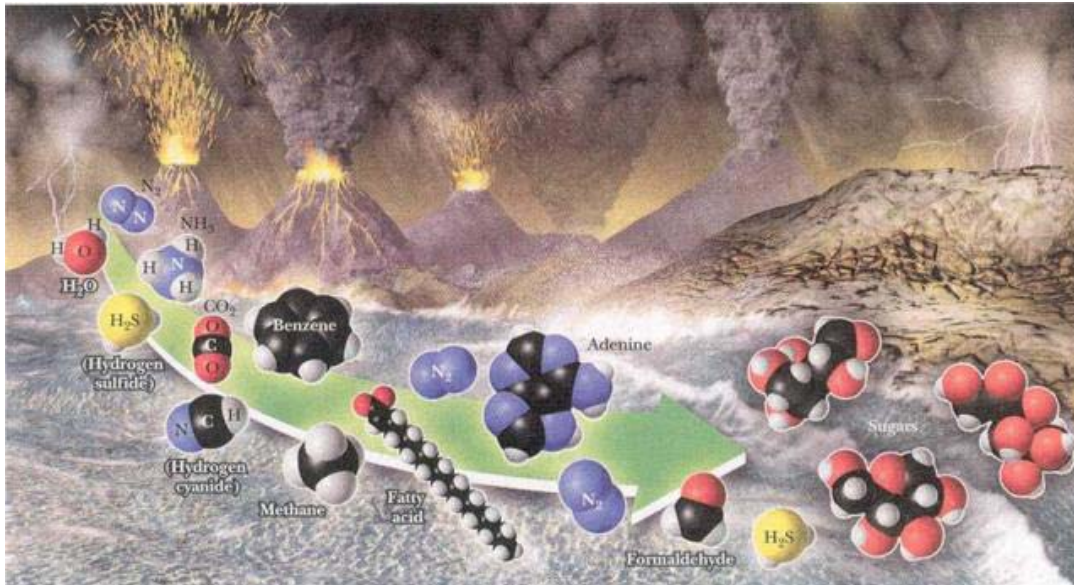
Catabolisme dels nucleòtids

Catabolisme dels nucleòtids

A partir de la degradació de nucleòtids s'obtenen *bases nitrogenades*, *pentoses* i *àcid fosfòric*. Aquests compostos s'utilitzen, generalment, per a la síntesi de nous nucleòtids mitjançant les anomenades vies de recuperació. En el cas que es produeixi la degradació de les bases nitrogenades, s'expulsen en forma d'àcid úric o d'urea, segons que es tracti de bases derivades de la purina o de la pirimidina, respectivament.

L'evolució del catabolisme

Origen de la vida: <http://www.youtube.com/watch?v=1-FbUNO2UzA>



Teoria d'Oparin

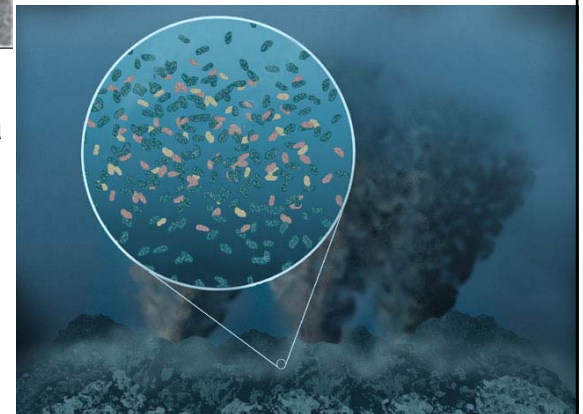


Experiment de Miller-Urey

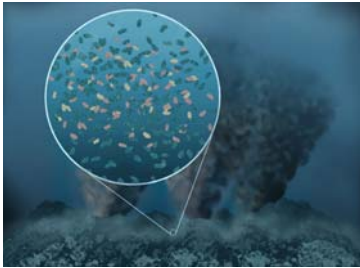
4600 Ma



3800 Ma



3800 Ma



Quimioheteròtrofs

Anaerobis

Fermentadors

2600 Ma



Fotoautòtrofs



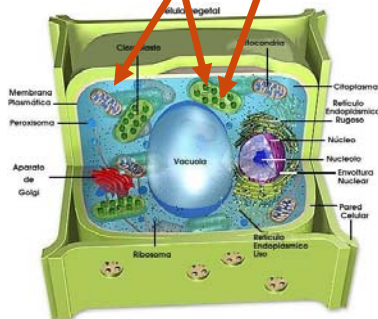
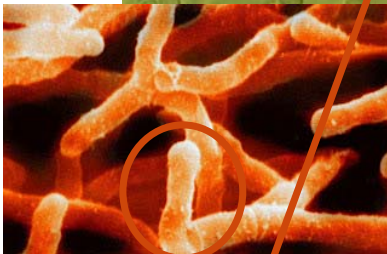
O₂



