

O CARBONO DO SOLO NO ECOSSISTEMA TERRESTRE

INDICE

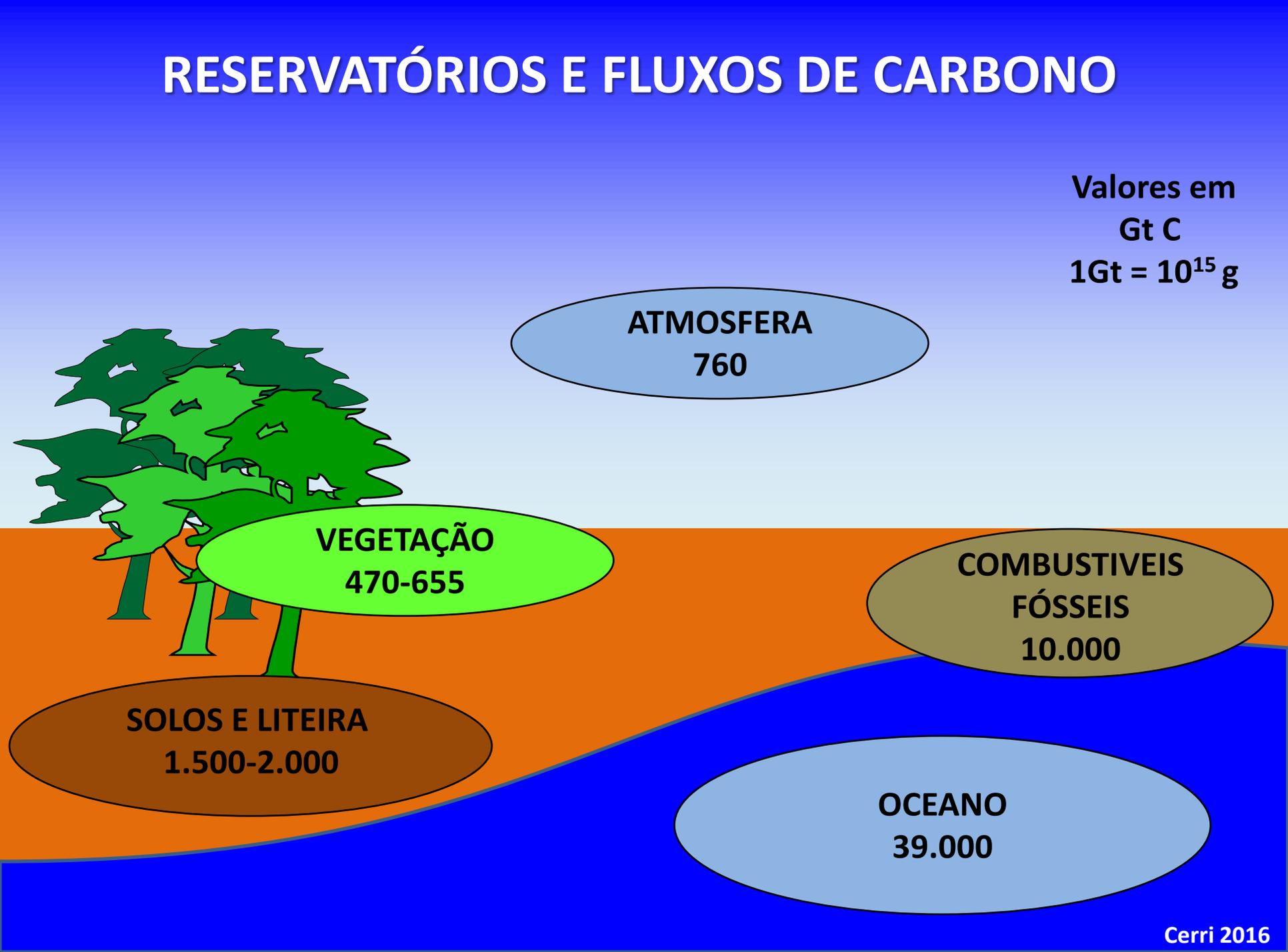
- **RESERVATÓRIOS E FLUXOS DE CARBONO**
- **GASES DO EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL**
- **AÇÕES INTERNACIONAIS FRENTE AO AQUECIMENTO GLOBAL**
- **EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NO BRASIL E AS METAS GOVERNAMENTAIS DE REDUÇÃO**
- **ANTECIPANDO O FUTURO: AUMENTO SUSTENTÁVEL DA PRODUÇÃO DE ETANOL**
- **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

INDICE

- **RESERVATÓRIOS E FLUXOS DE CARBONO**
- **GASES DO EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL**
- **AÇÕES INTERNACIONAIS FRENTE AO AQUECIMENTO GLOBAL**
- **EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NO BRASIL E AS METAS GOVERNAMENTAIS DE REDUÇÃO**
- **ANTECIPANDO O FUTURO: AUMENTO SUSTENTÁVEL DA PRODUÇÃO DE ETANOL**
- **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

RESERVATÓRIOS E FLUXOS DE CARBONO

Valores em
Gt C
1Gt = 10^{15} g



The diagram illustrates the carbon cycle with various reservoirs and their carbon content. It features a background with a blue sky, an orange ground, and a blue ocean. On the left, there are green trees. Five ovals represent different carbon reservoirs: Atmosphere (light blue), Vegetation (green), Soils and Litter (brown), Fossil Fuels (tan), and Ocean (light blue). The values are in Gt C, where 1 Gt = 10¹⁵ g.

