

Fotossíntese- Fase “independente” da luz Plantas C3, C4 e CAM

PROF. ANA PAULA JACOBUS

Sumário

Ciclo de Calvin-Reações de Assimilação de CO₂ (C₃)

- Fixação do CO₂
- Redução 3-fosfoglicerato
- Regeneração da ribulose 1,5 bisfosfato
- Regulação

Via C₄

CAM

FOTOSSÍNTESE



Energia da LUZ

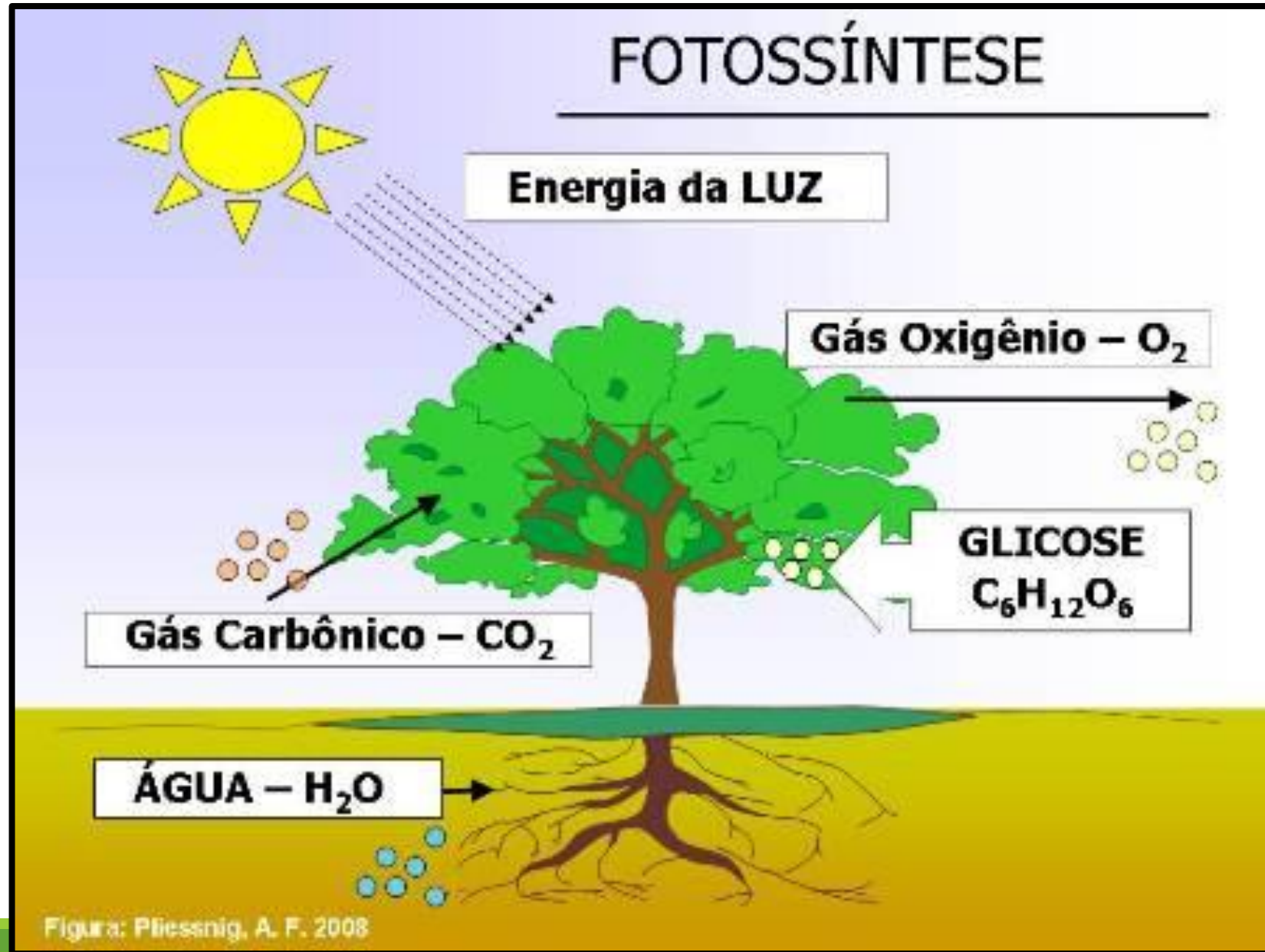
Gás Oxigênio – O_2

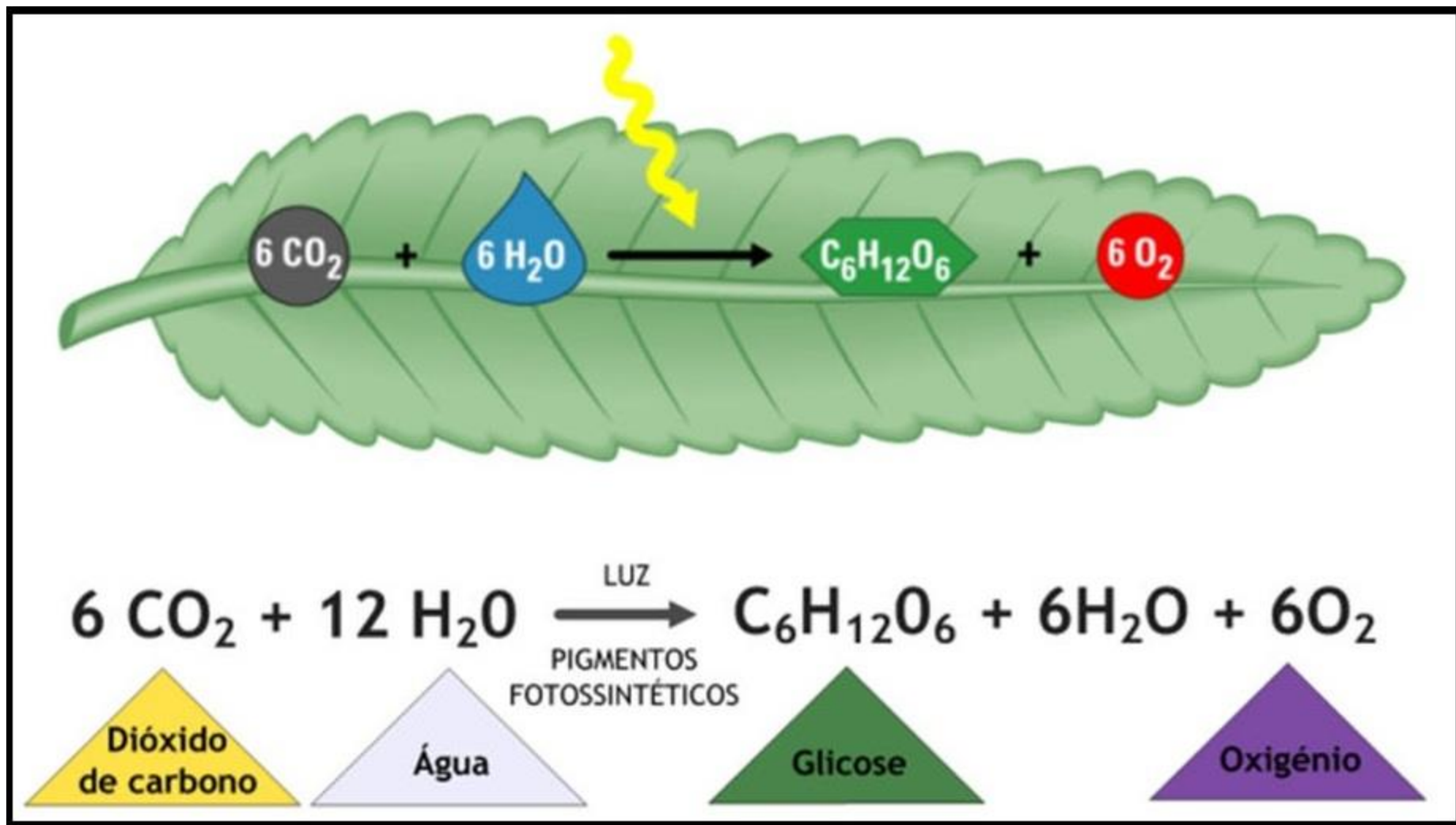
Gás Carbônico – CO_2

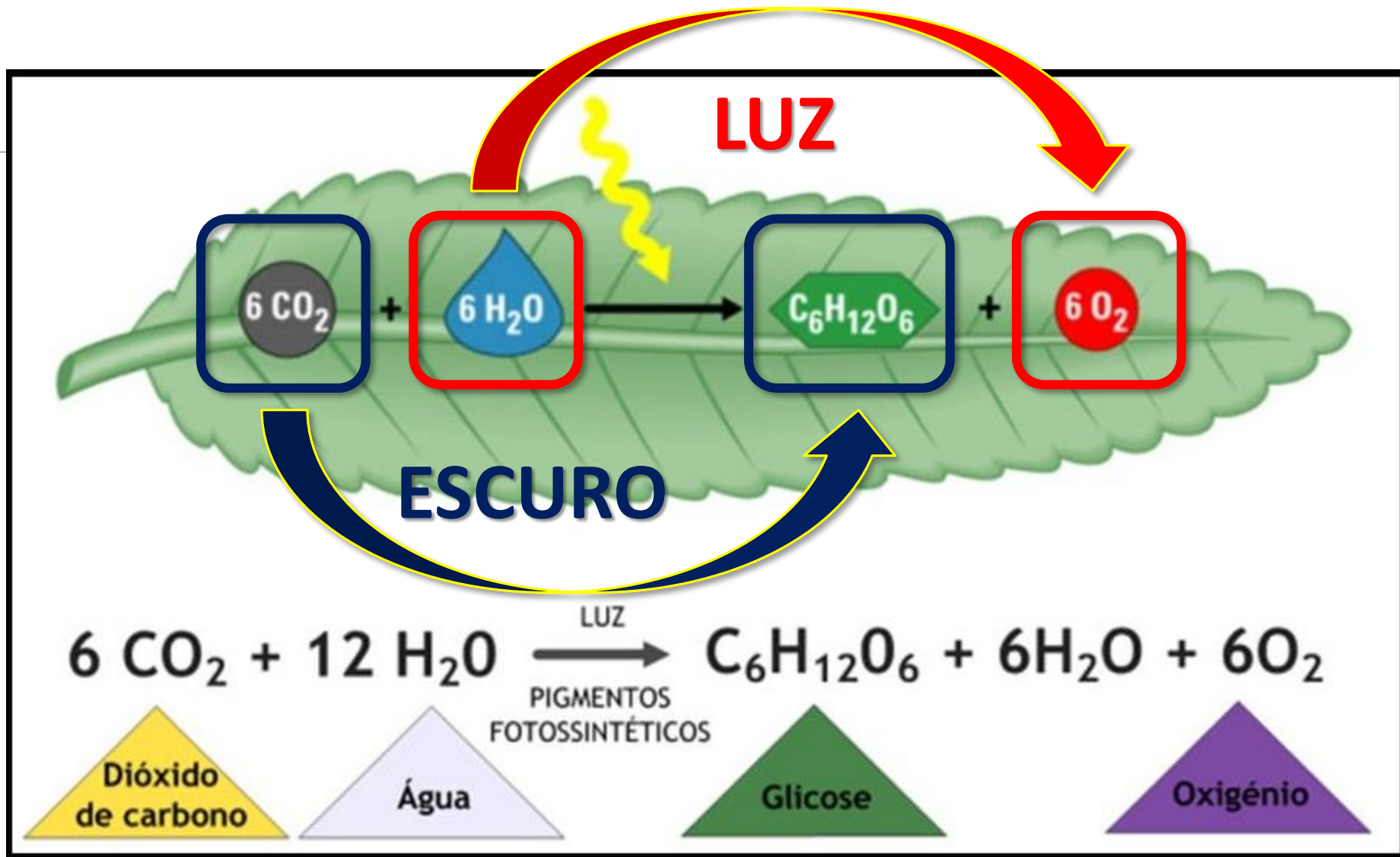
GLICOSE
 $C_6H_{12}O_6$

ÁGUA – H_2O

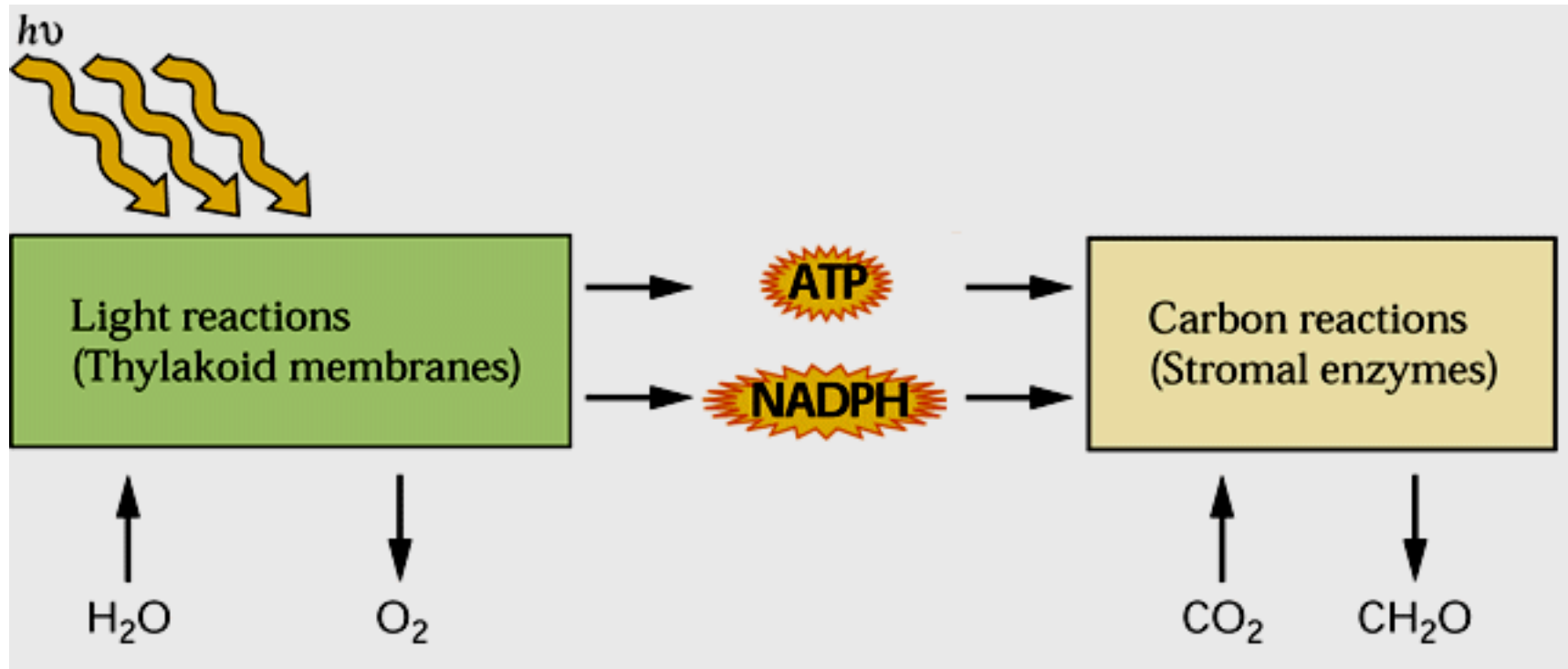
Figura: Pliessnig, A. F. 2008



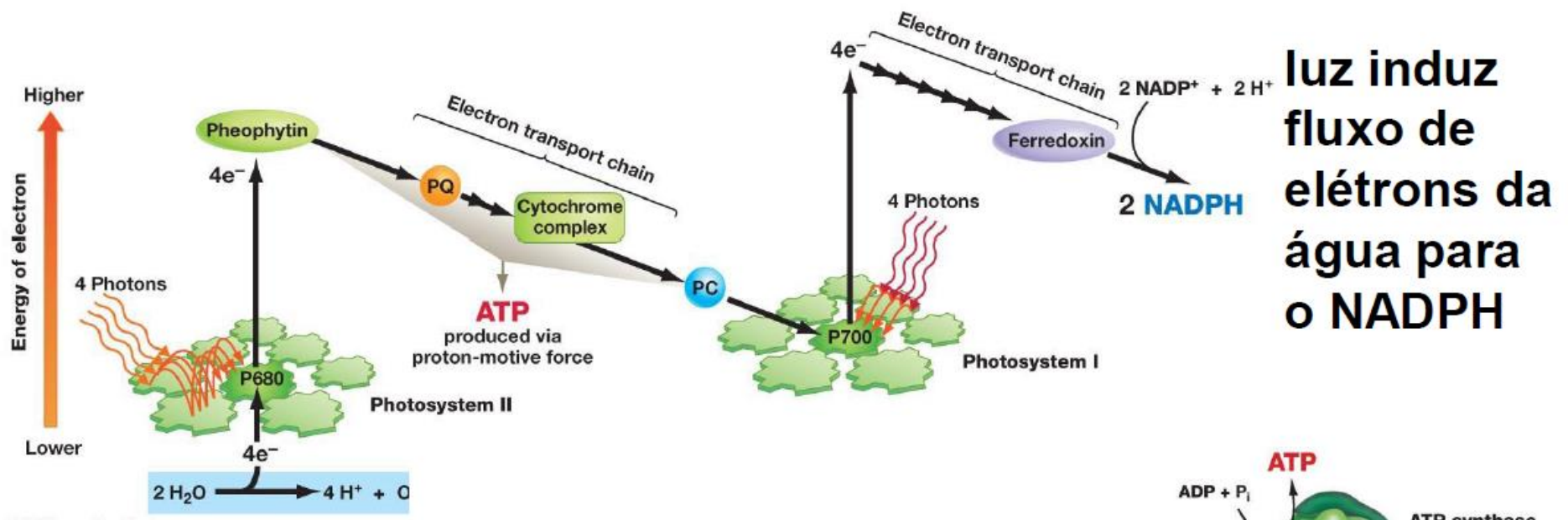




Reações luminosas e de assimilação de Carbono são duas fases da fotossíntese

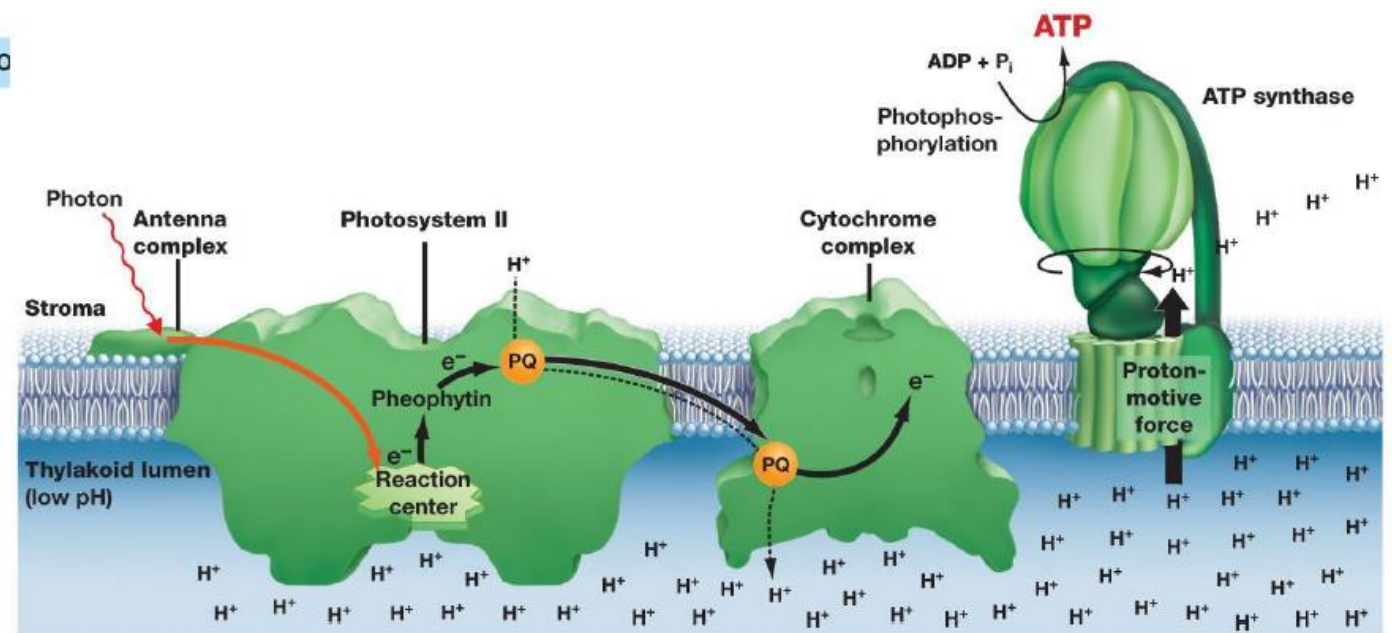


ATP e NADPH formados na fase luminosa vão ser fonte de energia para a síntese de carboidratos a partir de CO₂



luz induz fluxo de elétrons da água para o NADPH

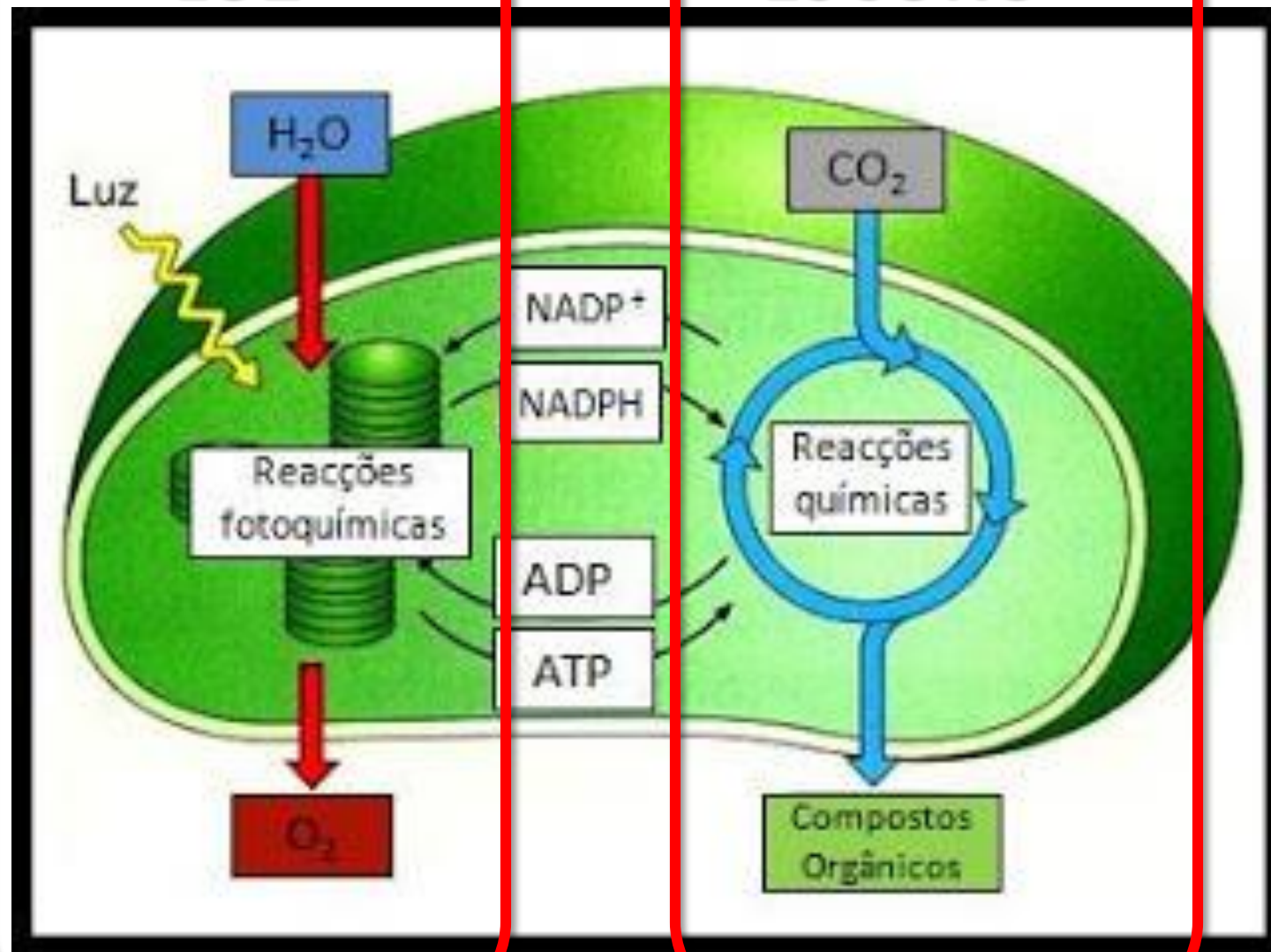
Fluxo de elétrons produz gradiente eletroquímico que implica na síntese de ATP