Aerobis

Cèl·lules procariotes

1600 Ma



Quimioheteròtrofs

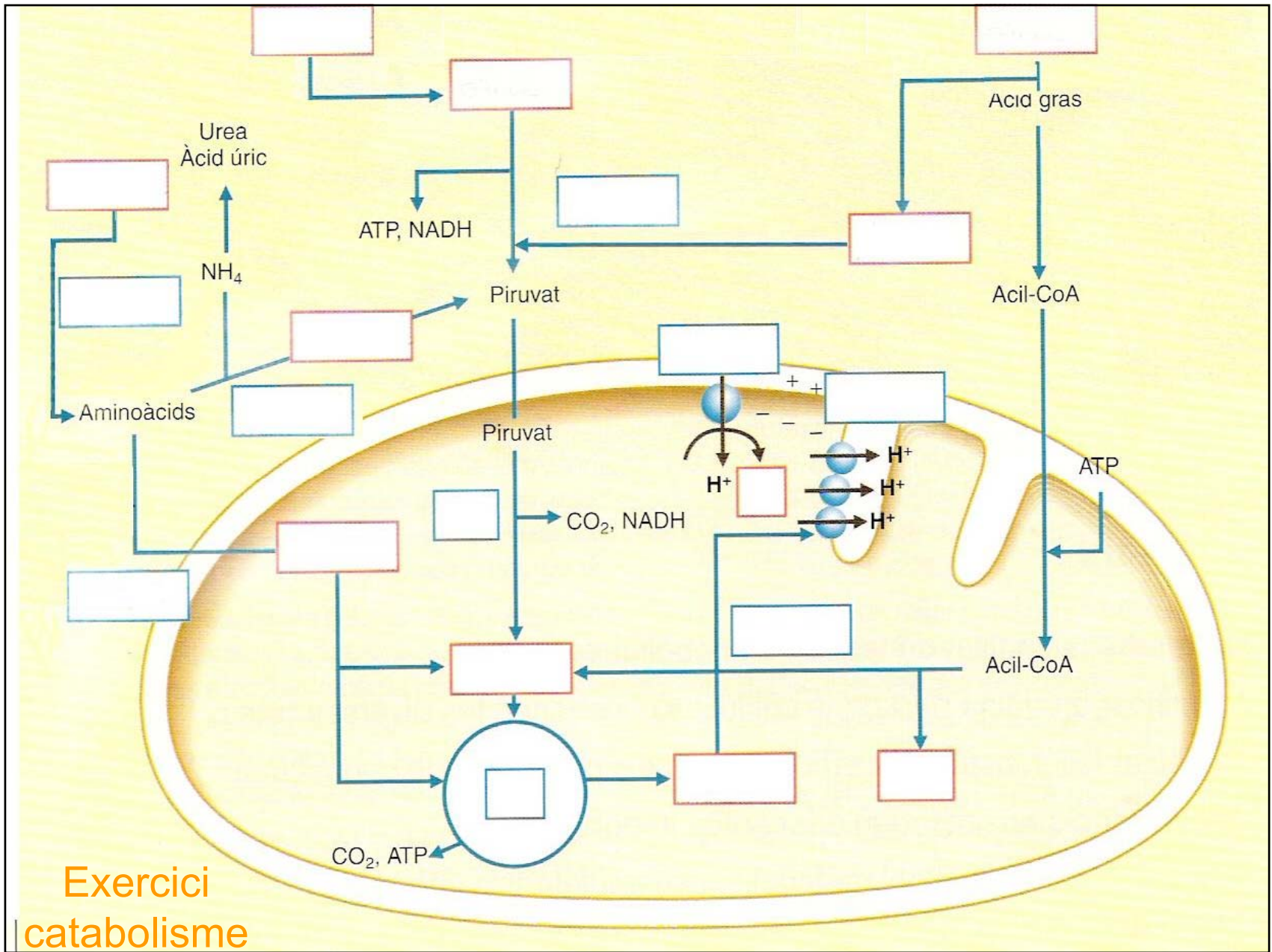
Anaerobis

Fermentadors