ATMOSFERA
760

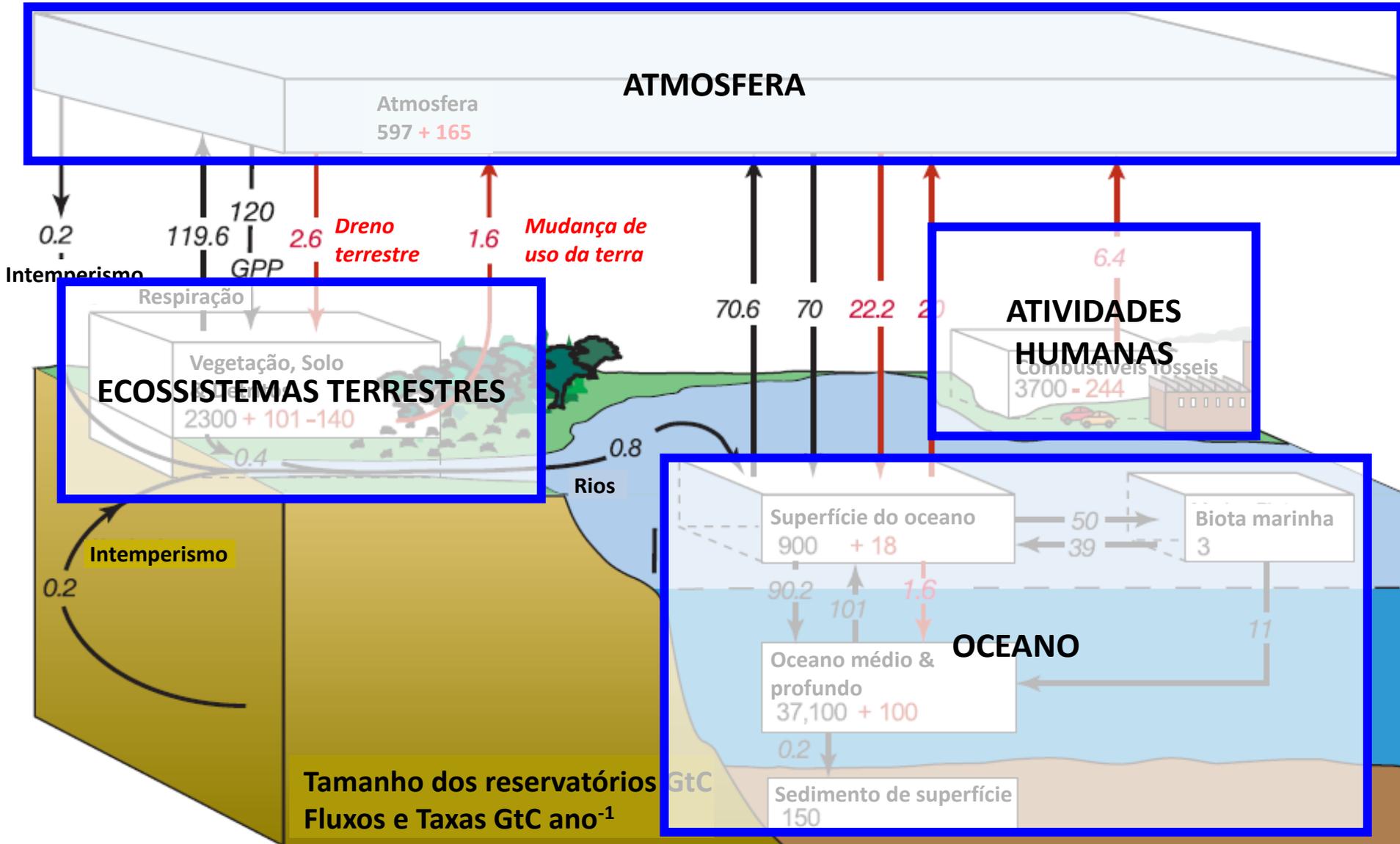
VEGETAÇÃO
470-655

SOLOS E LITEIRA
1.500-2.000

**COMBUSTÍVEIS
FÓSSEIS**
10.000

OCEANO
39.000

FLUXOS NATURAIS E ANTROPOGÊNICOS



Fluxos anuais em Gt C

760

+ 4,3 ± 0,1

2,9 ± 0,8



0,9 ± 0,5



8,9 ± 0,4



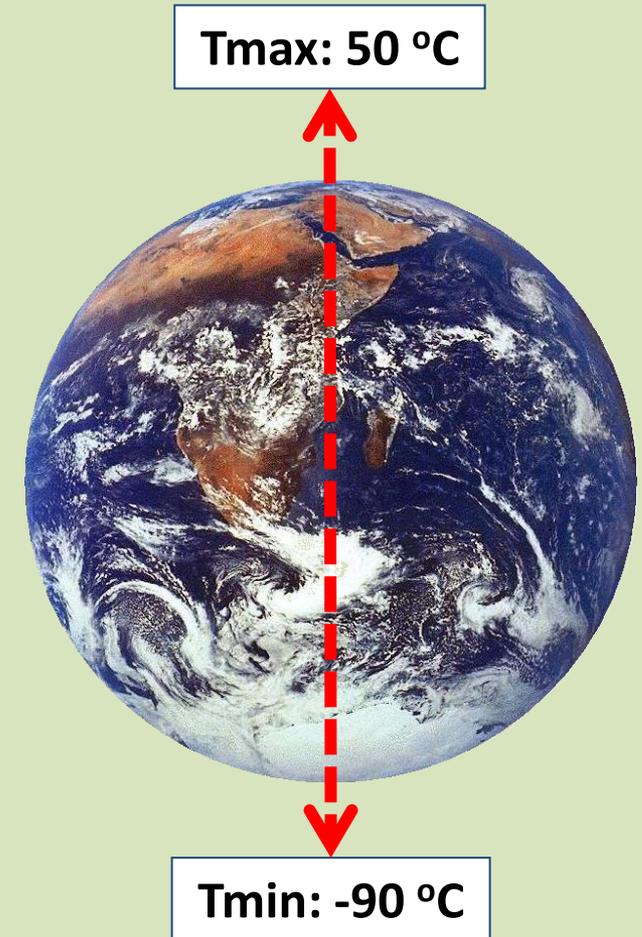
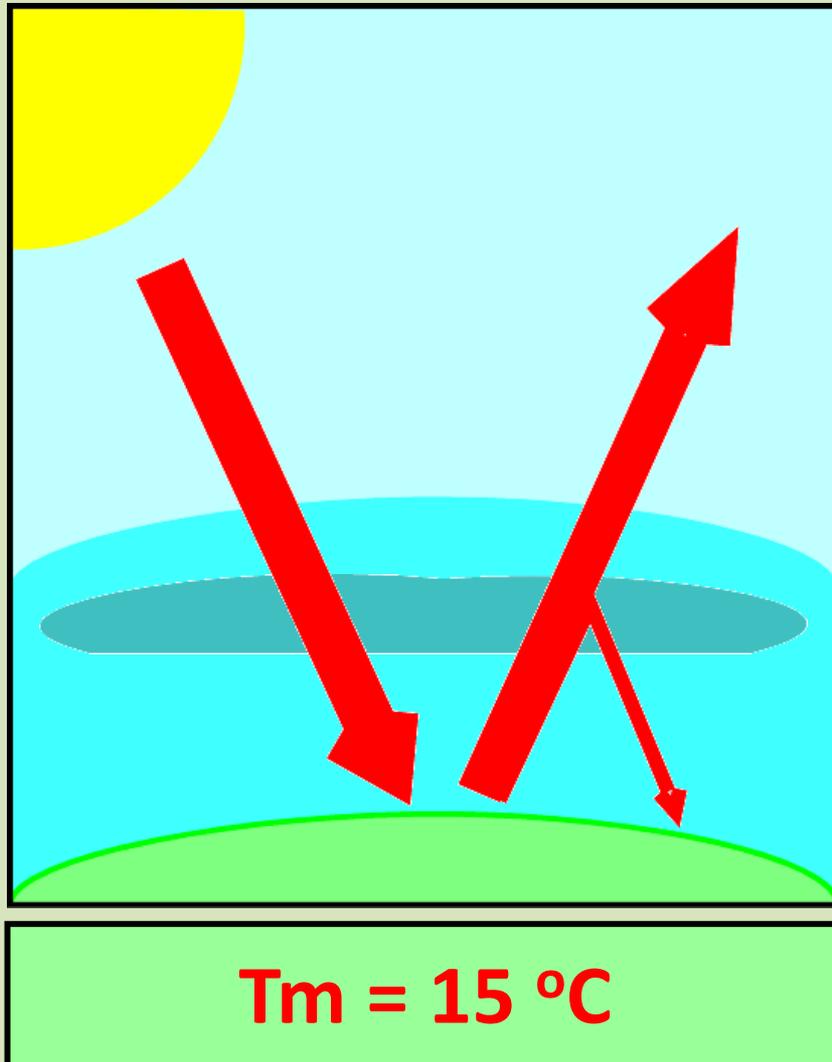
2,6 ± 0,5

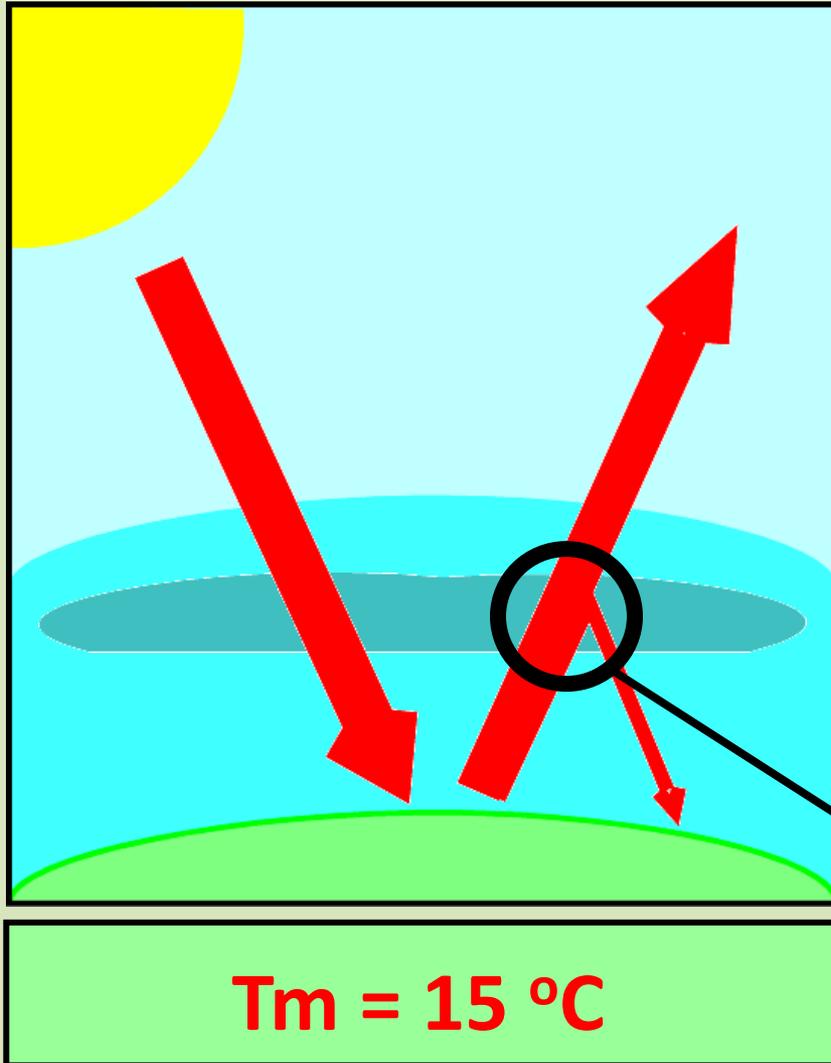


INDICE

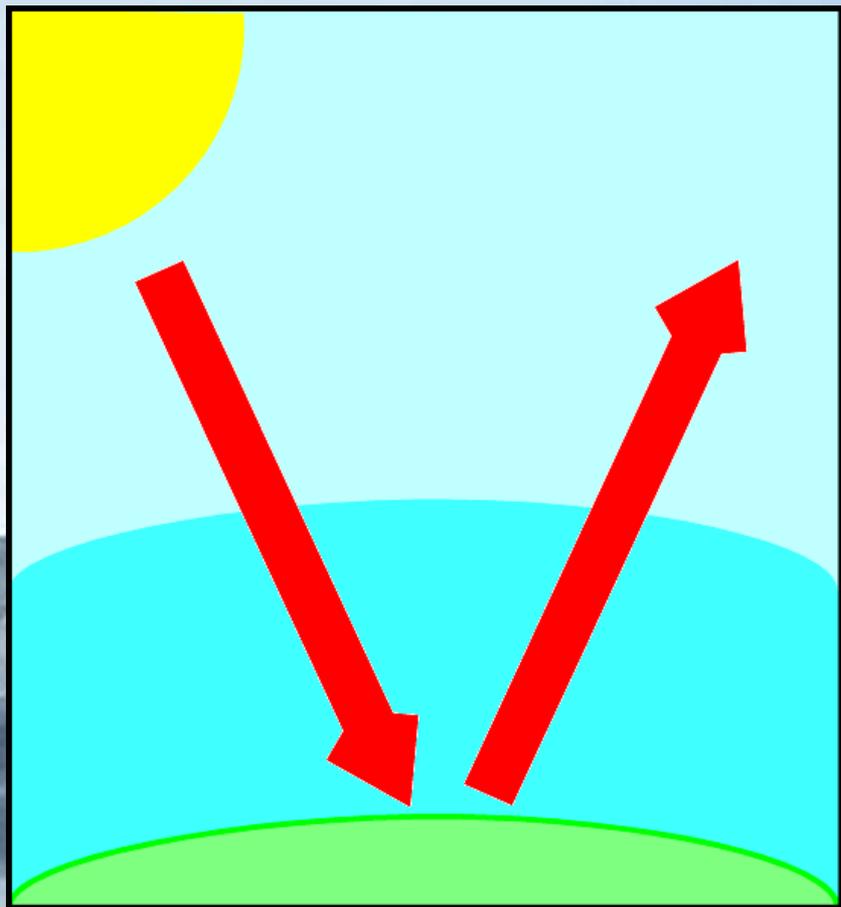
- RESERVATÓRIOS E FLUXOS DE CARBONO
- **GASES DO EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL**
- AÇÕES INTERNACIONAIS FRENTE AO AQUECIMENTO GLOBAL
- EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NO BRASIL E AS METAS GOVERNAMENTAIS DE REDUÇÃO
- ANTECIPANDO O FUTURO: AUMENTO SUSTENTÁVEL DA PRODUÇÃO DE ETANOL
- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aquecimento global e Mudanças climáticas