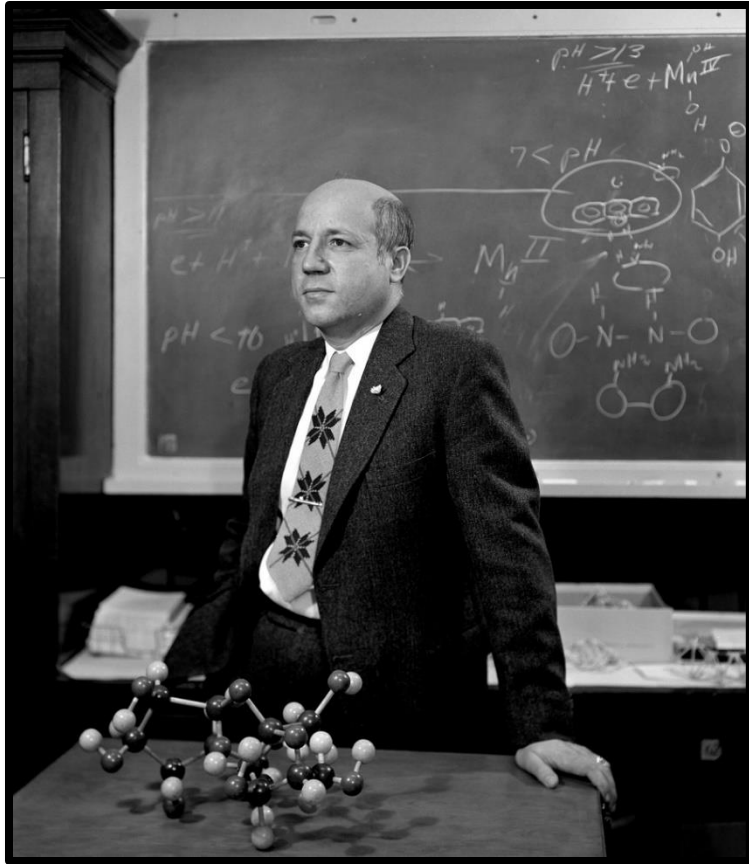


NADPH e ATP usados para síntese de carboidratos a partir de CO $_2$ e H $_2$ O

LUZ

ESCURO

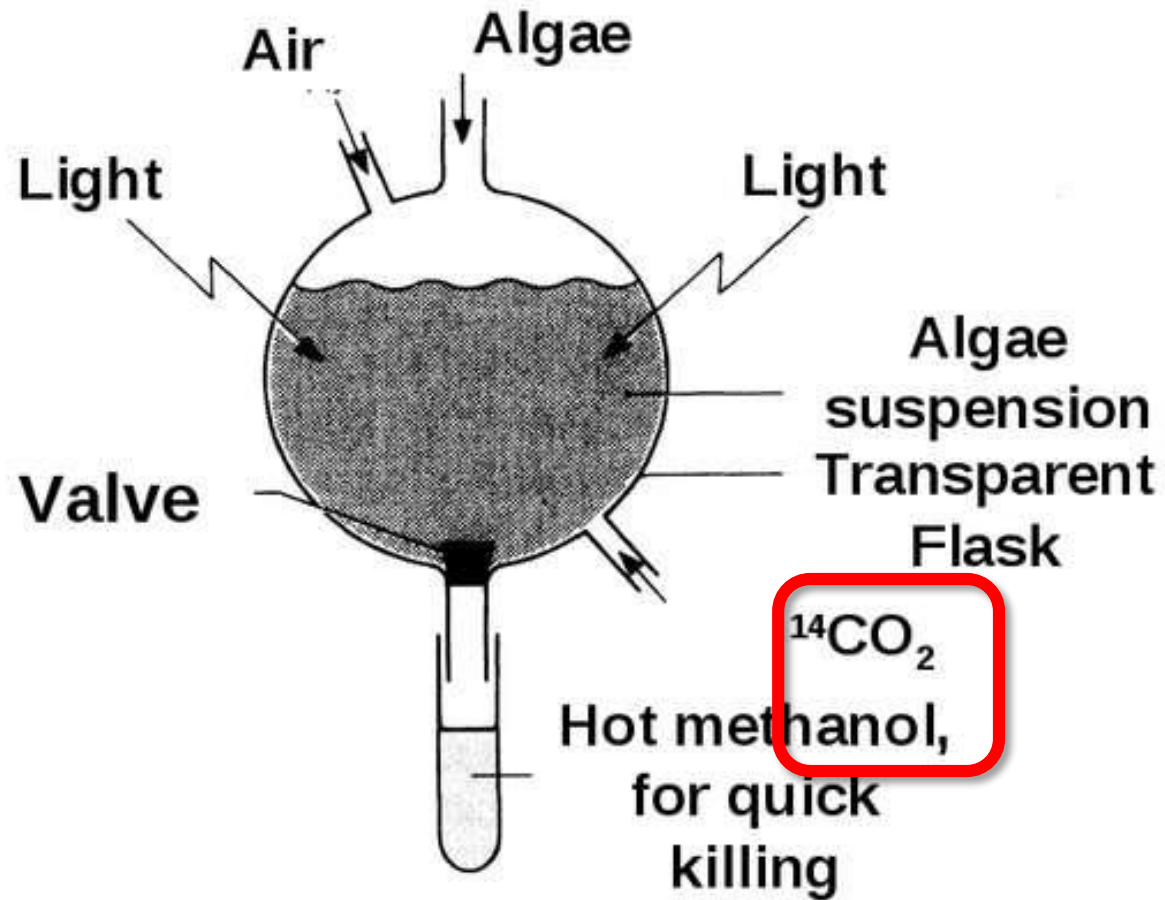


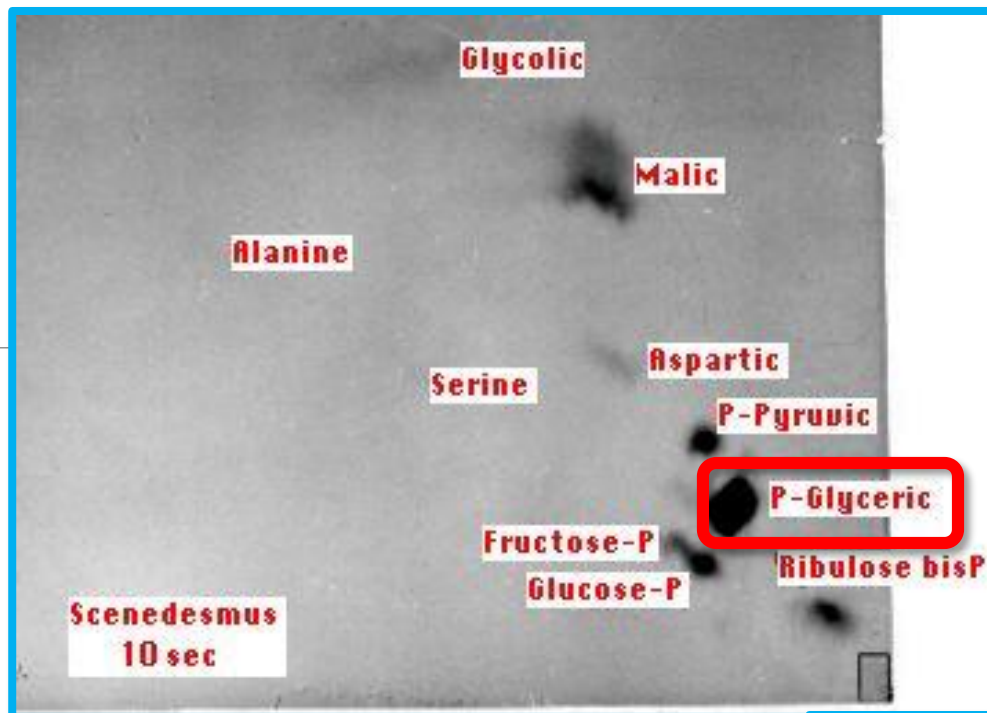


**Melvin Ellis Calvin
(1911–1997)**

***1945-57:
Elucidação da
fixação do
dióxido de
carbono (fase
escura)***

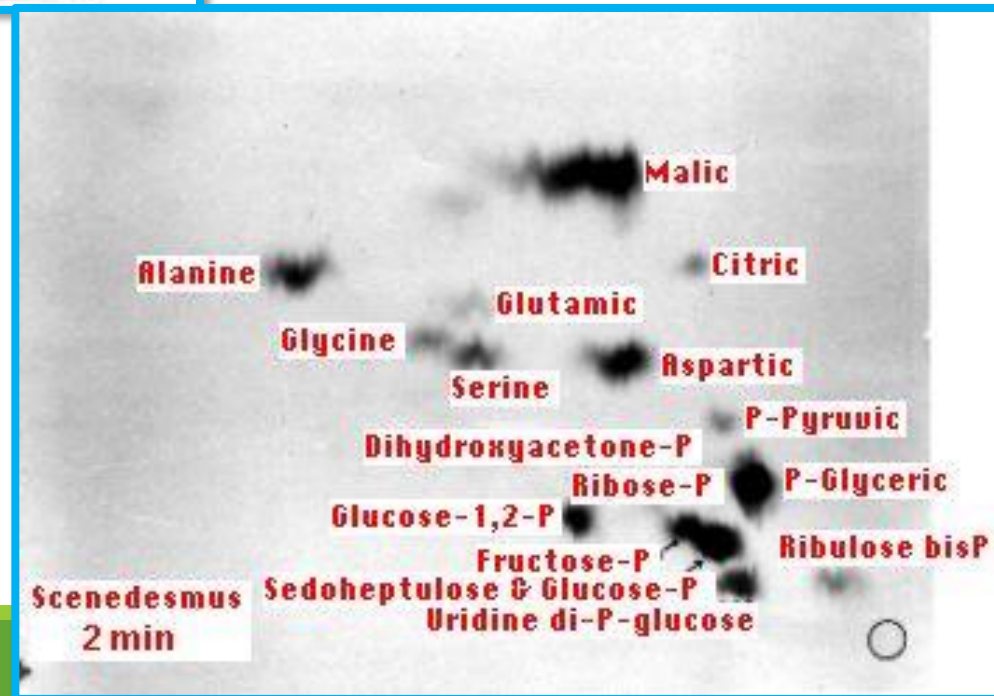
Calvin's experiment

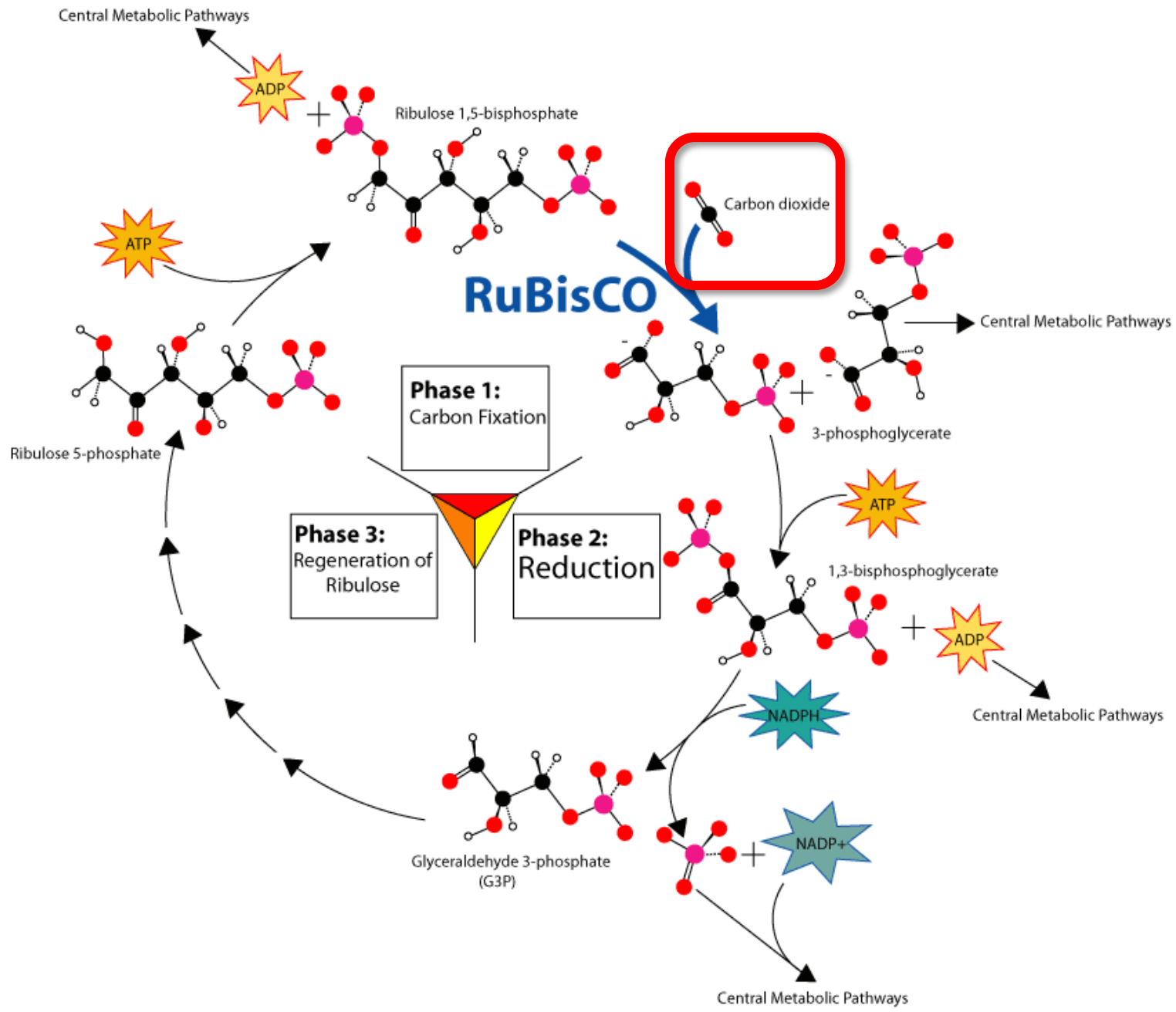




10 segundos

2 minutos





Ciclo de Calvin

- ✓ Estudos de Melvin Calvin e colaboradores – década 1950 (Nobel Química, 1961)
- ✓ Mais importante rota autotrófica de fixação de CO_2
- ✓ Também chamado de Ciclo Redutivo das Pentoses Fosfato
- ✓ Transforma o gás carbônico atmosférico em compostos orgânicos necessários para as células (carboidratos)