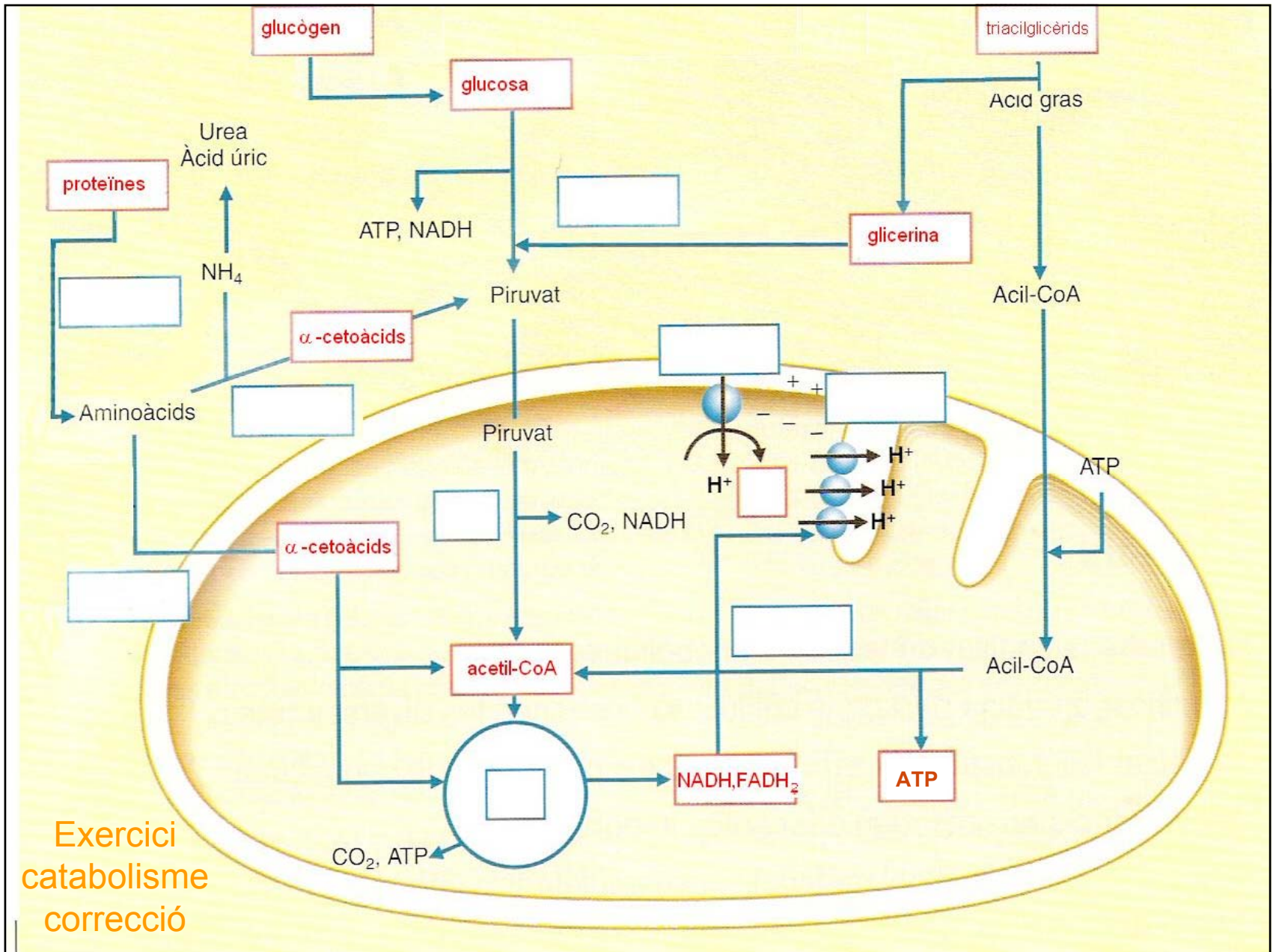
Cèl·lules eucariotes

Aerobis

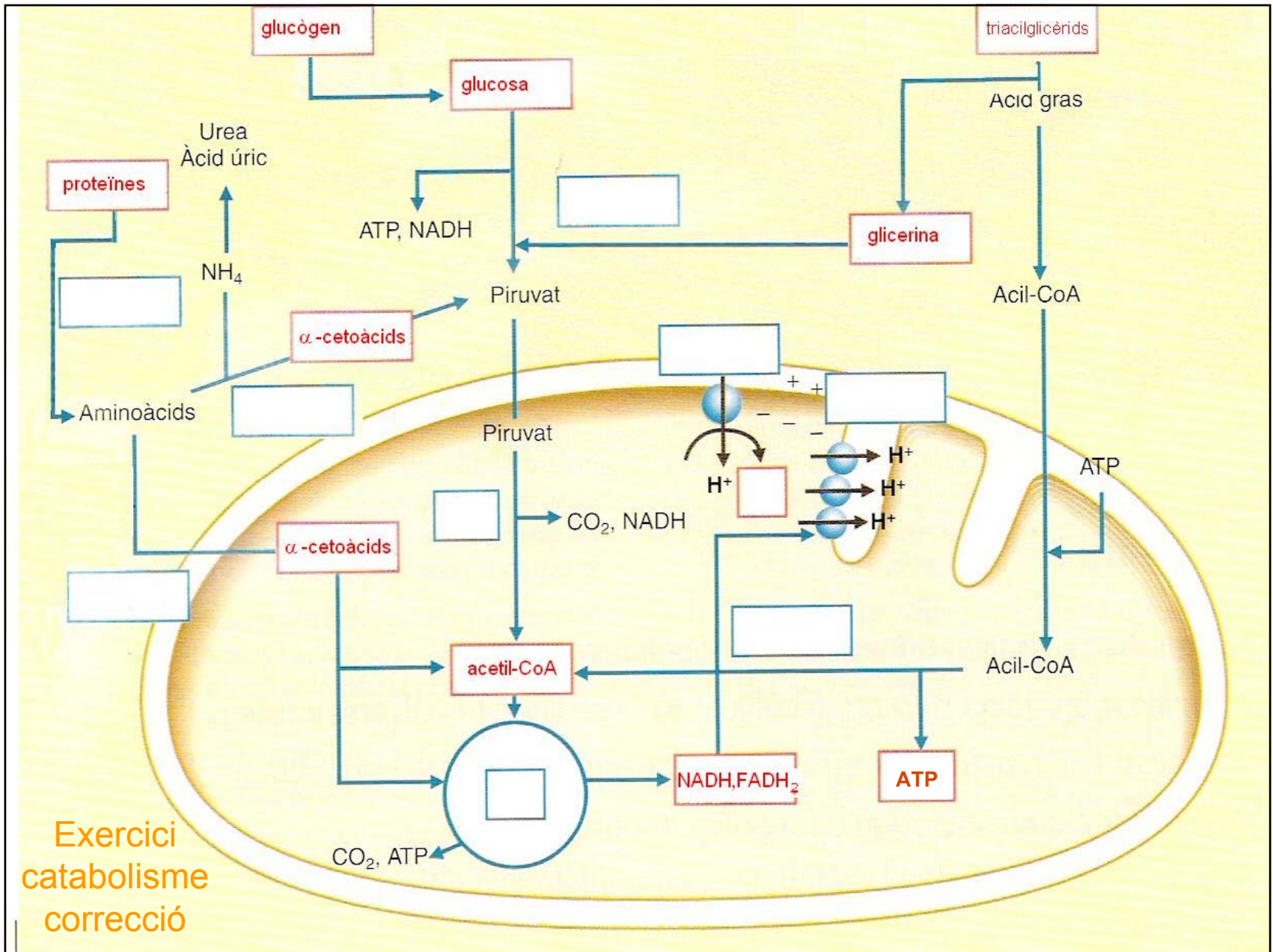
Fotoautòtrofs