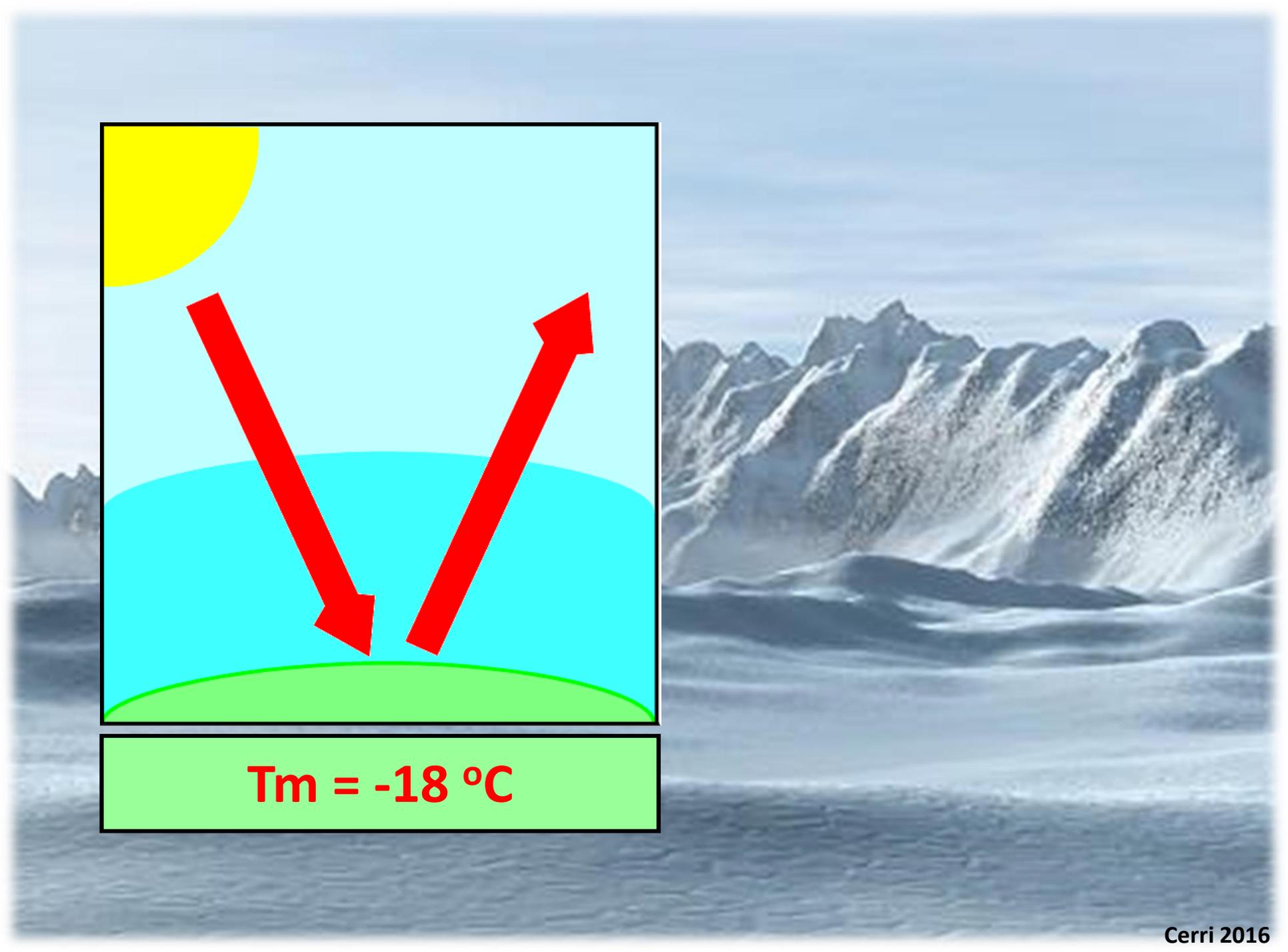


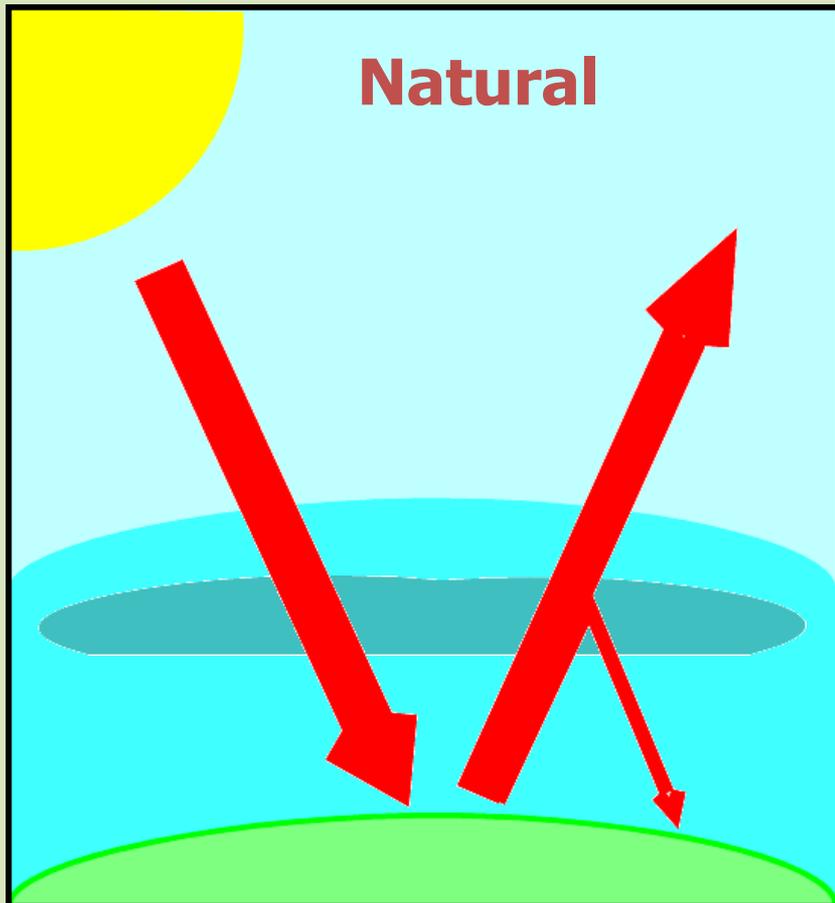


Efeito estufa “natural”