- ✓ Ocorre em alguns procariotos e em todos os eucariotos fotossintetizantes (algas a angiospermas)
- ✓ Originalmente foi descrito para as plantas C_3 e posteriormente outras rotas metabólicas foram descritas (auxiliares ou dependentes do Ciclo de Calvin)

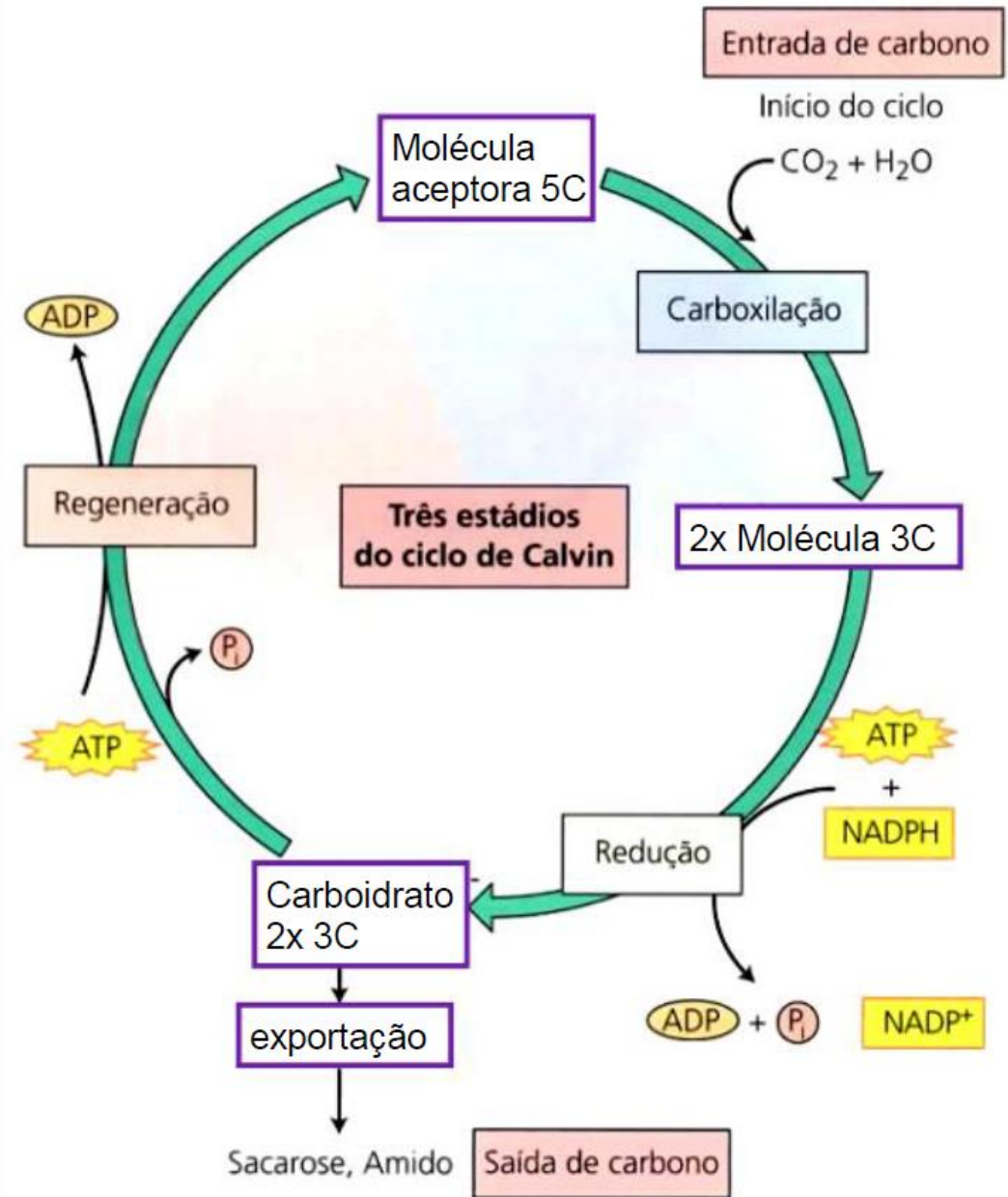
Reação de fixação do carbono (Ciclo de Calvin) – 3 etapas

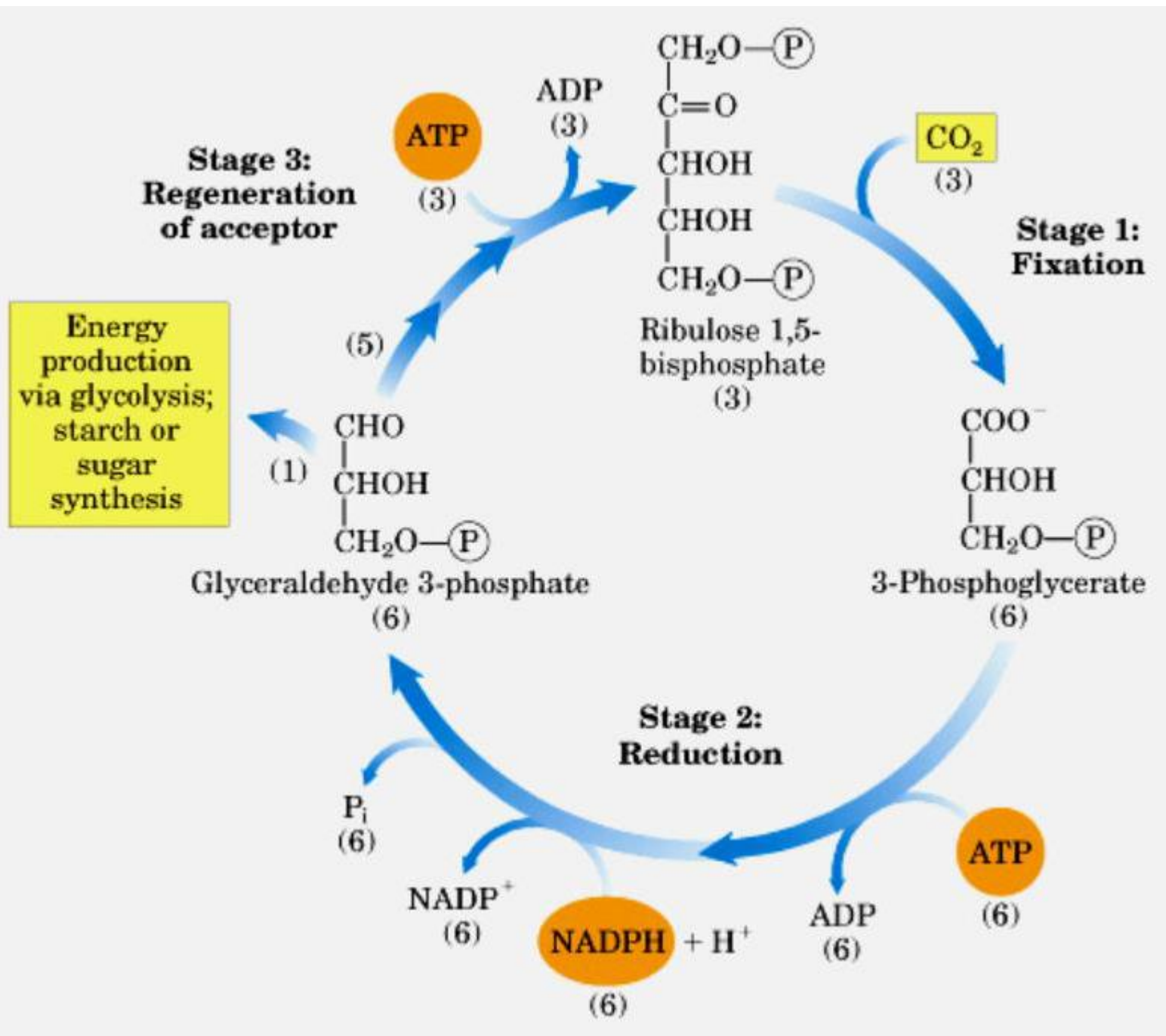
- ✓ **Carboxilação ou Fixação do carbono**
- ✓ **Redução**
- ✓ **Regeneração**

Carboxilação ou Fixação – CO_2 e H_2O são combinados com 1 molécula aceptora com 5 C originando 2 moléculas com 3C

Redução – 2 moléculas com 3C são reduzidas a carboidratos usando ATP e NADPH

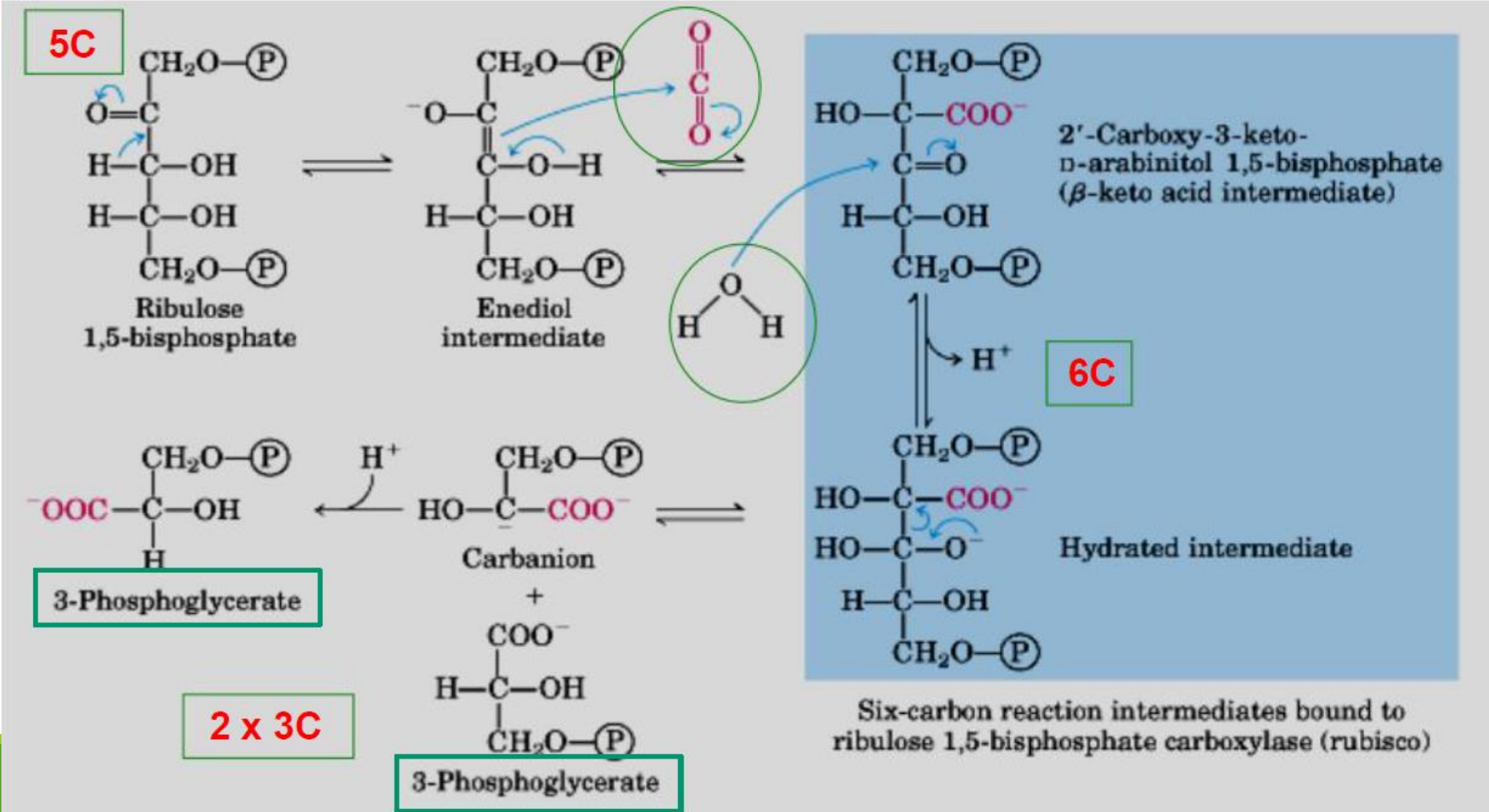
Regeneração – A molécula aceptora é regenerada e uma molécula de carboidrato é exportada