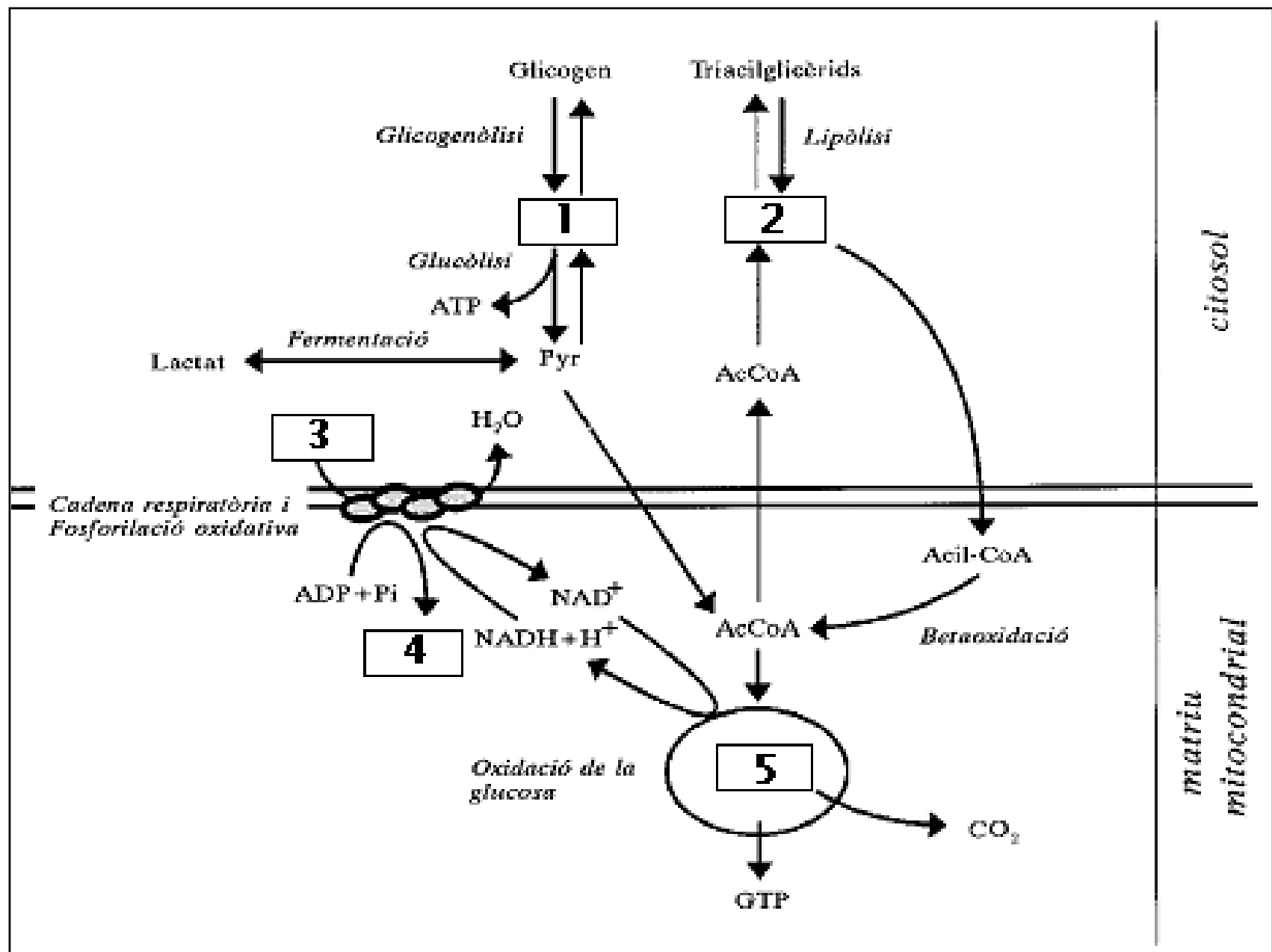
**Exercici
catabolisme**

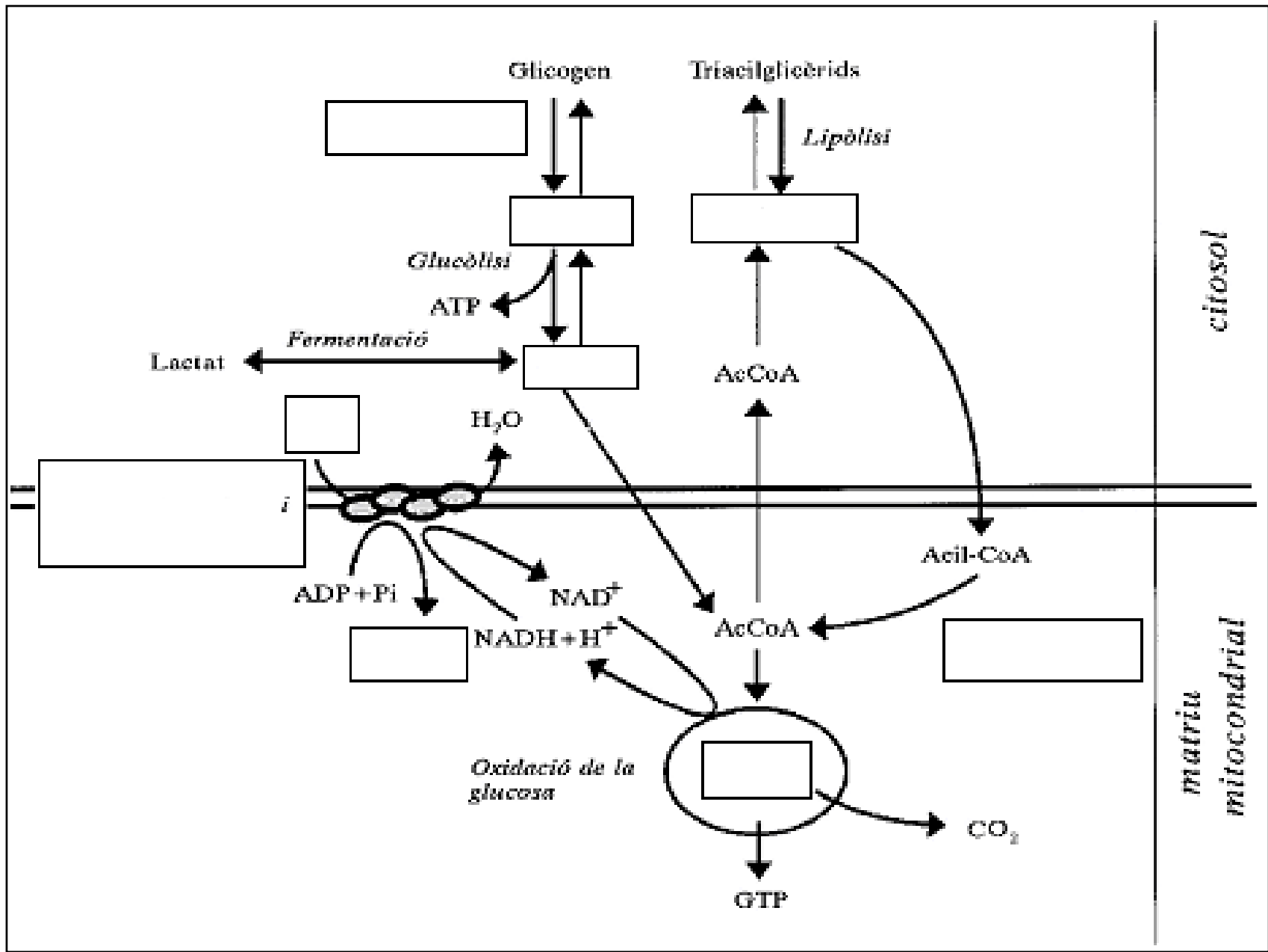


Exercici
catabolisme
correcció