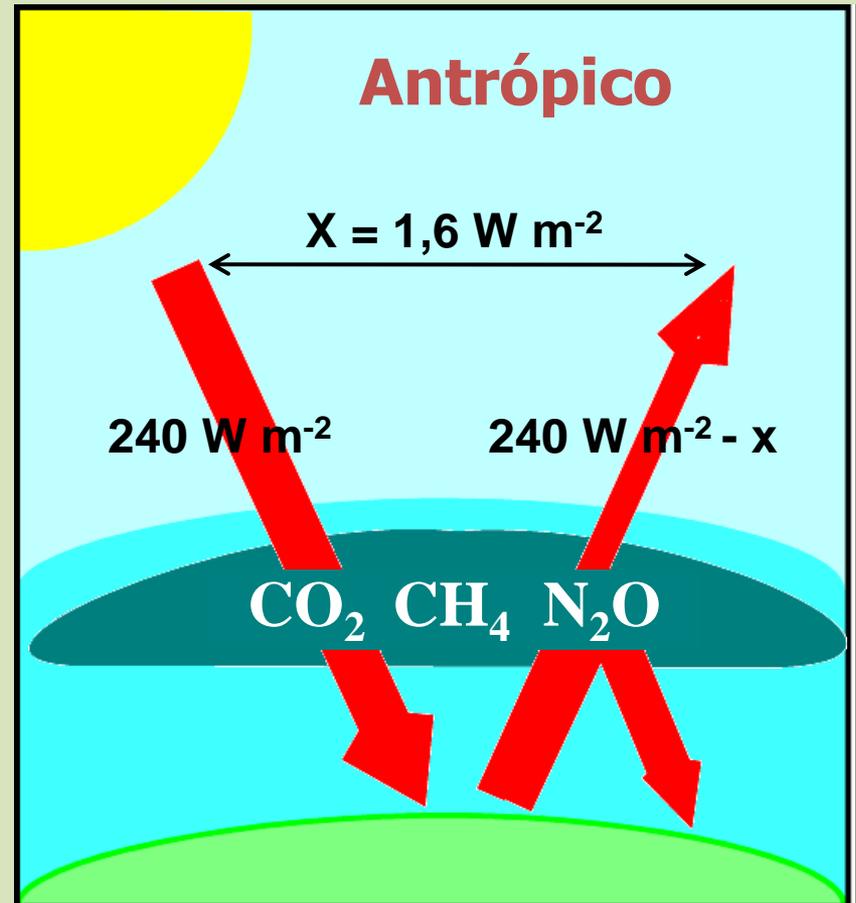


$T_m = -18\text{ }^\circ\text{C}$





T média = 15 °C



T média = 15 °C + 0,8

Aquecimento Global

Mudança Climática Global

Os gases do efeito estufa

Dióxido de Carbono → CO_2

Metano → CH_4

Óxido Nitroso → N_2O

Vapor d'água → $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$

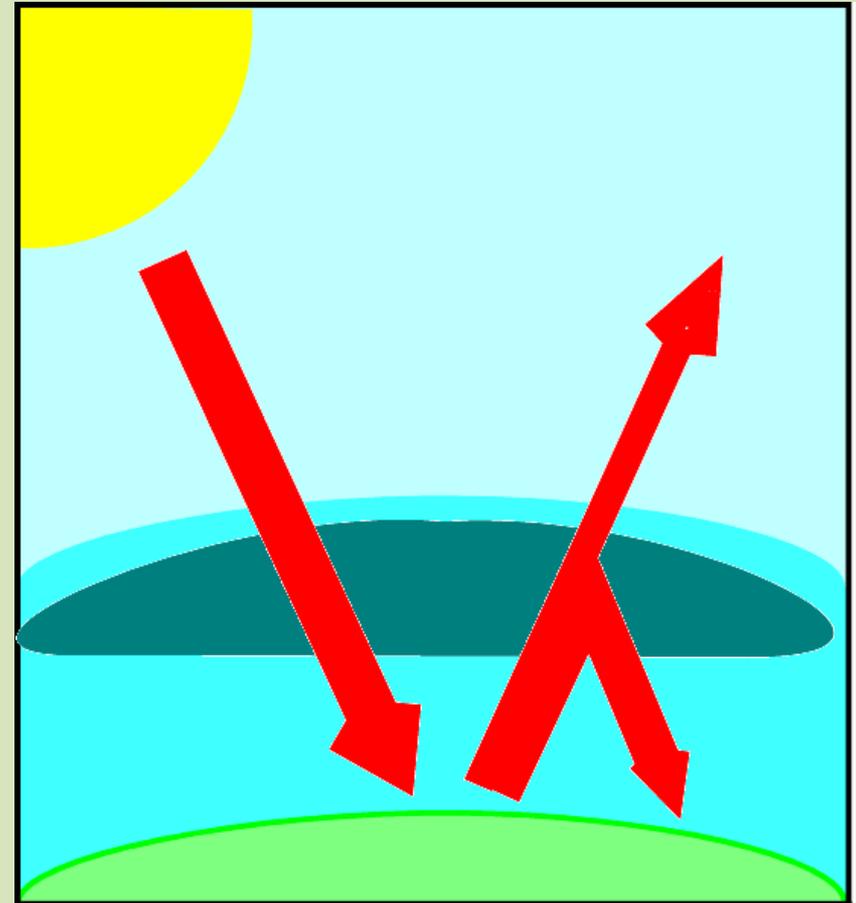
CFC, HFC, PFC, SF_6

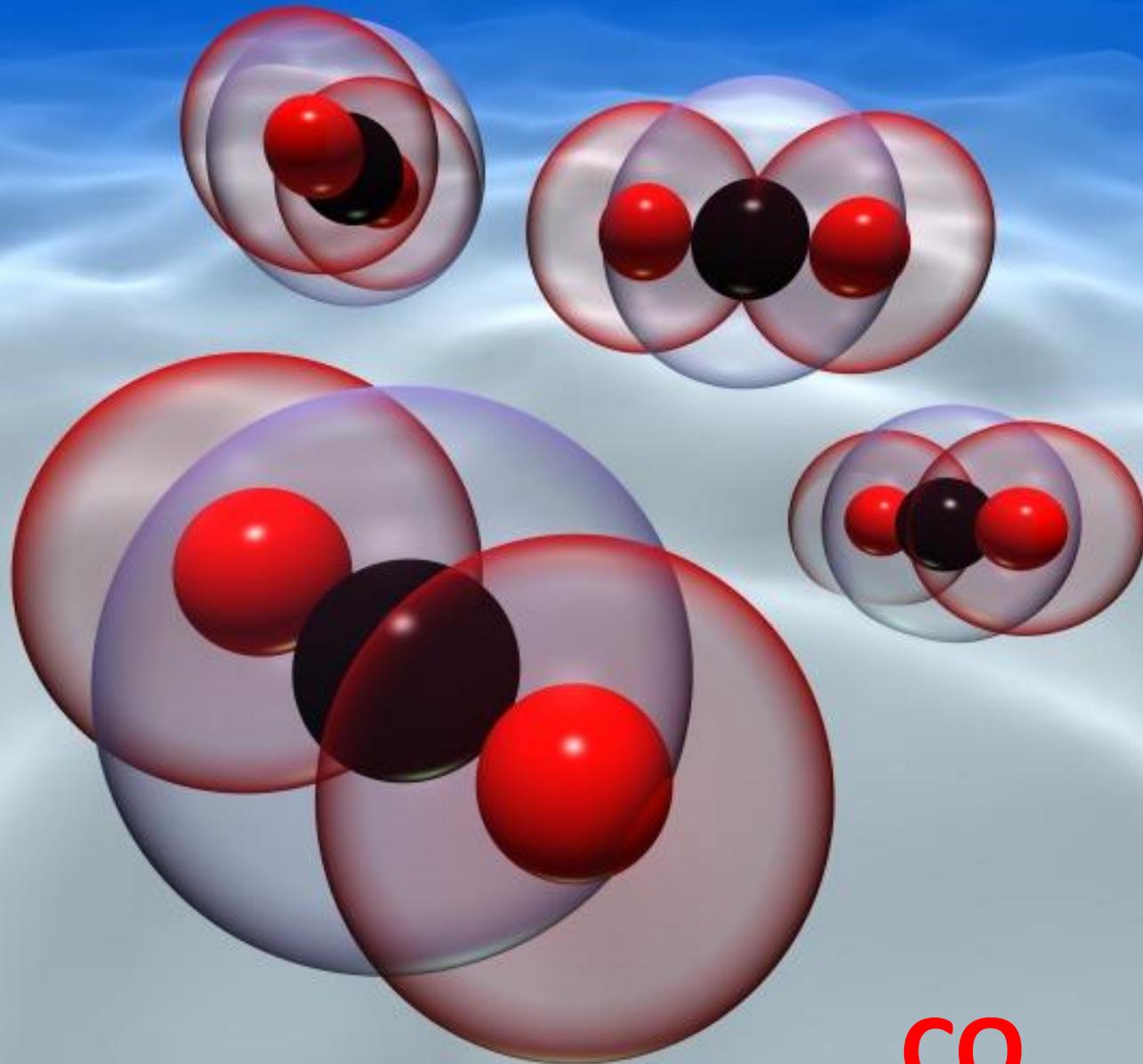
Protocolo de Quioto



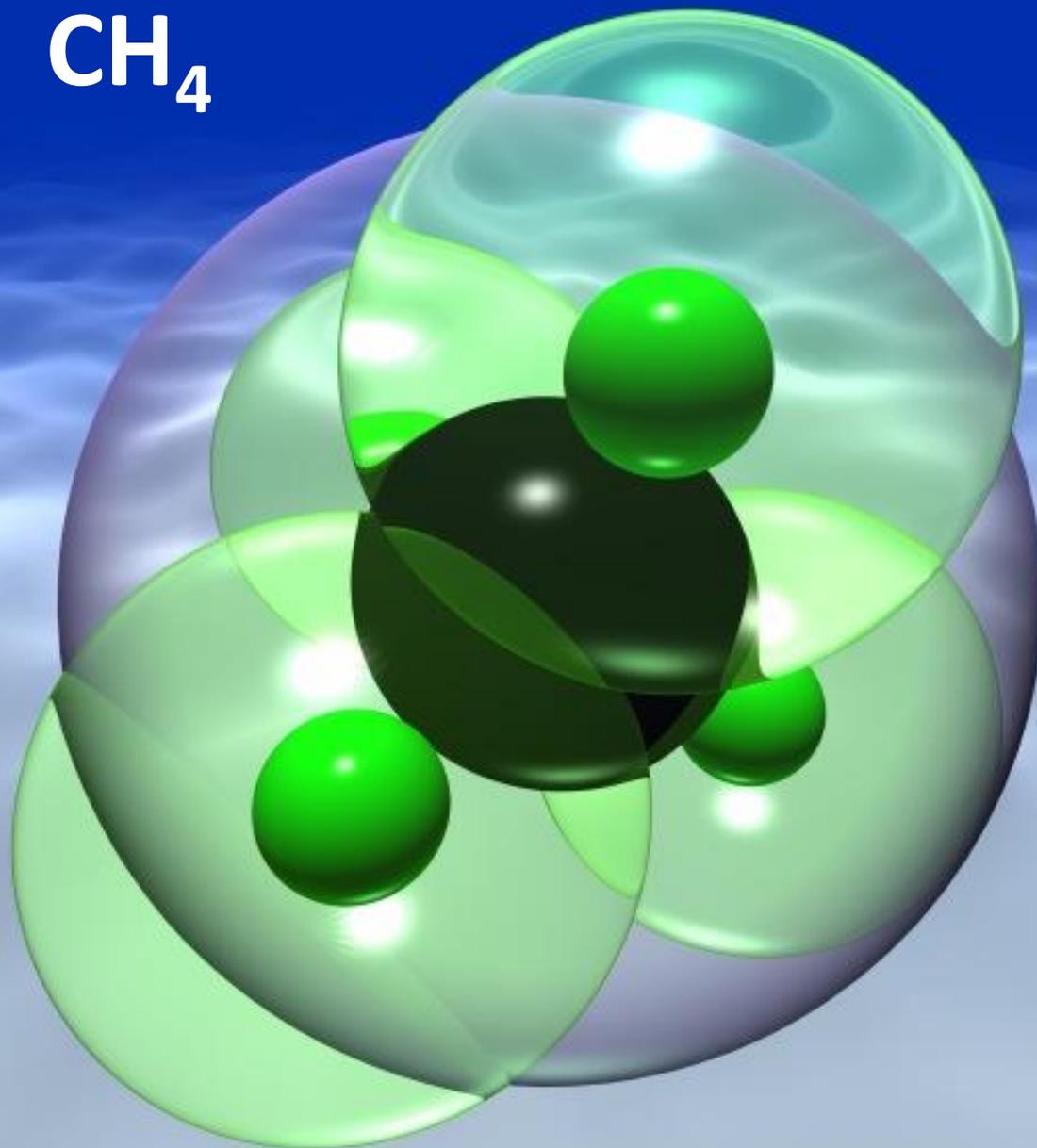
Diferentes características:

- Concentrações
- Potencial de Aquecimento Global

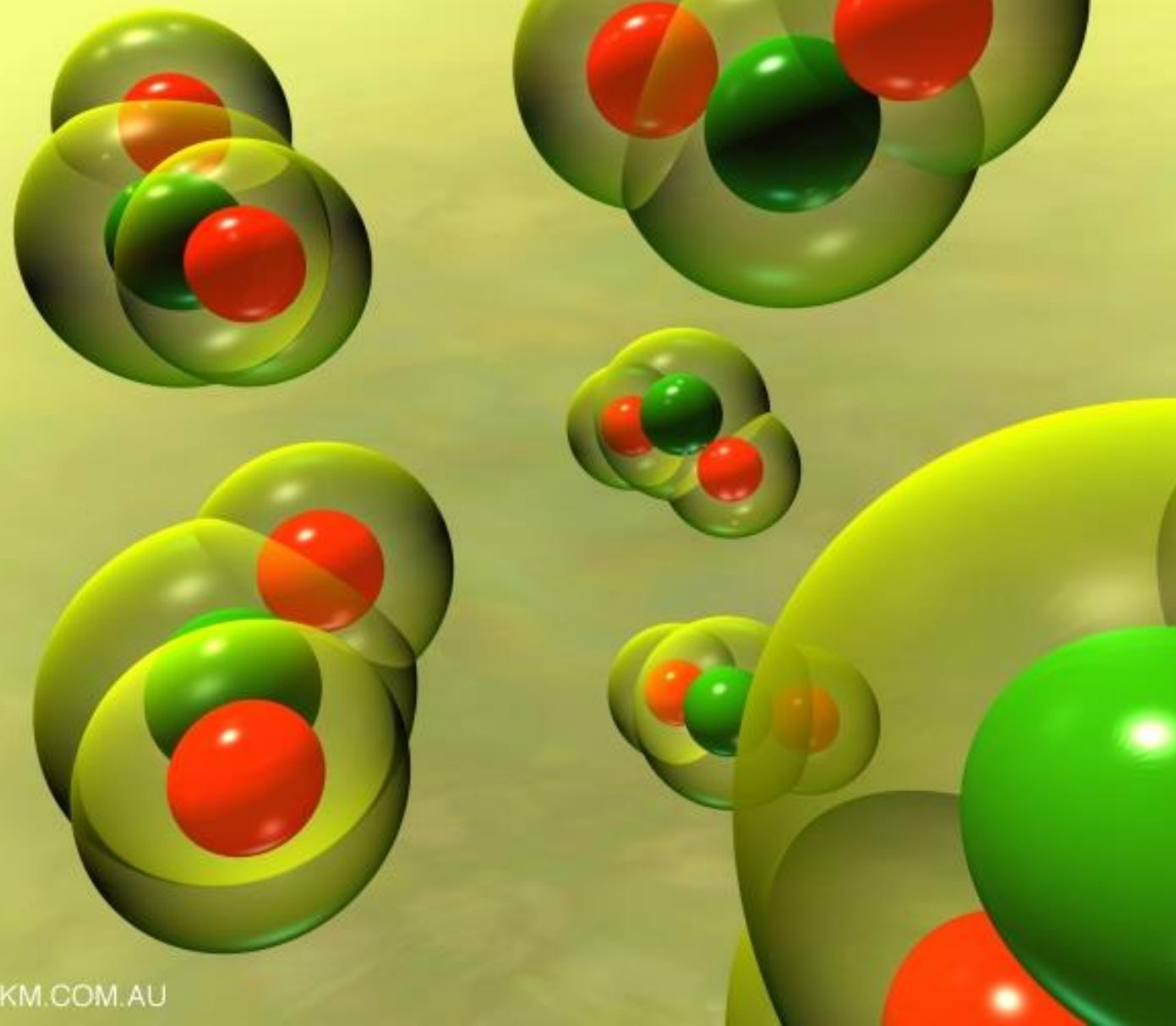




CO₂



N_2O



GASES DE EFEITO ESTUFA



Como comparar o efeito dos diferentes gases no aquecimento global ?

Potencial de Aquecimento Global (PAG)

Gás de referência: CO_2

$$PAG_x = \frac{a_x \tau_x}{a_{\text{CO}_2} \tau_{\text{CO}_2}}$$

a_x ($\text{W}/\text{m}^2/\text{kg}$): capacidade de absorção da radiação infravermelha pelo gás x

a_{CO_2} ($\text{W}/\text{m}^2/\text{kg}$): capacidade de absorção da radiação infravermelha pelo gás CO_2

τ_x (ano): tempo de residência do gás x

τ_{CO_2} (ano): tempo de residência do CO_2

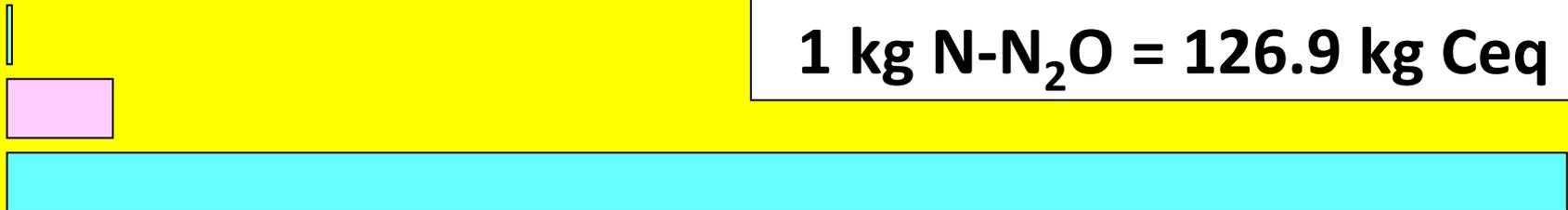
PAG dos principais gases do efeito estufa

Gás	CO ₂	H ₂ O _{vap}	CH ₄	N ₂ O
PAG	1	8	23	296

Gás	CFC	HCFC	HFC	SF ₆	SF ₅ CF ₃
PAG	5 000- 14 000	1 500- 4 000	3 000- 9 000	22 200	17 500

Unidade Equivalente em CO₂ (CO₂eq)

CO ₂	CH ₄	N ₂ O
1	23	296



CO₂ Equivalente

1 kg CH₄ = 23 kg CO₂eq

1 kg N₂O = 296 kg CO₂eq

C Equivalente

1 kg C-CH₄ = 8.4 kg Ceq

1 kg N-N₂O = 126.9 kg Ceq

INDICE

- RESERVATÓRIOS E FLUXOS DE CARBONO
- GASES DO EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL
- **AÇÕES INTERNACIONAIS FRENTE AO AQUECIMENTO GLOBAL**
- EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NO BRASIL E AS METAS GOVERNAMENTAIS DE REDUÇÃO
- ANTECIPANDO O FUTURO: AUMENTO SUSTENTÁVEL DA PRODUÇÃO DE ETANOL
- CONSIDERAÇÕES FINAIS

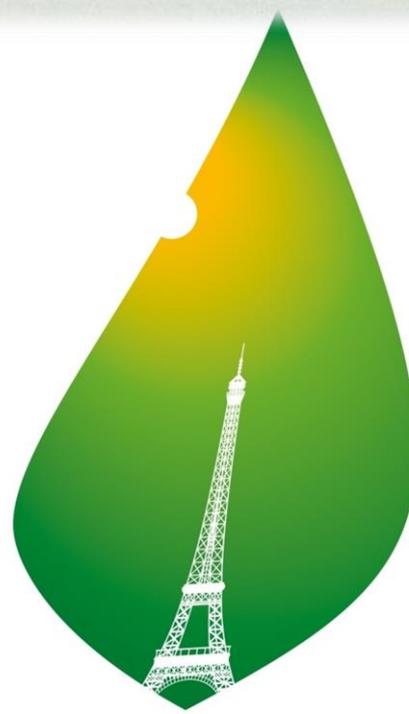
Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas

Protocolo de Quioto

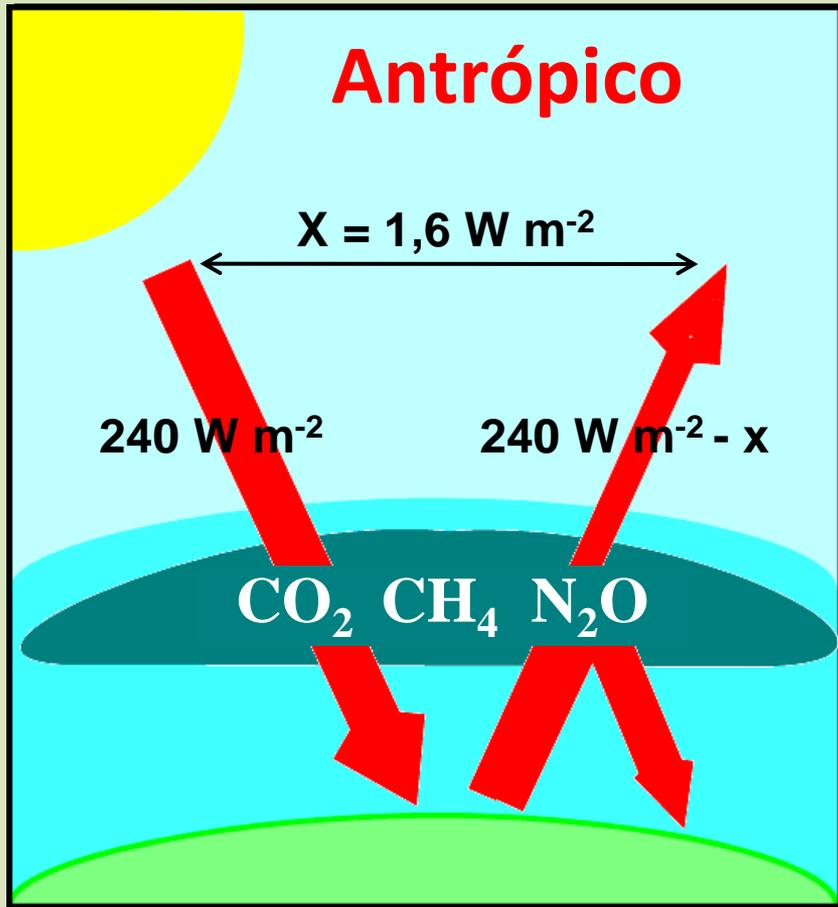
UNFCCC

Meta para os países industrializados

- Redução das emissões dos GEE: 5,2% em média
- Ano base: 1990
- Período de compromisso: 2008-2012



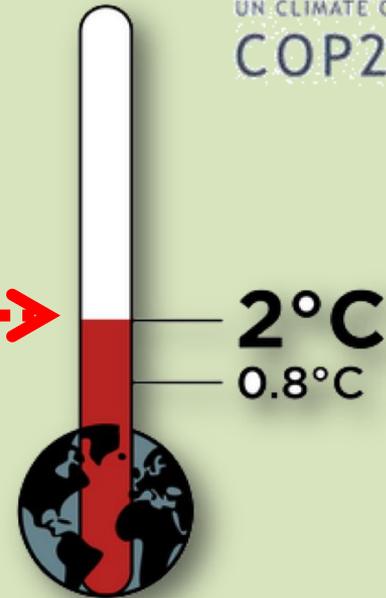
COP21 • CMP11
PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE



$T \text{ média} = 15 \text{ }^\circ\text{C} + 0,8$



PARIS2015
 UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE
 COP21·CMP11



Mudança climática com efeitos irreversíveis

Principais decisões/conclusões da COP 21

- Reaffirm the goal of limiting global temperature increase well below 2 degrees Celsius, while urging efforts to limit the increase to 1.5 degrees;
- Establish binding commitments by all parties to make “nationally determined contributions” (NDCs), and to pursue domestic measures aimed at achieving them;
- Commit all countries to report regularly on their emissions and “progress made in implementing and achieving” their NDCs, and to undergo international review;
- Commit all countries to submit new NDCs every five years, with the clear expectation that they will “represent a progression” beyond previous ones;

Principais decisões/conclusões da COP 21

- Reaffirm the binding obligations of developed countries under the UNFCCC to support the efforts of developing countries, while for the first time encouraging voluntary contributions by developing countries too;
- Extend the current goal of mobilizing \$100 billion a year in support by 2020 through 2025, with a new, higher goal to be set for the period after 2025;
- Extend a mechanism to address “loss and damage” resulting from climate change, which explicitly will not “involve or provide a basis for any liability or compensation;”
- Require parties engaging in international emissions trading to avoid “double counting;”
- Call for a new mechanism, similar to the Clean Development Mechanism under the Kyoto Protocol, enabling emission reductions in one country to be counted toward another country’s NDC.