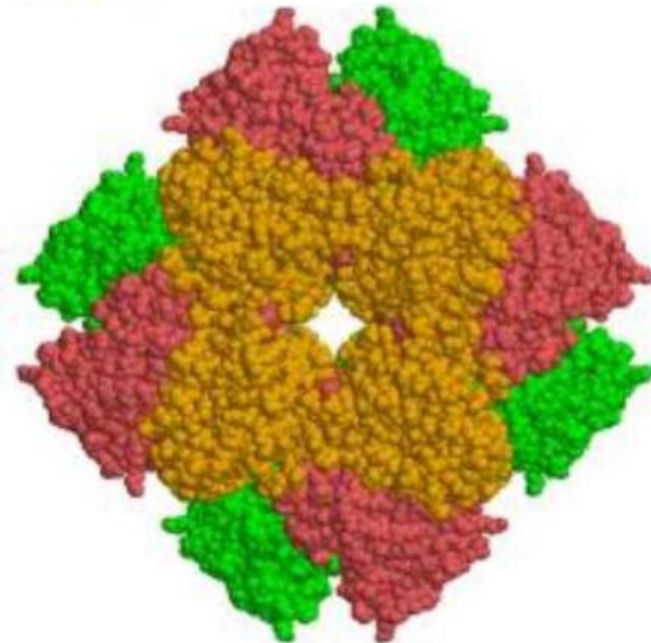
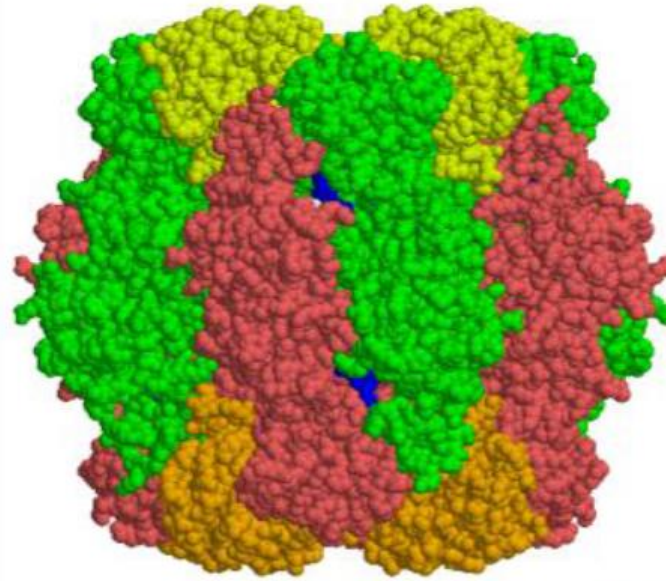
1 – Carboxilação : Incorporação de um CO₂ em uma molécula de ribulose-1,5-bifosfato (aceptor de 5C) e a hidrólise desta em duas moléculas de 3-fosfoglicerato (3C)

Reação catalisada pela enzima Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (**Rubisco**)



Enzima: Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (**Rubisco**)

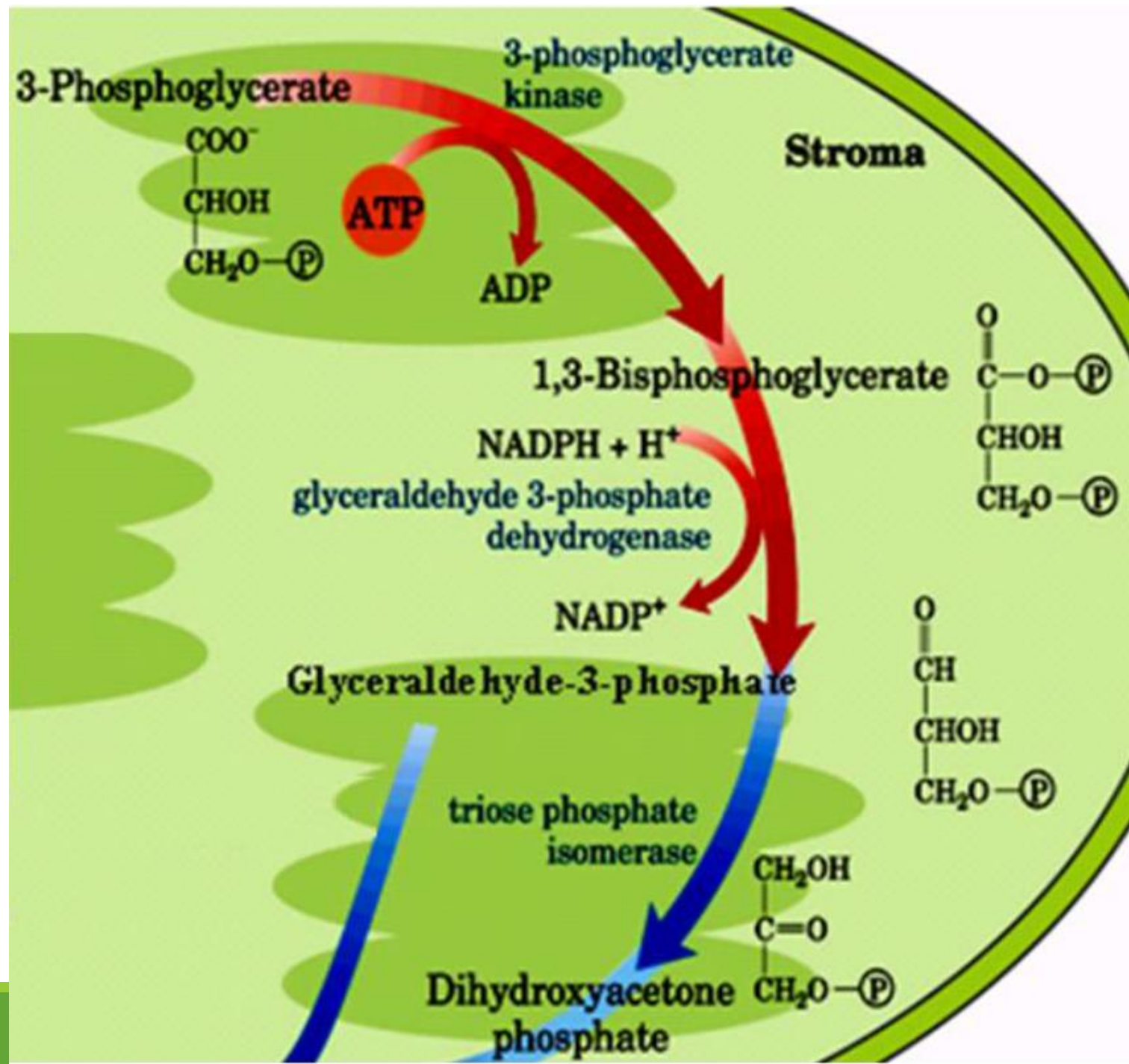
- PM 560.000Da
- 8 SU grandes (56.000Da)
- 8 SU pequenas (14.000Da)
- Estroma dos cloroplastos
- 50% total de proteínas
- Não ocorre em animais
- SU pequenas são sintetizadas nos ribossomos do citosol e entram nos cloroplastos
- SU grandes são sintetizadas nos ribossomos dos cloroplastos
- Rubisco é finalizada no estroma dos cloroplastos



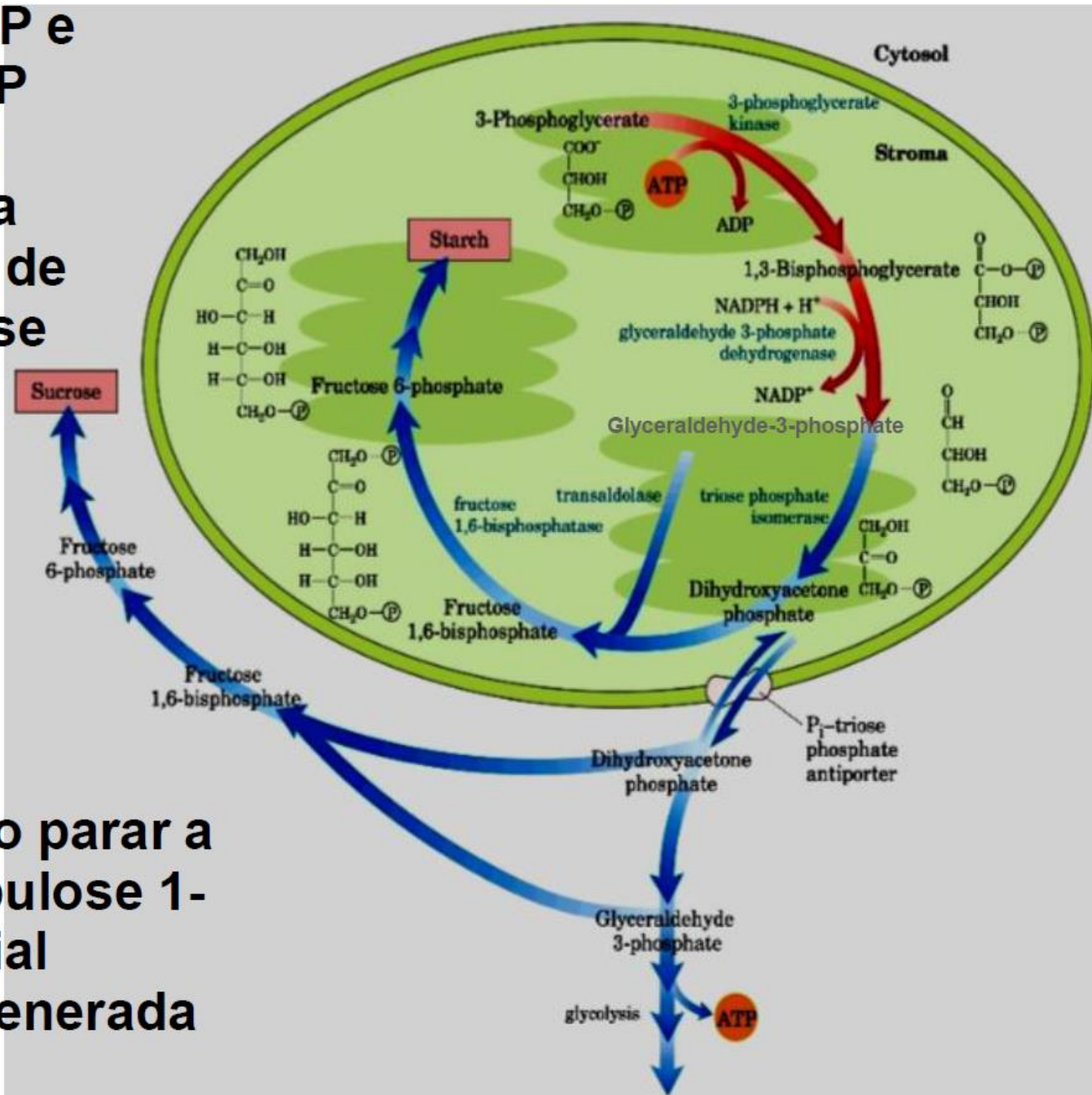
2 - Redução

Conversão do 3-fosfoglicerato em gliceraldeído-3P e diidroxicetona -P

Agente redutor é o NADPH



O gliceraldeído-3P e a diidroxicetona-P formados podem ser usados para a glicólise, síntese de amido ou sacarose



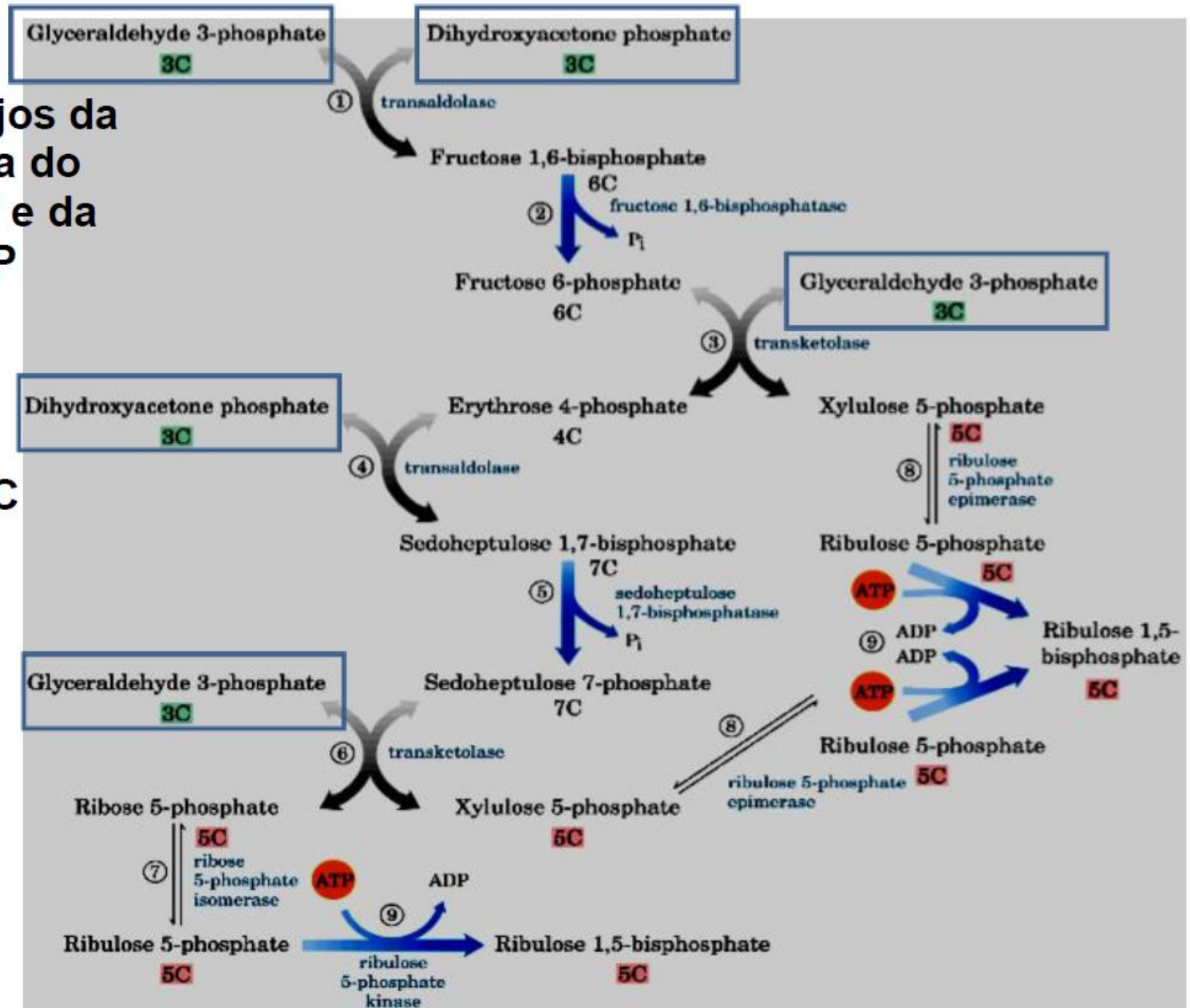
Para o ciclo não parar a molécula de ribulose 1-5 bifosfato inicial precisa ser regenerada