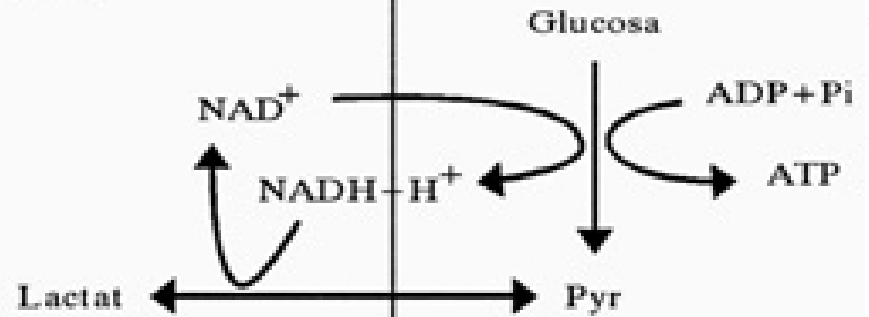


Exercici
catabolisme
correcció

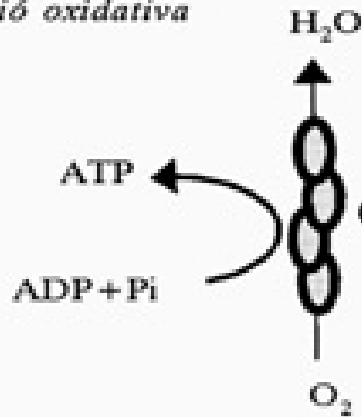




*Glucòlisi anaeròbica
Fermentació*



*Cadena respiratòria i
Fosforilació oxidativa*



AcCoA

*Cicle de
Krebs*

CO₂

*Oxidació de la glucosa
Glucòlisi aeròbica*