INDICE

- RESERVATÓRIOS E FLUXOS DE CARBONO
- GASES DO EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL
- AÇÕES INTERNACIONAIS FRENTE AO AQUECIMENTO GLOBAL
- EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NO BRASIL E AS METAS GOVERNAMENTAIS DE REDUÇÃO
- ANTECIPANDO O FUTURO: AUMENTO SUSTENTÁVEL DA PRODUÇÃO DE ETANOL
- CONSIDERAÇÕES FINAIS



AÇÕES INTERNACIONAIS FRENTE AO AQUECIMENTO GLOBAL



Adaptação



Reação ao impacto do problema

Mitigação



Enfrentar o problema



Estratégias devem e podem ser implementadas em conjunto

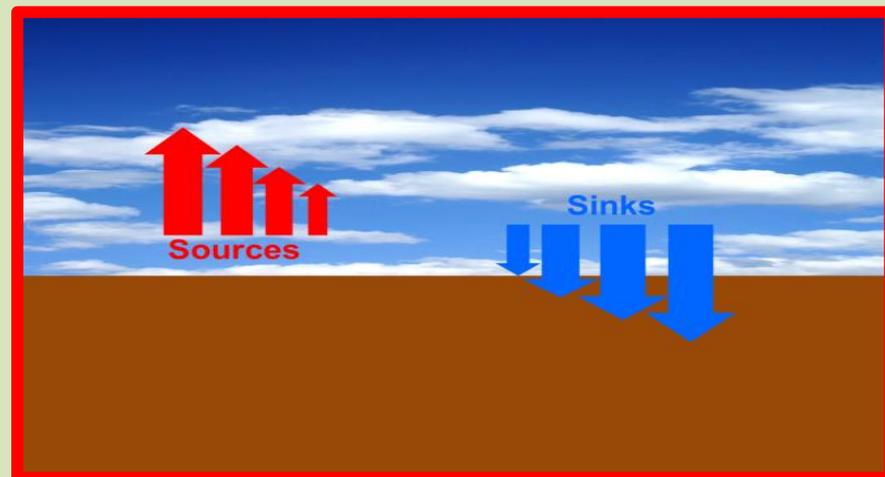
Novas práticas

Administrar os riscos/Seguros

Fortalecimento das instituições

Treinamentos

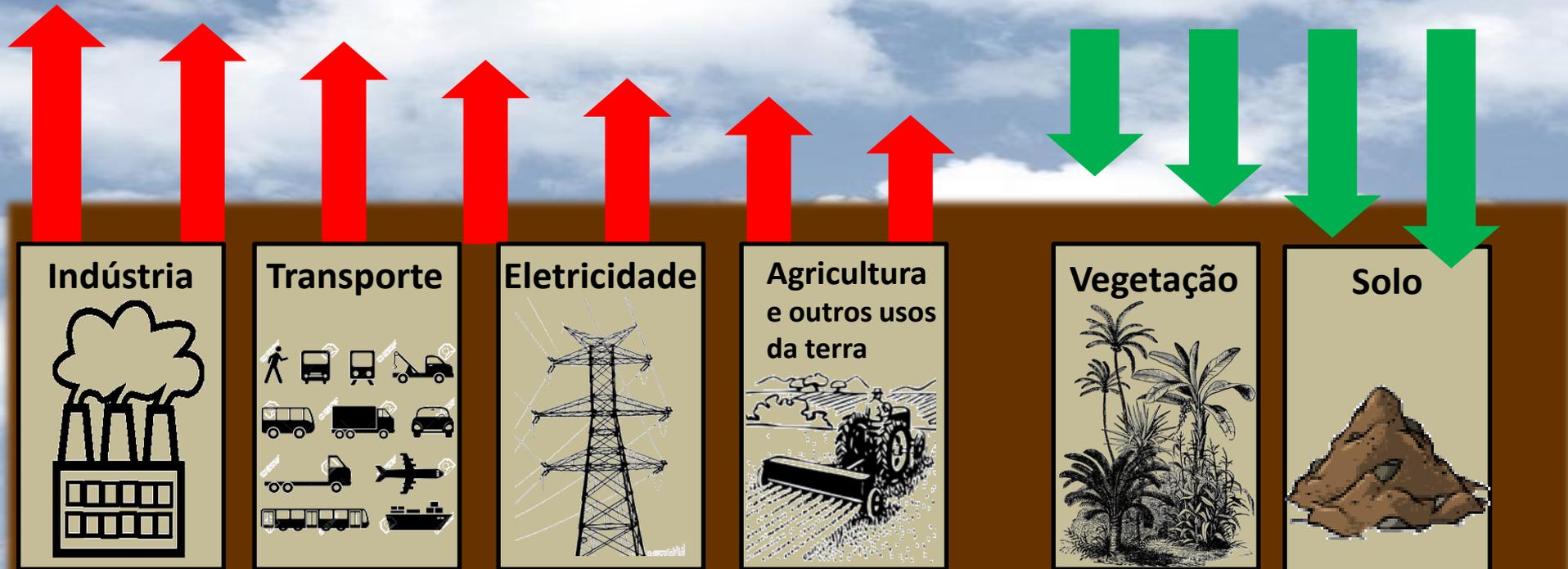
Outros (verificar)



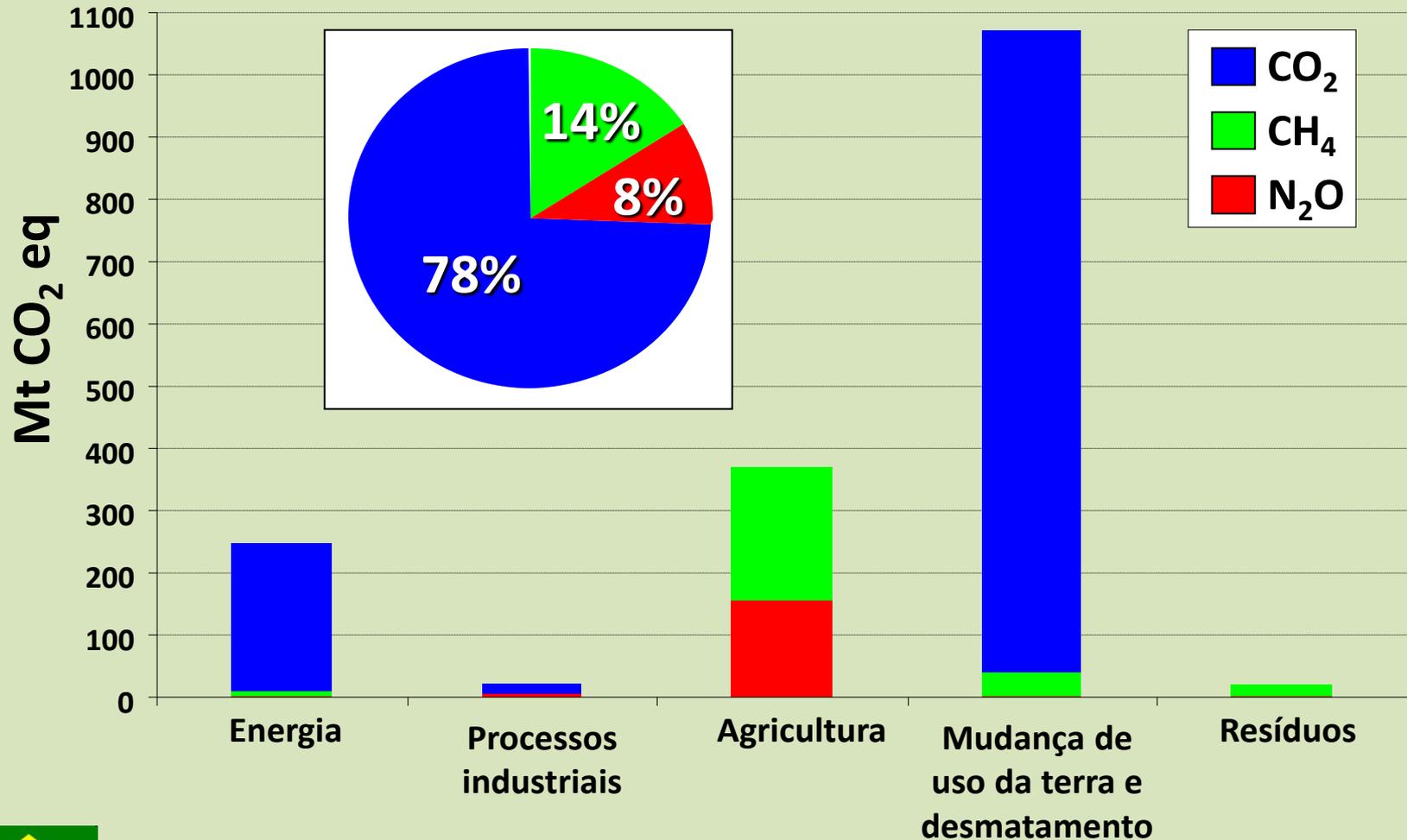
AÇÕES INTERNACIONAIS FRENTE AO AQUECIMENTO GLOBAL

Diminuir a emissão

Aumentar a fixação



Distribuição das emissões no Brasil em 2005



16,7%

1,7%

22,0%

58,4%

1,2%



66,5%

4,3%

13,8%

12,2%

3,2%

Compromissos assumidos pelo Brasil



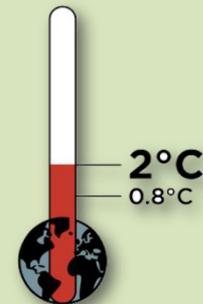
INDC do Brasil

INTENDED NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION



PARIS2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE
COP21·CMP11

Amplo escopo de mitigação, adaptação e metas de implementação, visando atingir o objetivo da Convenção UNFCCC