3 – REGENERAÇÃO DA RIBULOSE -1,5-BISFOSFATO

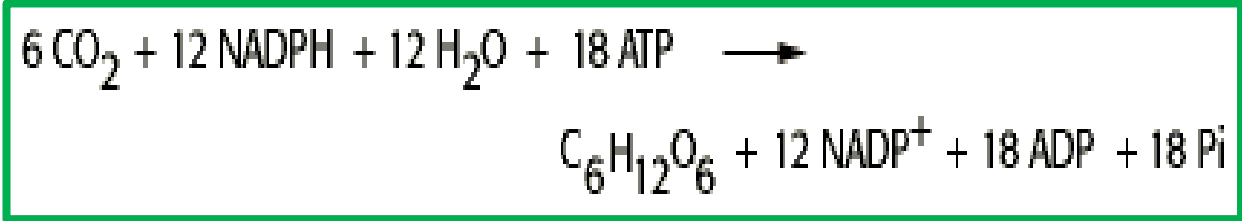
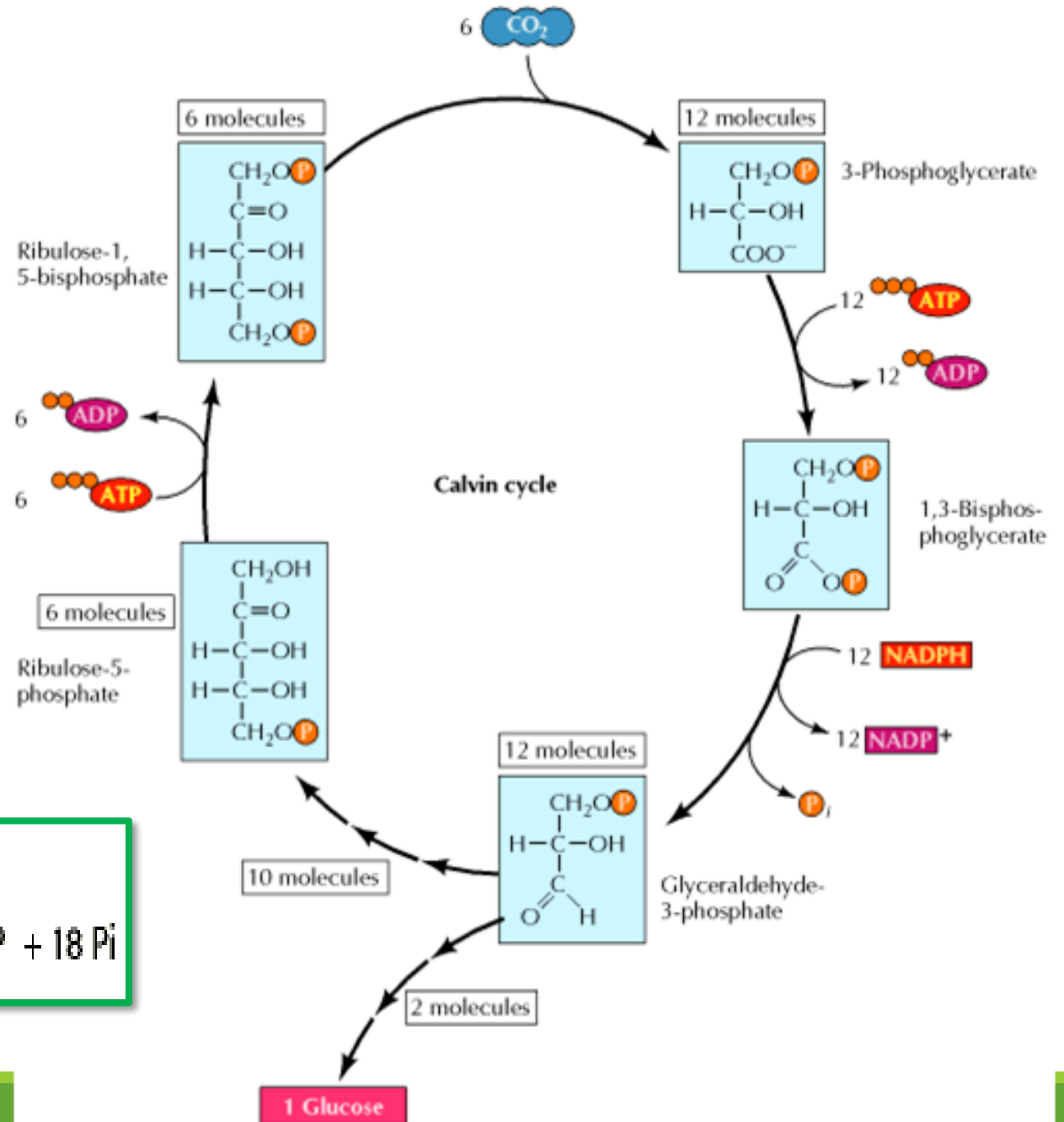
Série de rearranjos da cadeia carbônica do gliceraldeído-3P e da diidroxicetona -P

Produção de intermediários com 3,4,5,6 e 7 C

Transcetolases
Transaldolases
Epimerases
Quinases e Fosfatases



Estequiometria do Ciclo de Calvin



Regulação da Fixação de CO₂

Atividade das enzimas do ciclo de Calvin (no estroma) são coordenadas com a fotossíntese

- 3 efeitos:
 - Luz induzindo mudanças de pH
 - Luz induzindo geração de potencial redutor (reduzindo ferredoxina e NADPH)
 - Luz induzindo efluxo de Mg²⁺ da tilacóide

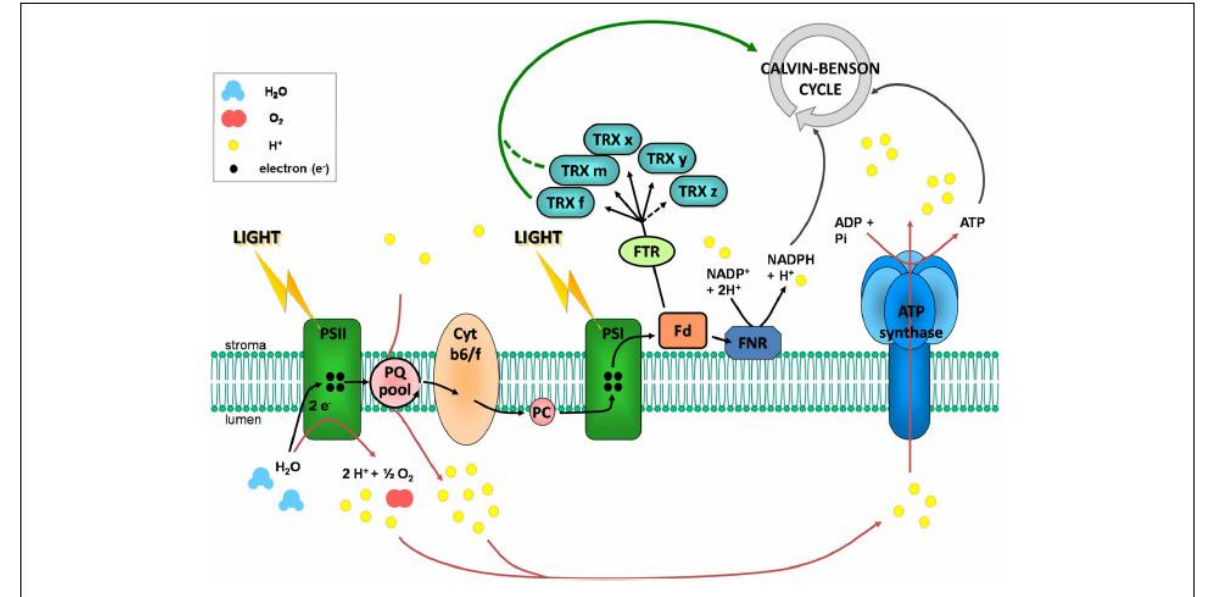
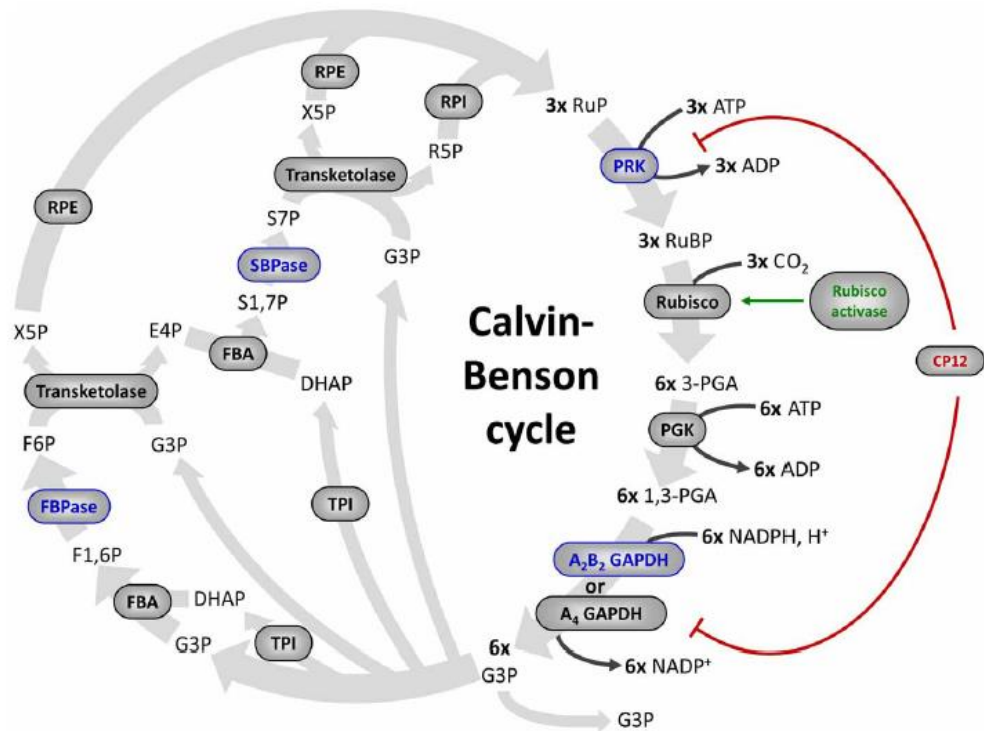


FIGURE 1 | The Calvin-Benson cycle. The eleven enzymes of the Calvin-Benson cycle are indicated in gray ellipses. Four enzymes (in blue) are activated directly by TRXs. Some proteins that control the activity of Calvin-Benson cycle enzymes are also regulated by TRXs: Rubisco activase (in green), and CP12 (in red), which forms a complex with PRK and A₄-GAPDH and inhibits both enzymes. Enzymes: Rubisco,

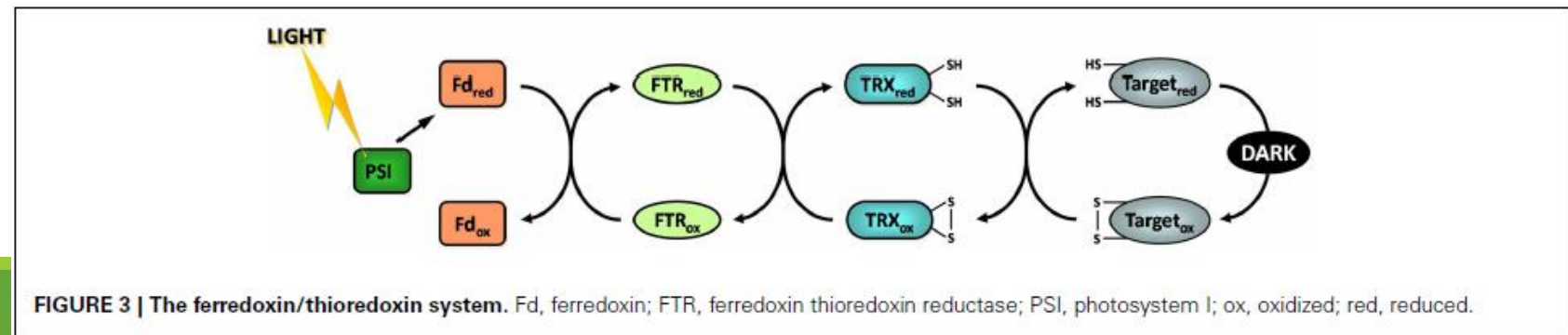
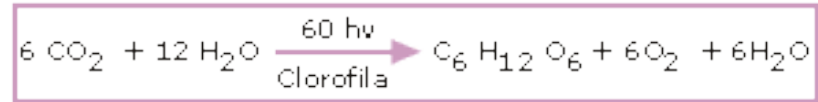
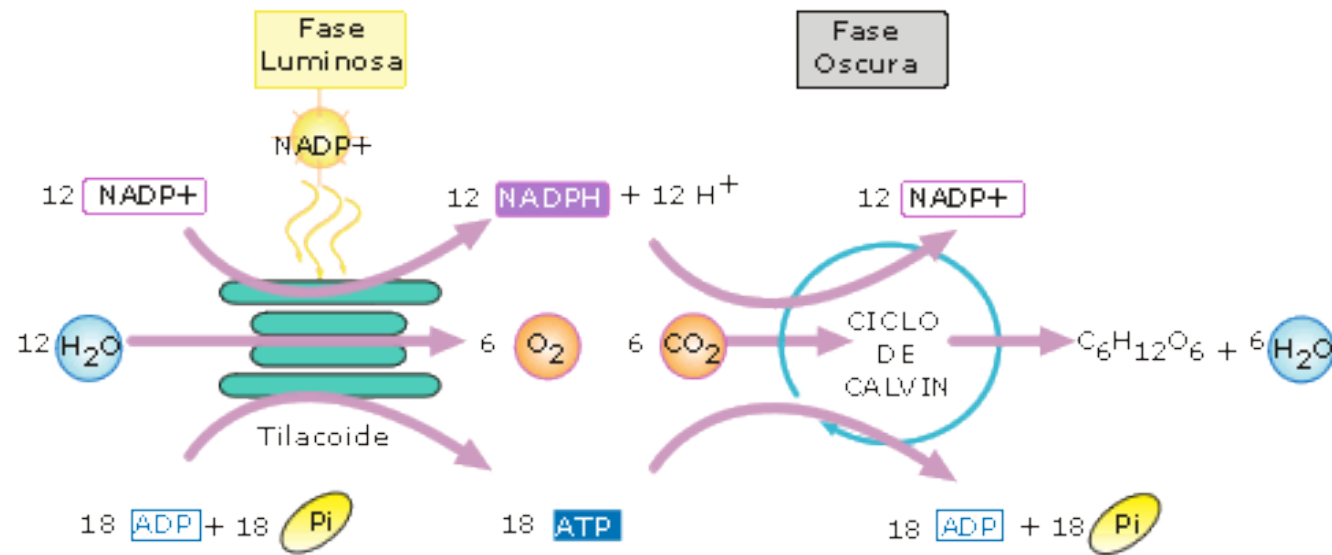


FIGURE 3 | The ferredoxin/thioredoxin system. Fd, ferredoxin; FTR, ferredoxin thioredoxin reductase; PSI, photosystem I; ox, oxidized; red, reduced.

Fixação do dióxido de carbono no escuro (Ciclo de Calvin-Benson)

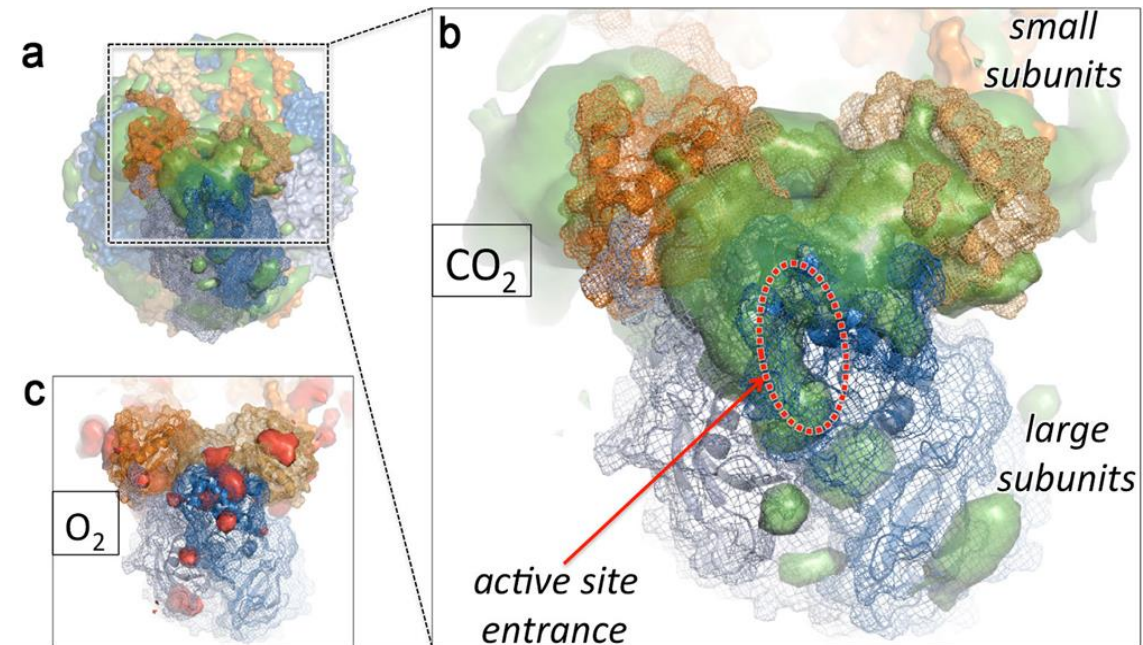
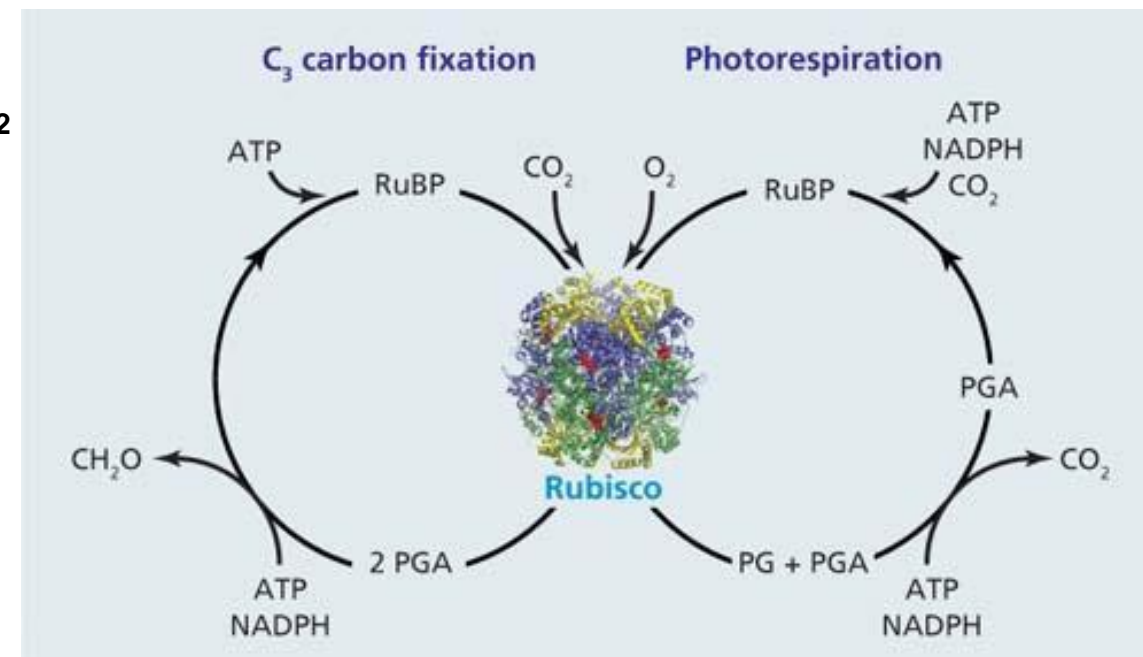


Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco)

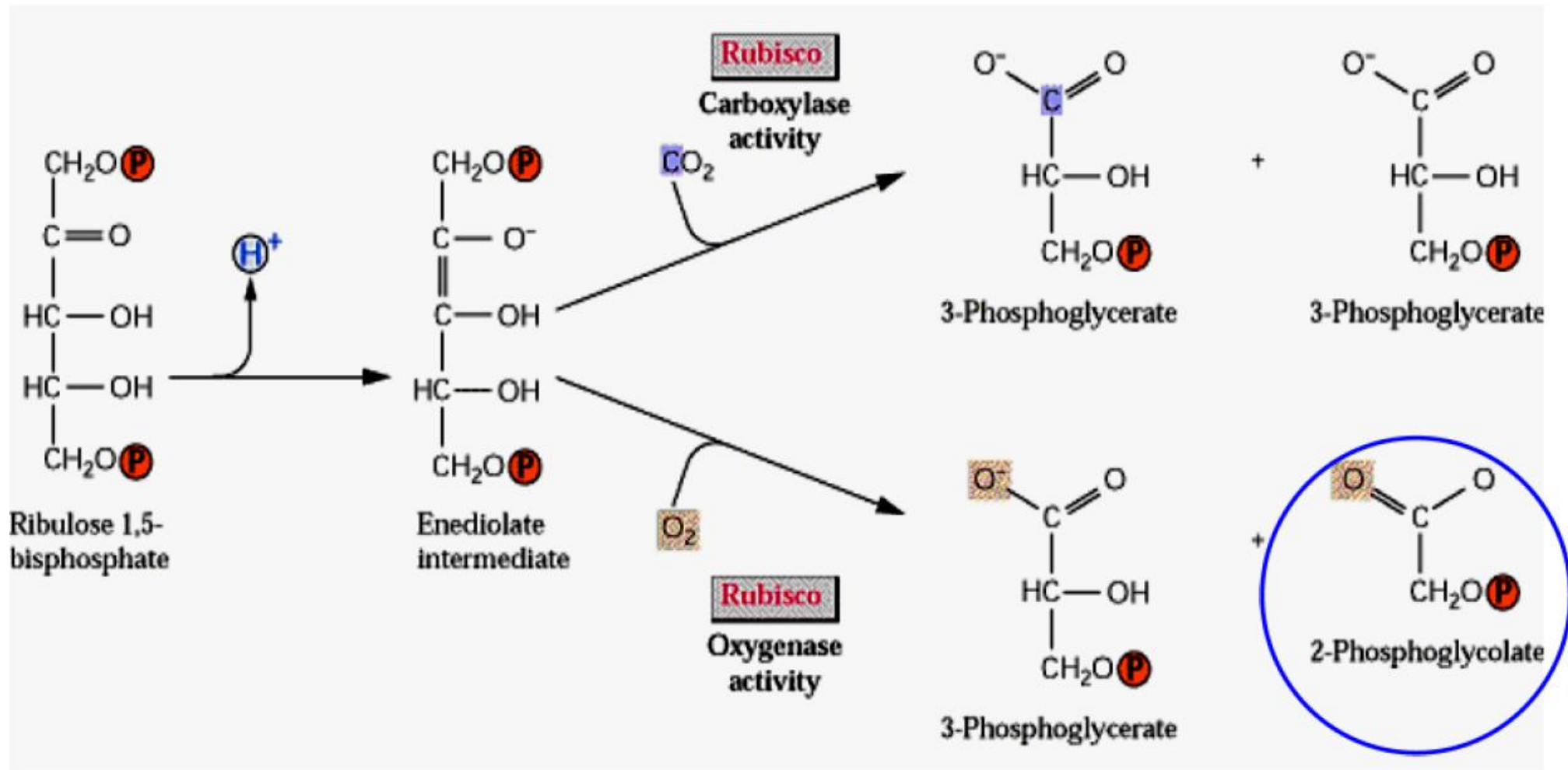
Especificidade para o CO_2 não é absoluta, pode assimilar O_2

O processo de fixação do oxigênio e liberação de Carbono
Fotorrespiração

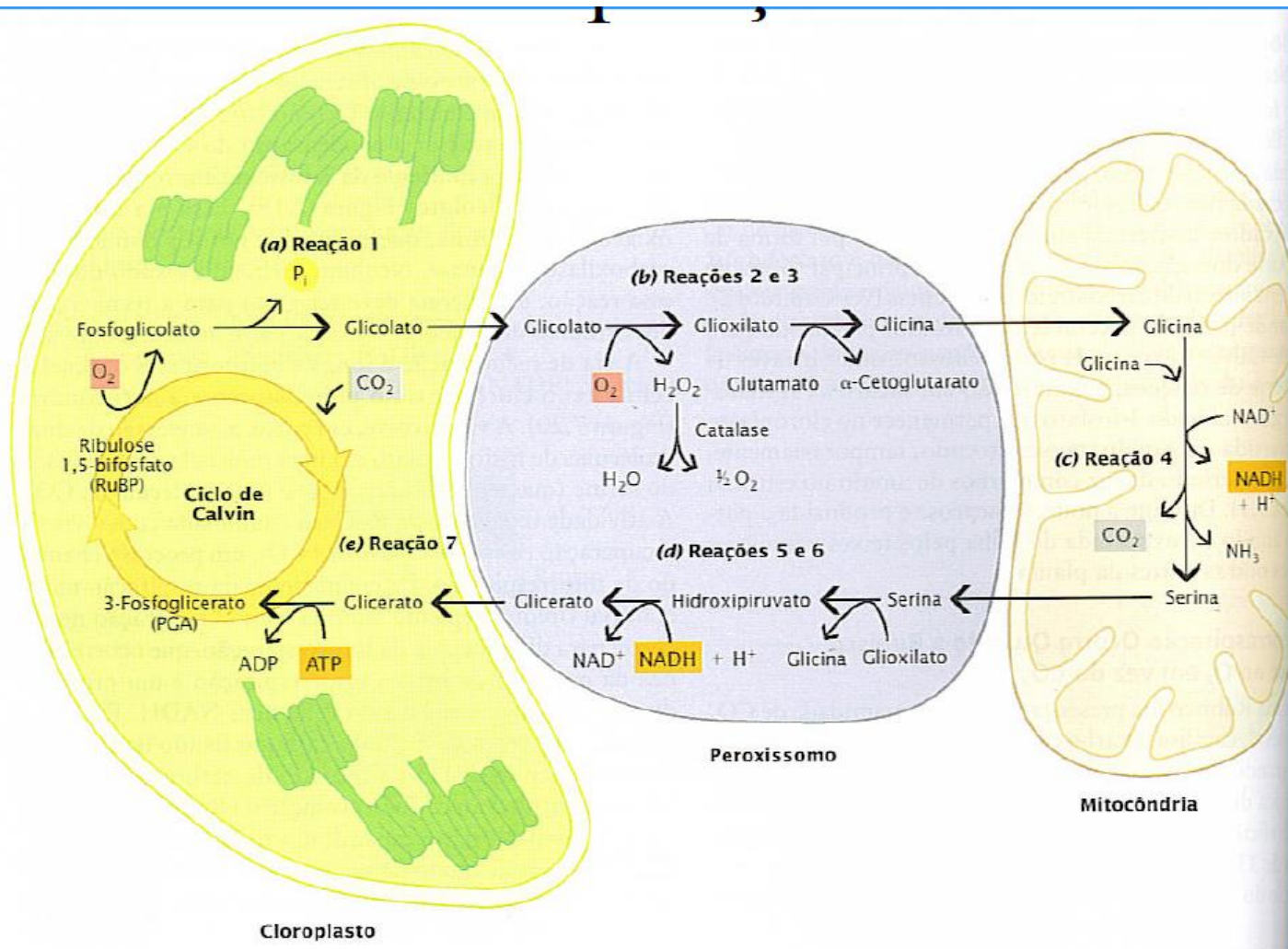
- Fotorrespiração e o ciclo de Calvin são reações competidoras
- Todas as rubiscos realizam a oxigenação da Ribulose1,5BP independente da origem taxonômica
- Reações ocorrem no mesmo sítio ativo Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase



Assimilação de O₂ pela Rubisco = Fotorrespiração



FOTORRESPIRAÇÃO e Ciclo C2



Precisa gastar ATP para recuperar esses carbonos

- Envolve 3 organelas
- Moléculas do ciclo do nitrogênio e do oxigênio

•Fosfoglicolato é metabolicamente inútil e tem 2C que não podem ser perdidos

•Esse ciclo recupera parte do C perdido do ciclo de Calvin como 2-fosfogliconato

Três fatores são importantes no balanço entre o Ciclo de Calvin e a Fotorrespiração

Rubisco

- Concentração CO_2 e O_2
- Temperatura
- K_m para o CO_2 e para o O_2

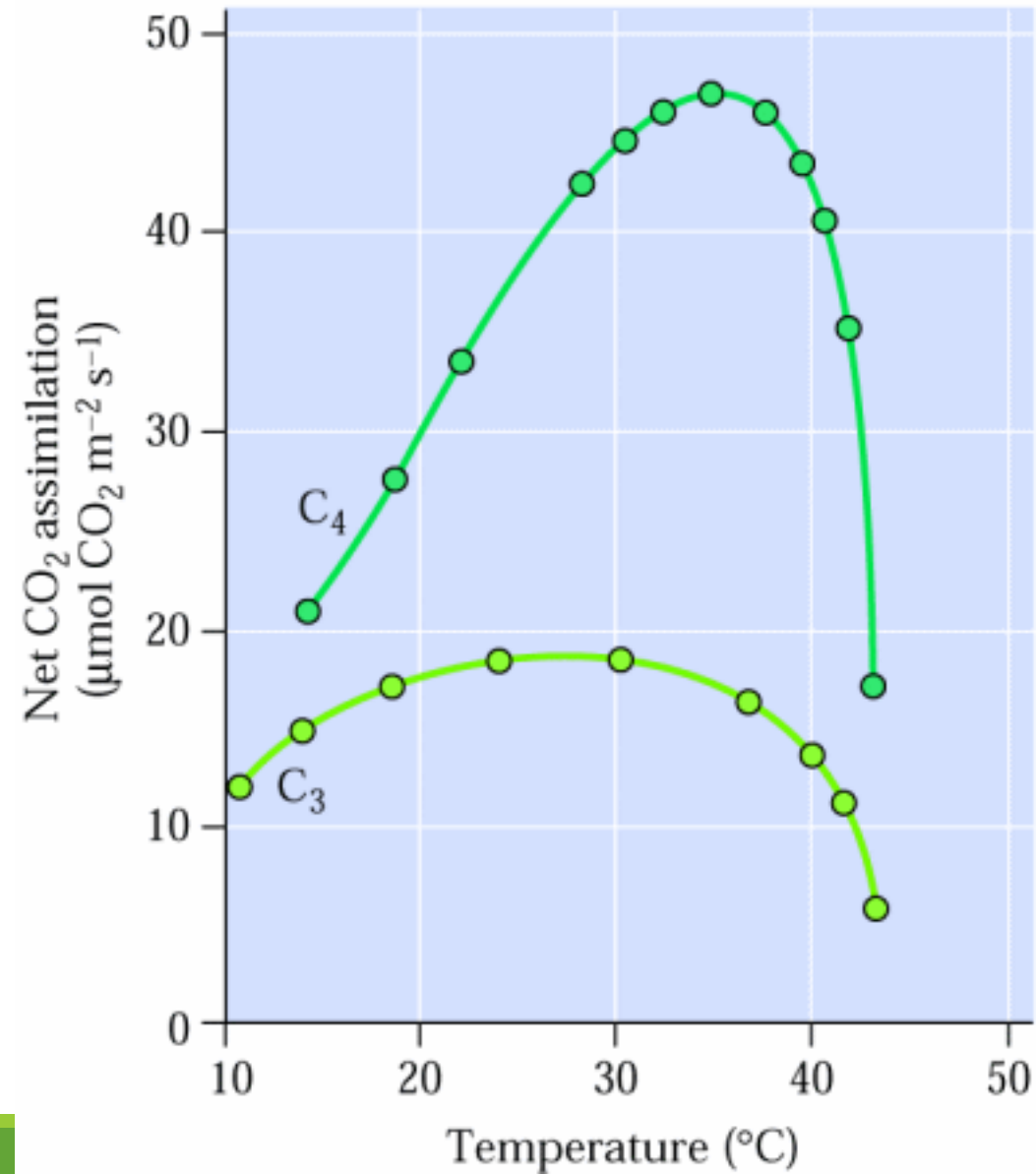
A 25°C:

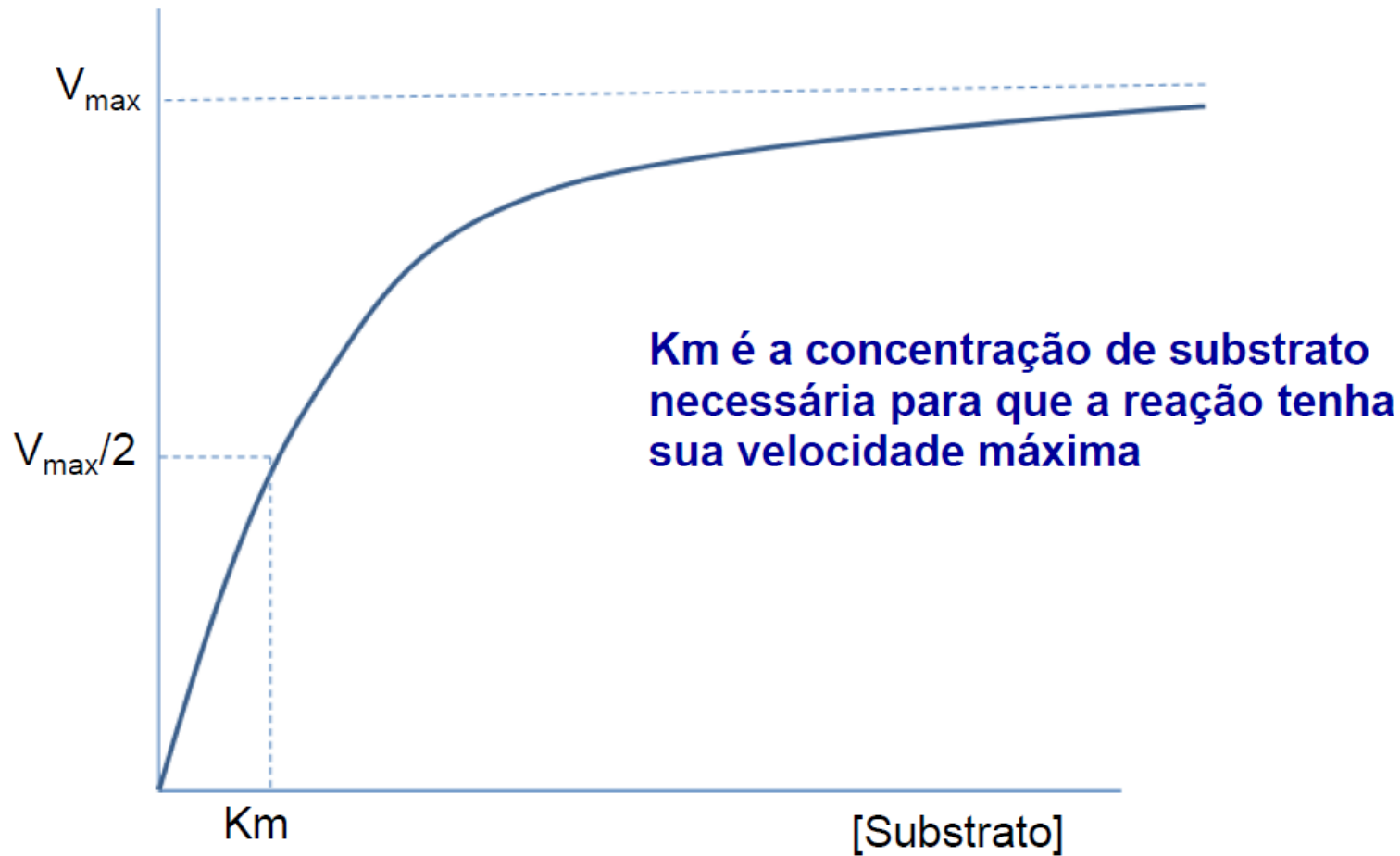
$[\text{O}_2]$ (%) \ Atividade da RUBISCO	carboxilase	oxigenase
zero	100%	0%
21 (0,035% de CO_2)	66%	34%
80-100	10%	90%