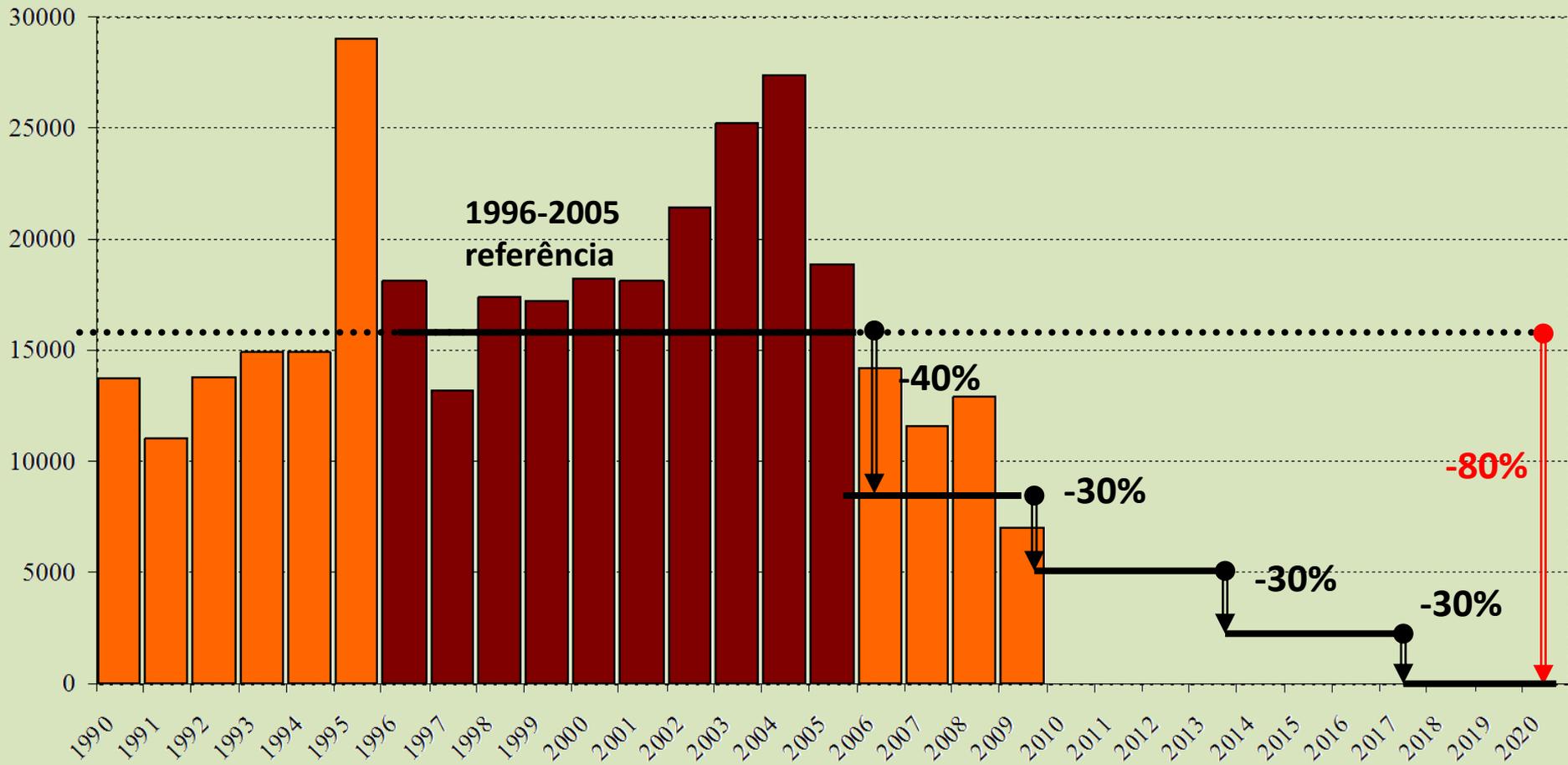
Metas governamentais do Brasil para redução de emissão



PARIS2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE
COP21·CMP11

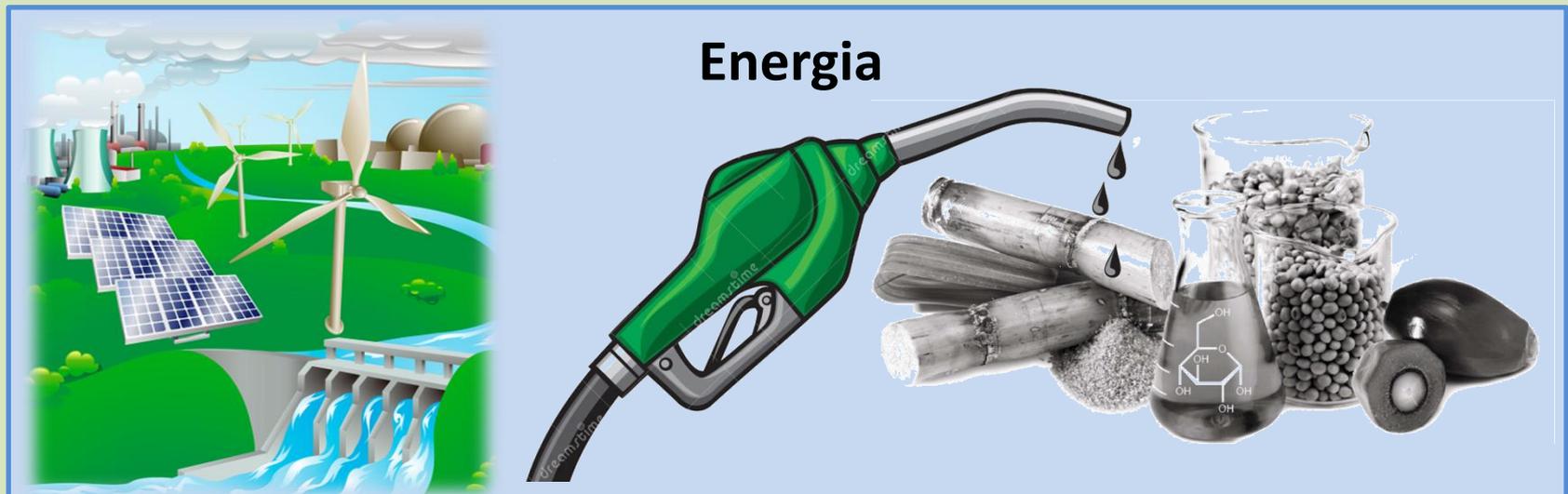
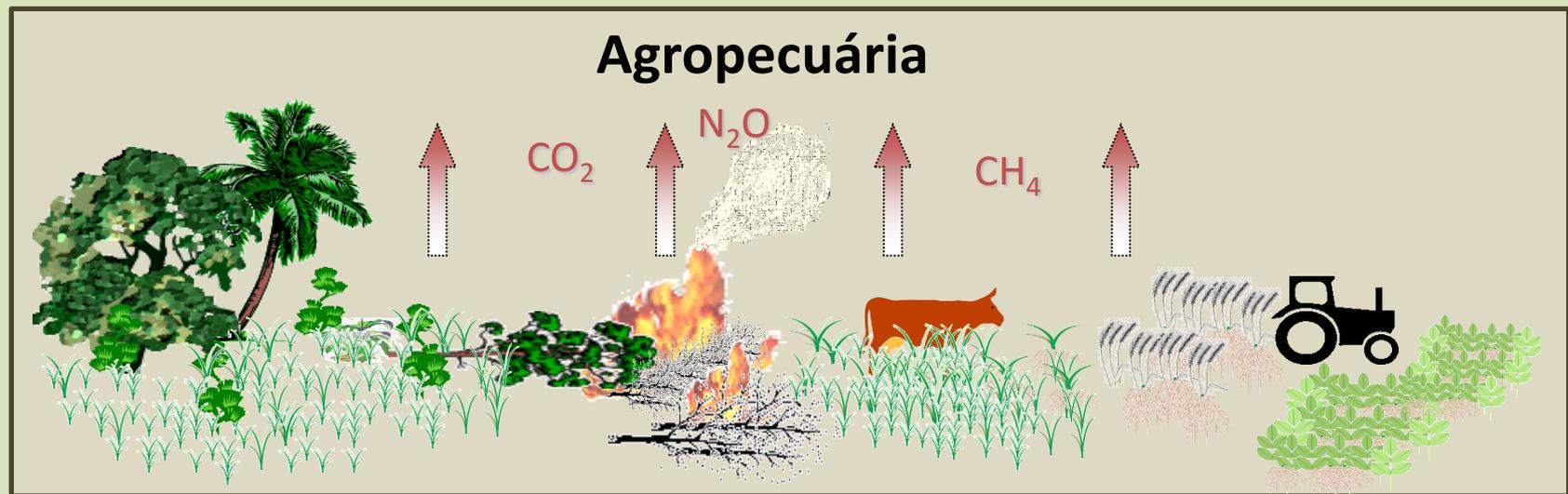
--- Meta de redução de emissões de gases do efeito estufa

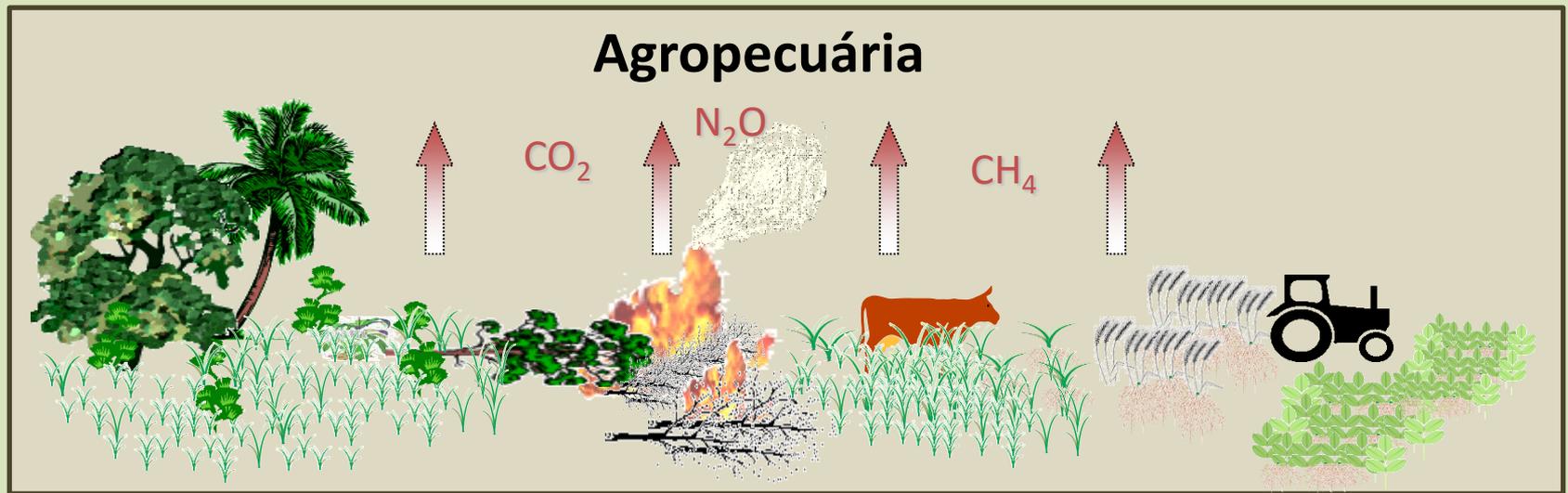




Taxas de desmatamento (barras) e níveis de redução (linhas) para os quadriênios propostos pelo Plano Nacional de Mudanças Climáticas (Brasil, 2008) em relação à linha de bases 1996-2005.