Fatores ambientais que favorecem a fotorrespiração

- Falta de água \Rightarrow fechamento dos estômatos
 - \downarrow $[\text{CO}_2]$
 - \uparrow $[\text{O}_2]$
- Alta temperatura
 - redução da solubilidade do CO_2
 - maior solubilidade do O_2
 - acima de 30°C \rightarrow \downarrow assimilação do carbono 50%

Efeito da temperatura sobre a taxa fotossintética





Rubisco

- K_m CO_2 - $9\mu M$
- K_m O_2 - $350\mu M$

Mesmo com essa diferença em termos do K_m ainda ocorre a incorporação de oxigênio pela Rubisco em determinadas condições

- ❖ Atmosfera atual proporção $\text{CO}_2/\text{O}_2 = 0,04/20$ (500 vezes mais) portanto a assimilação O_2 é favorecida
- ❖ Ao redor de folhas, durante a fotossíntese ocorre consumo de CO_2 e portanto a atmosfera fica alterada em favor do O_2
- ❖ Além disso, a afinidade rubisco ao CO_2 diminui com o aumento da temperatura

Plantas tropicais ou de regiões temperadas mas originárias dos trópicos desenvolveram mecanismos para diminuir gastos com fotorrespiração

Concentração de CO_2 no sítio de carboxilação

Classificação das plantas quanto aos mecanismos de assimilação de C

C₃ - Plantas que só executam o Ciclo de Calvin para a assimilação de C
– rubisco incorpora CO₂ em uma molécula de ribulose-1,5-bifosfato (5C)
gerando duas moléculas de 3-fosfoglicerato (3C)

C₄ - Plantas com uma prévia fixação de CO₂ em um composto com 4C
(fosfoenolpiruvato) Plantas que crescem com alta intensidade de luz e
temperatura

CAM - Plantas com uma prévia fixação de CO₂ em um composto com
4C (Malato) e utilização dele em tempo diferente Plantas que crescem
em ambientes com pouca água

Hatch & Slack (1966) :

- Estudos $^{14}\text{CO}_2$ em folhas de cana-de-açúcar:
- Malato e aspartato como 1^{os} intermediários estáveis
- Formação posterior do 3-fosfoglicerato (3PGA)

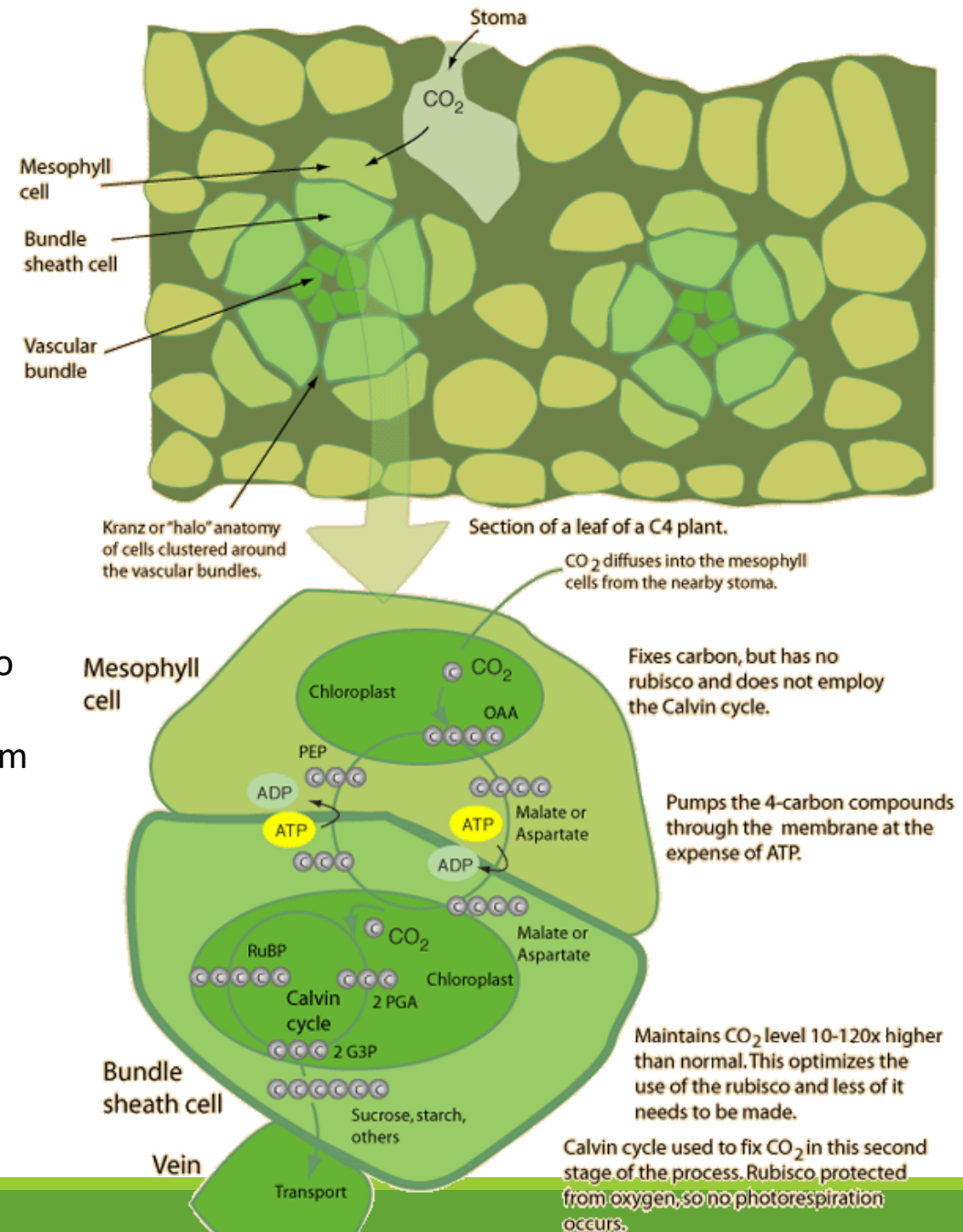
Estabelecimento da Via C_4

**Pré-fixação do CO_2 em compostos orgânicos
de 4 carbonos**

Ciclo Hatch-Slack ou C4

As plantas C4 podem ser divididas em três subtipos, dependendo do tipo de enzima descarboxilativa usada nas células da bainha do feixe vascular

1. Formadora de malato NADP-enzima málica milho, cana de açúcar, sorgo
2. Formadora de aspartato NAD-enzima málica milheto, Panicum miliaceum
3. Formadora de aspartato PEP-carboxicinase capim colonião, Panicum maximum



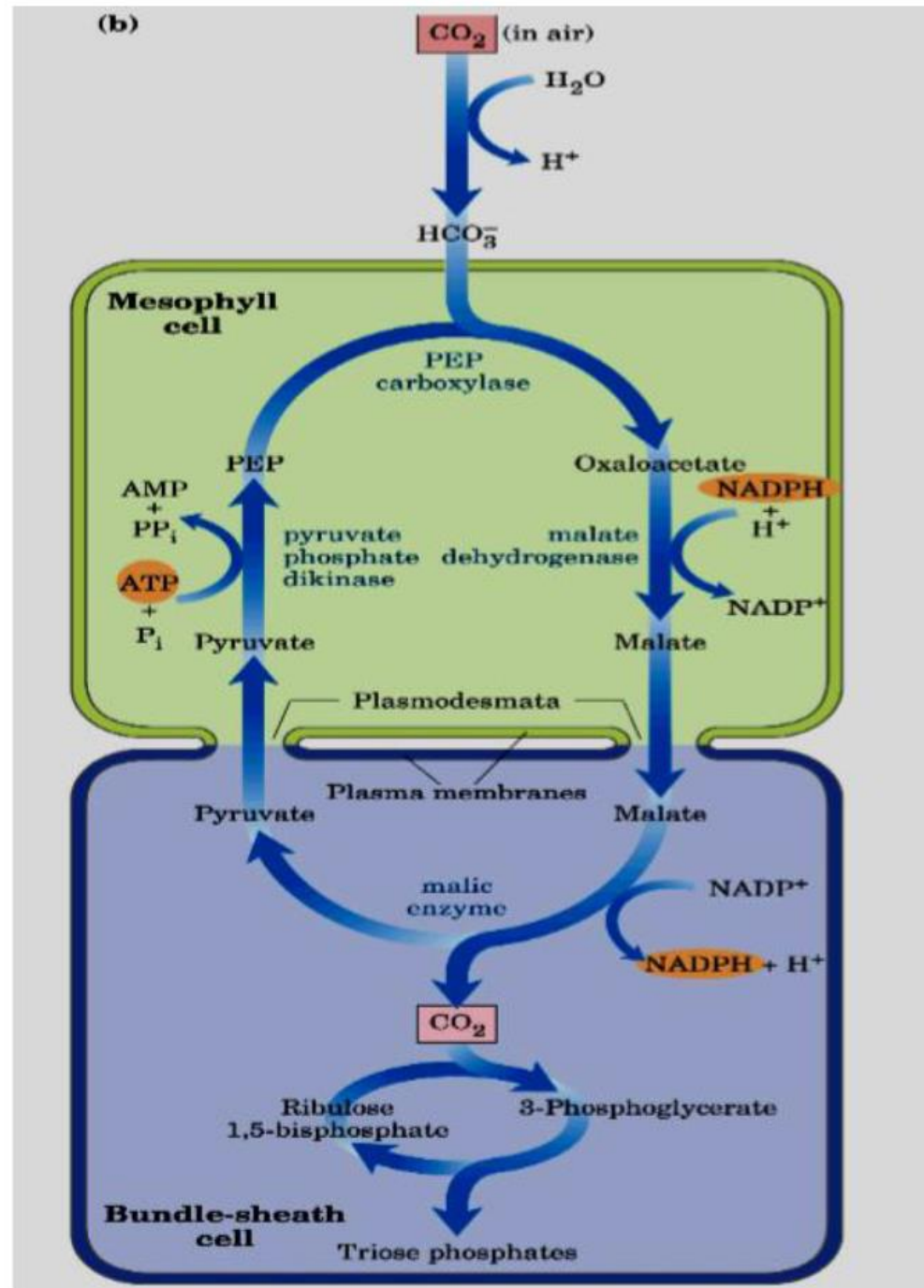
Assimilação é por intermédio de uma molécula com 4 átomos de C - fosfoenolpiruvato

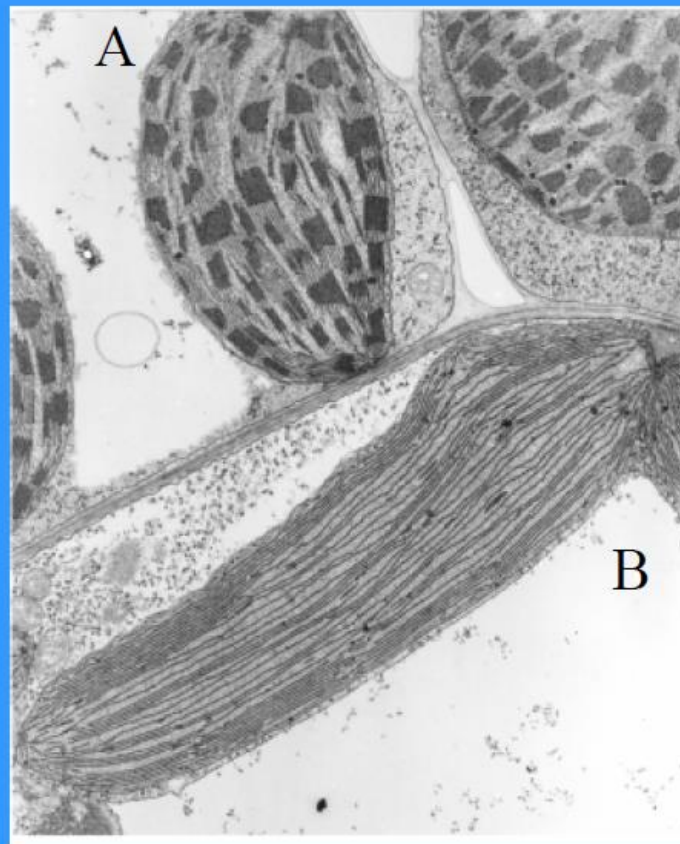
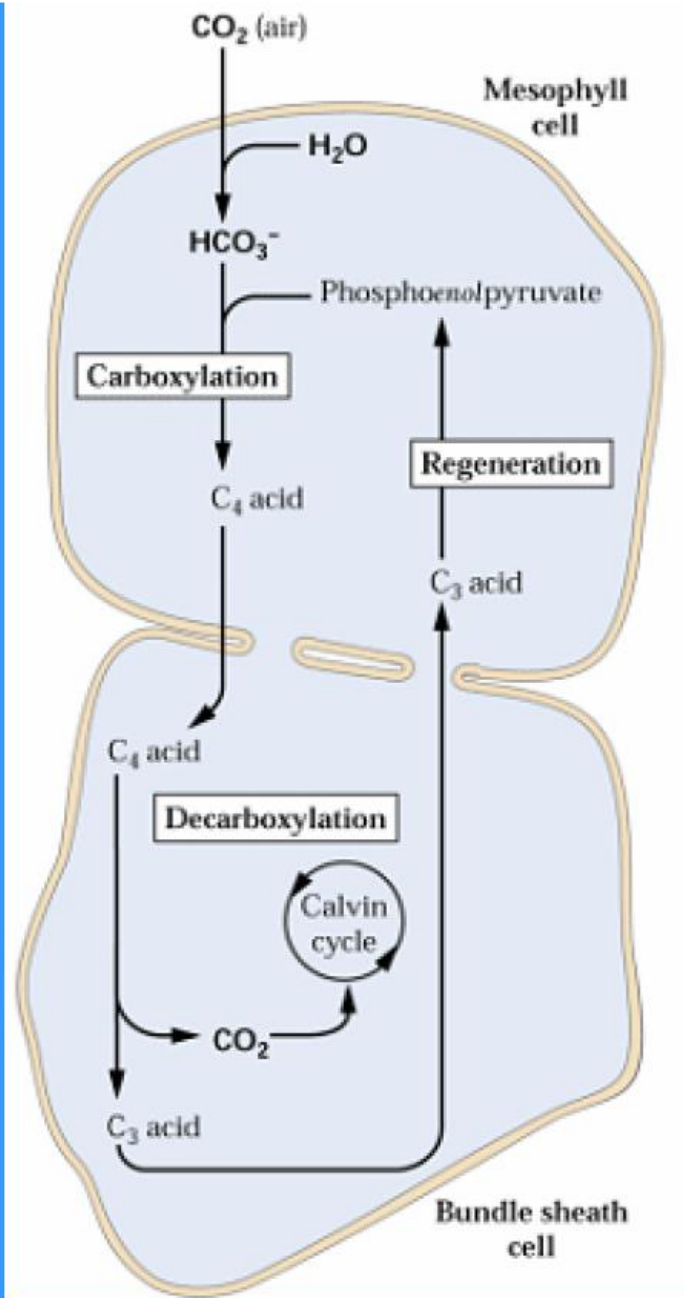
Formando:

Oxalacetato, malato ou aspartato

Passa para as células do envoltório do feixe onde é descarboxilado

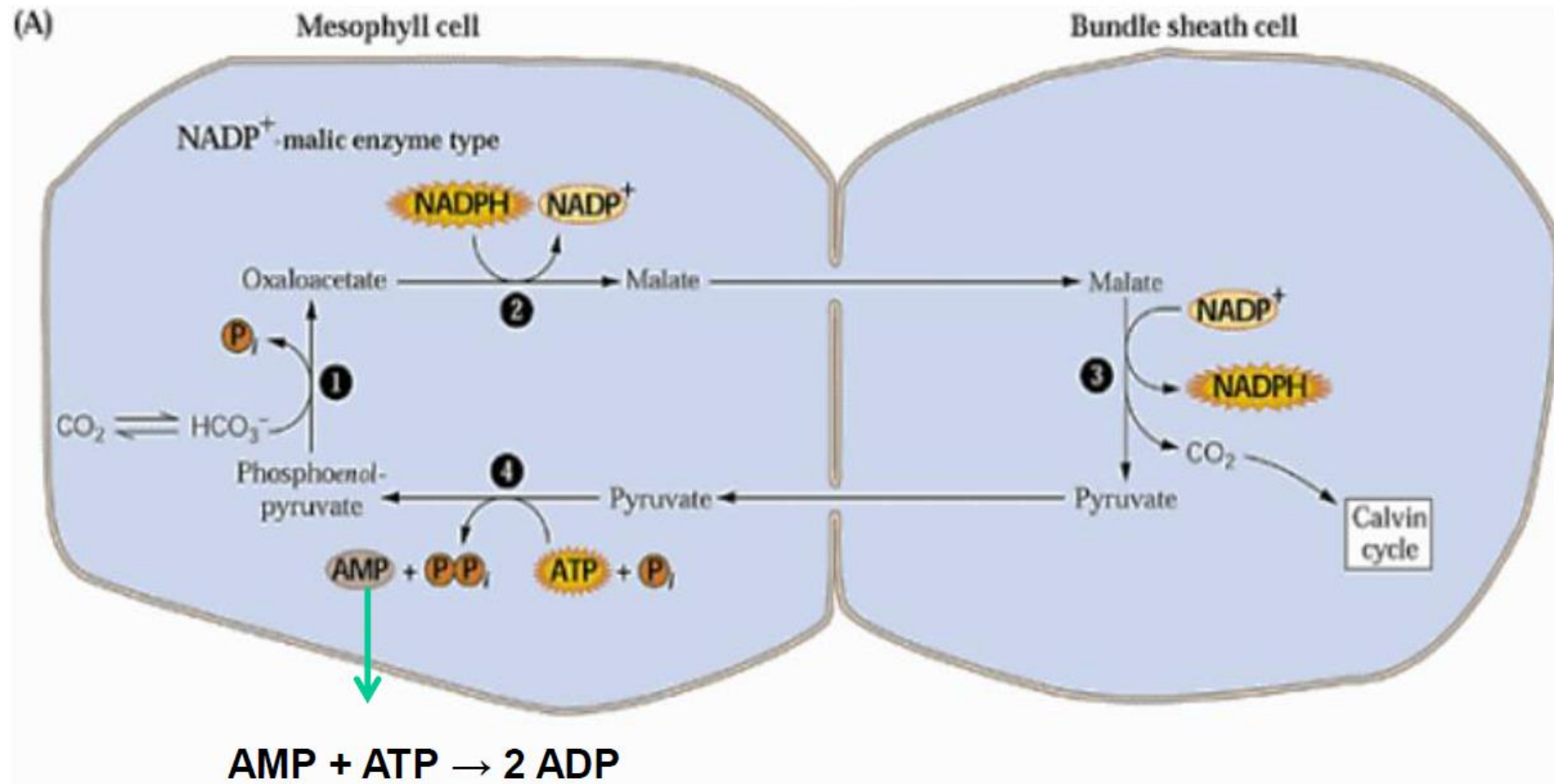
Concentra CO_2 perto da rubisco





Cloroplastos de Sorgo:
 A. células do mesófilo
 B. células da bainha

A via C₄ gasta mais energia que a assimilação de C pelo Ciclo de Calvin (2 ATP/CO₂)



Plantas C₃ – 3 ATP e 2 NADPH
Plantas C₄ – 5 ATP e 2 NADPH

Metabolismo ácido das Crassuláceas (CAM)

Plantas de ambientes áridos

Característico de plantas suculentas

- Descoberta na família Crassulaceae
- Plantas adaptadas a ambientes

com falta de água, alta salinidade ou alta temperatura



Ocorrência das plantas CAM

~ 15 – 20 mil espécies

Mais de 30 famílias

Orchidaceae



Asclepiadaceae



Crassulaceae



Liliaceae

Bromeliaceae



Gimnosperma



Welwitschia mirabilis



Isoetes sp.

Pteridófitas

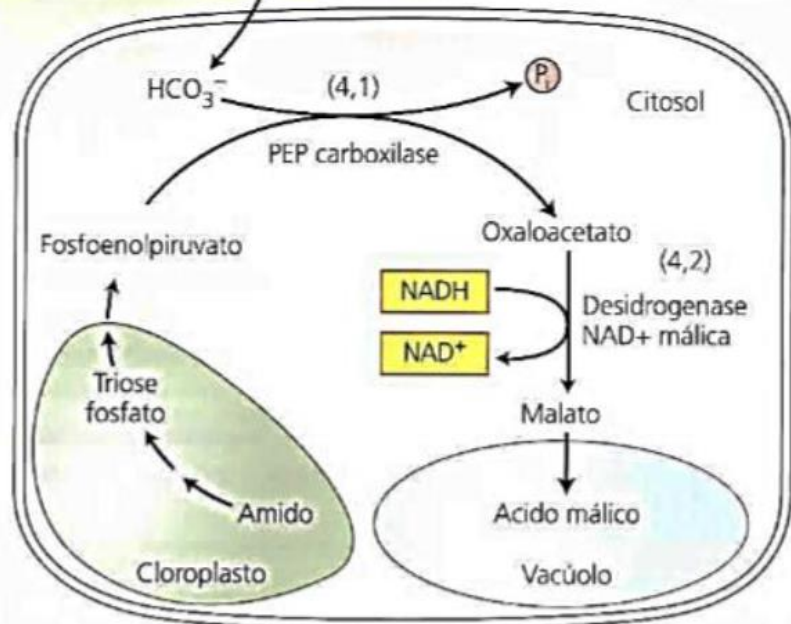
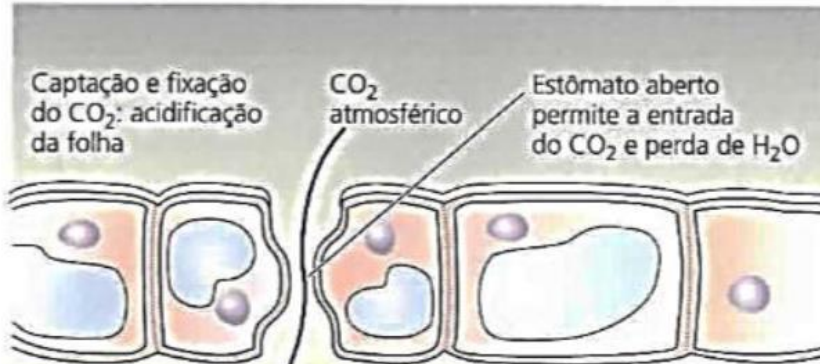


Cactaceae

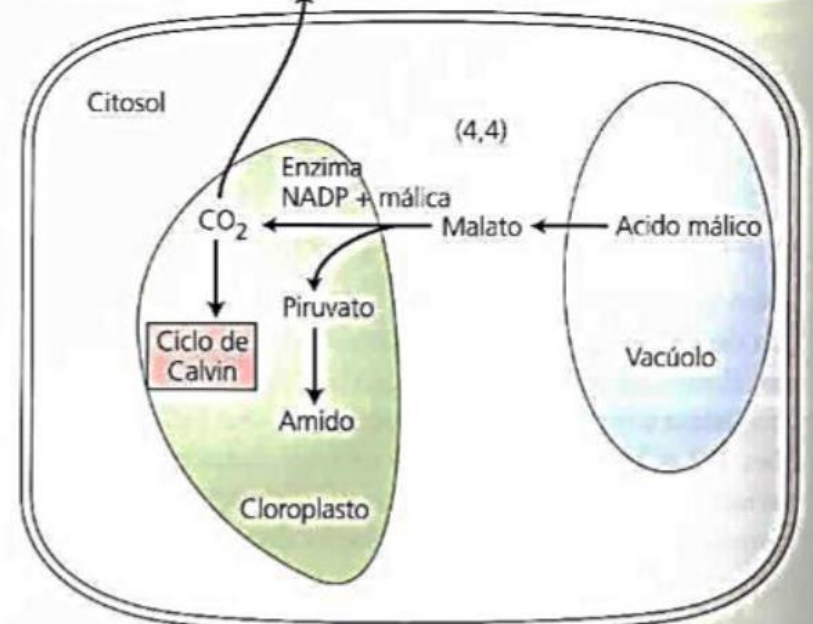
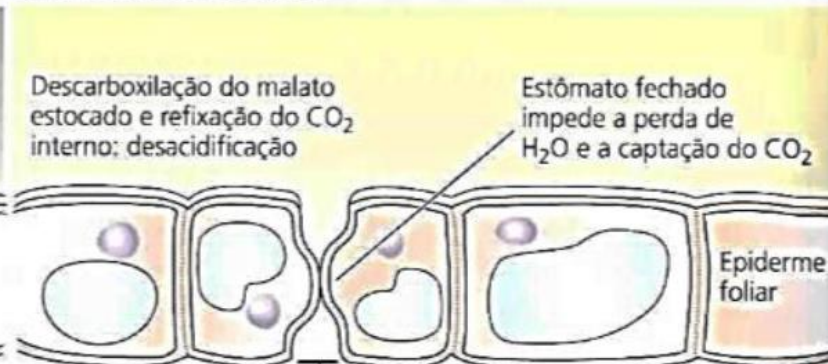


Plantas CAM abrem estômatos à noite e fecham de dia – minimiza perda de água e permite a entrada de CO₂ à noite

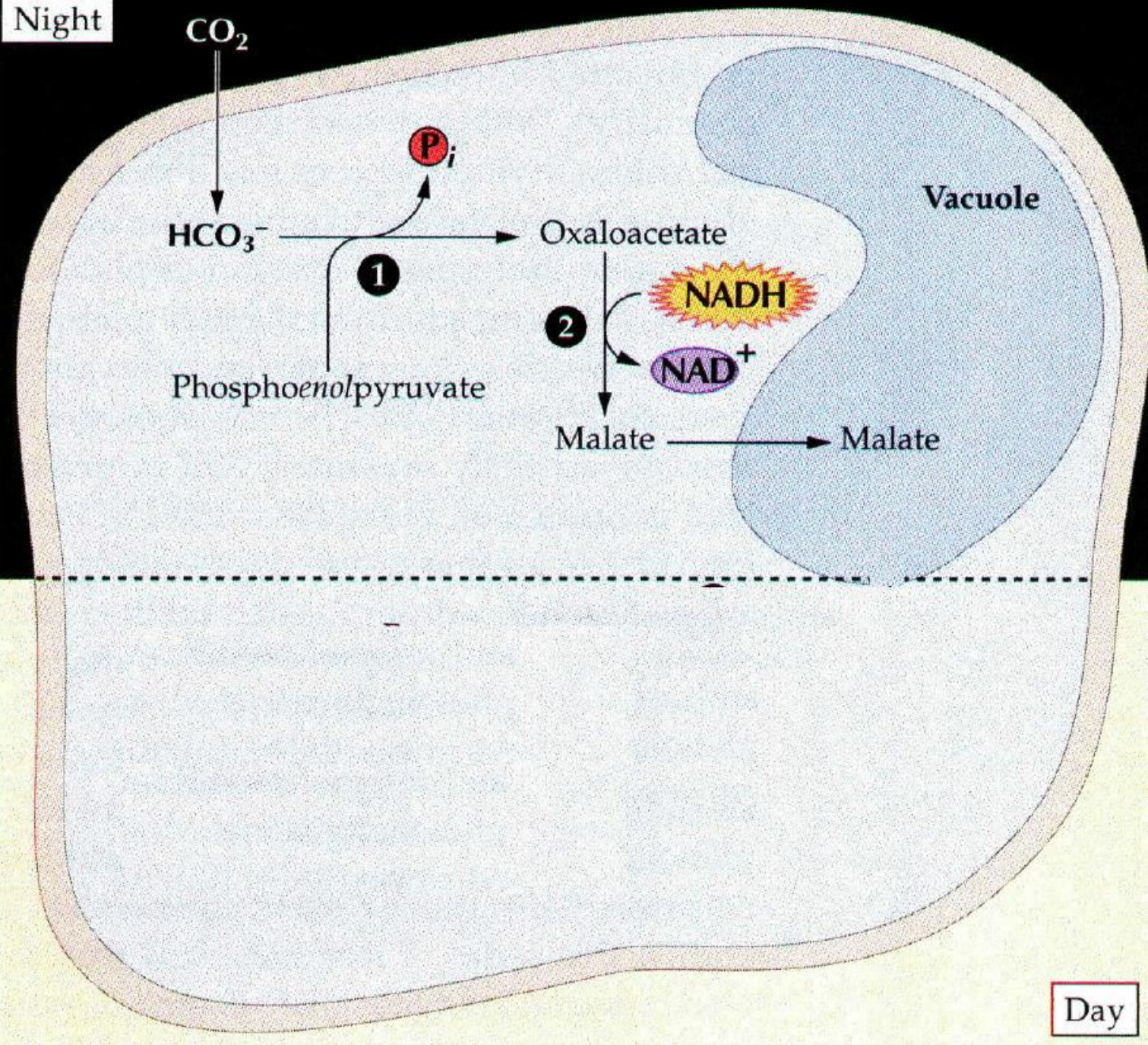
Escuro: Estômatos abertos



Luz: estômatos fechados

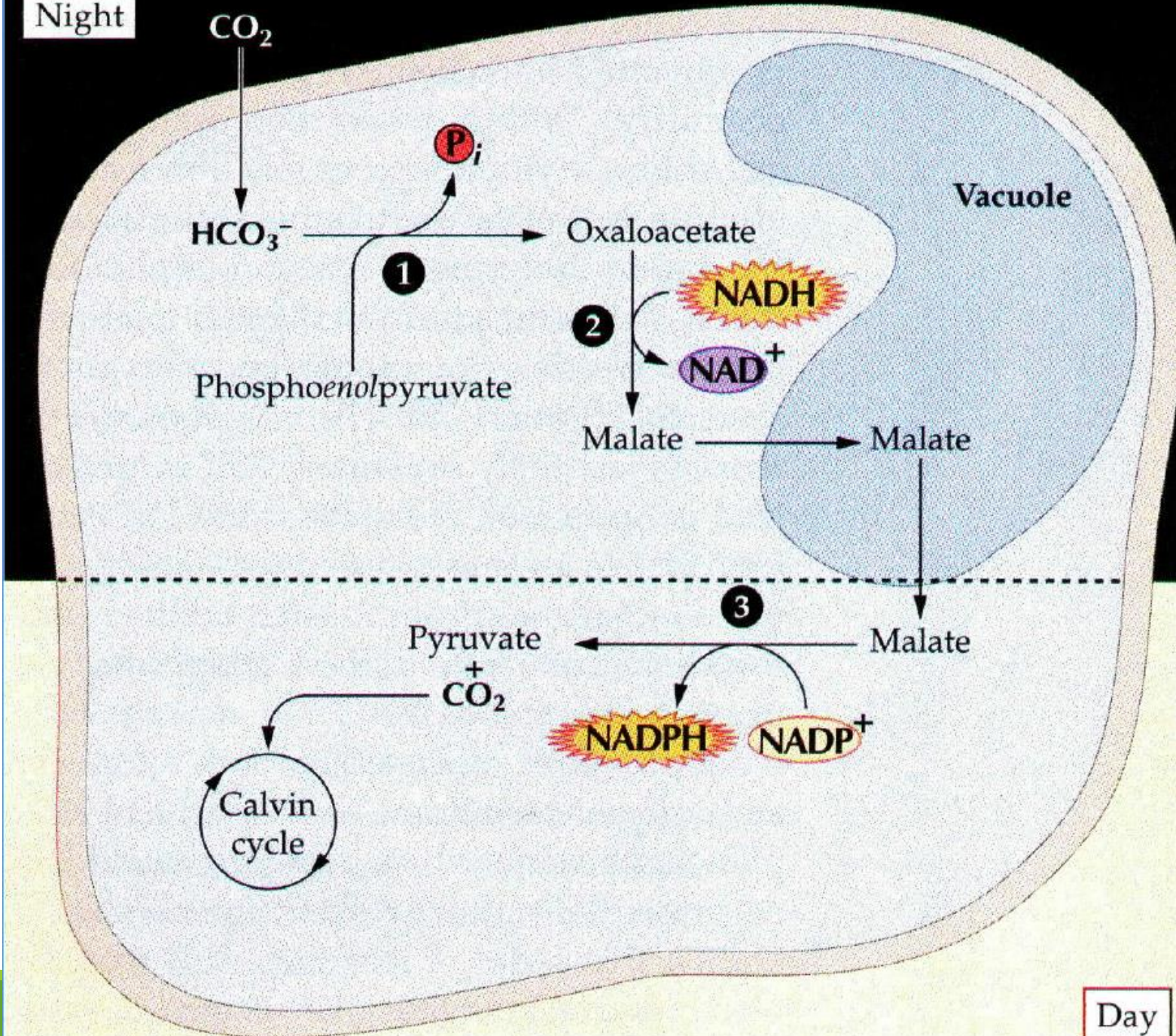


Night



Day

Night



Day

Próxima aula:

Biossíntese de Sacarose, amido e celulose:

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Chloroplasts, Mitochondria, and the Energy Cycle