Setores prioritários para a redução de emissão





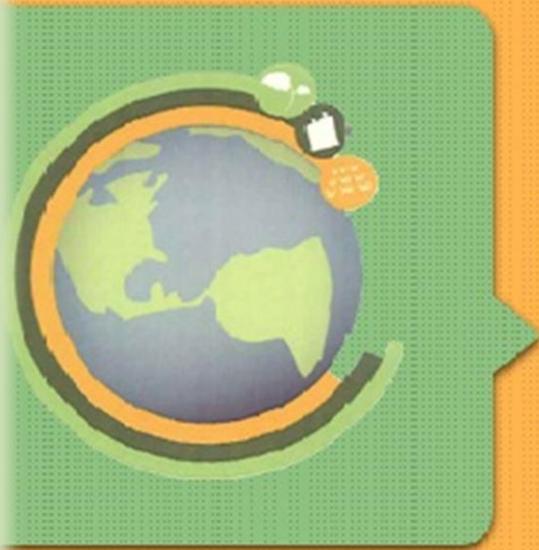
Ações para a redução das emissões de GEE e fixação de carbono

Ações para reduzir o aumento de GEE

- recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas;
- integração de 5 milhões de hectares de lavoura-pecuária-florestas.

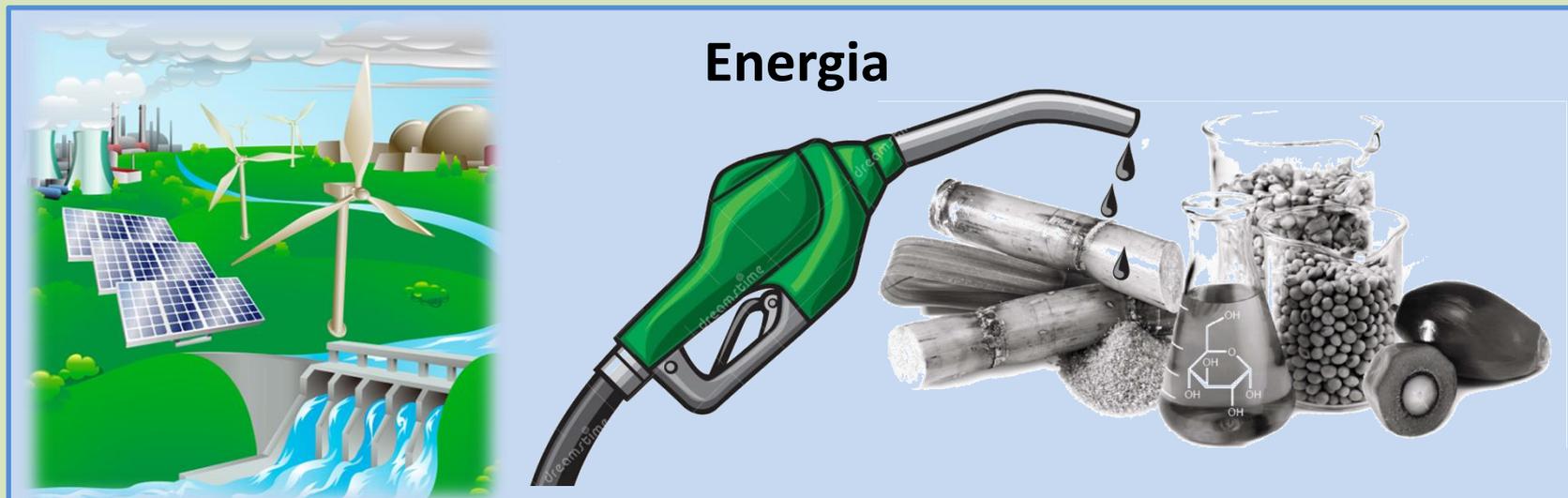
Ações para fixar o CO_2 atmosférico

- restauração e o reflorestamento de 12 milhões de hectares;



PROGRAMA ABC
**AGRICULTURA
DE BAIXO
CARBONO**

Plante sustentabilidade, colha resultados



Ações para a redução das emissões de GEE e fixação de carbono

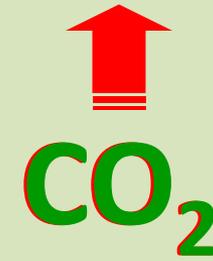
- Garantia de 45% de fontes renováveis no total da matriz energética;
- Participação de 66% da fonte hídrica na geração de eletricidade;
- Participação de 23% das fontes renováveis - eólica, solar e biomassa - na geração de energia elétrica;
- Aumento de cerca de 10% na eficiência elétrica.
- **Participação de 16% de etanol carburante e das demais biomassas derivadas da cana-de-açúcar no total da matriz energética.**

INDICE

- RESERVATÓRIOS E FLUXOS DE CARBONO
- GASES DO EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL
- AÇÕES INTERNACIONAIS FRENTE AO AQUECIMENTO GLOBAL
- EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NO BRASIL E AS METAS GOVERNAMENTAIS DE REDUÇÃO
- ANTECIPANDO O FUTURO: AUMENTO SUSTENTÁVEL DA PRODUÇÃO DE ETANOL
- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aquecimento global

Biomassa como matéria prima para produção de biocombustível



... e os outros gases??

Fotossíntese



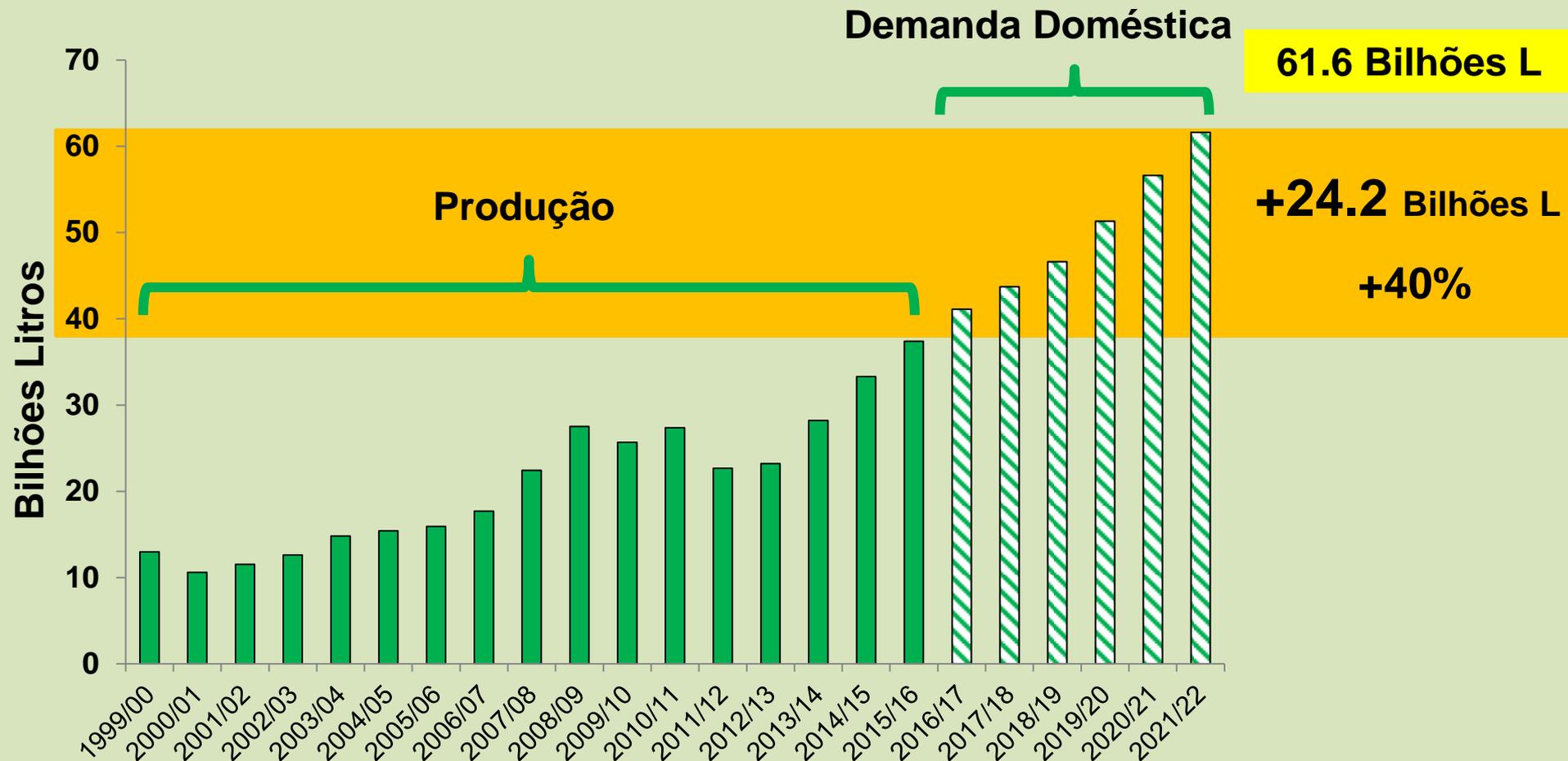
BIOMASSA: FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA



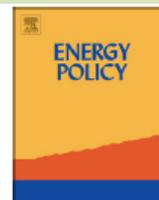


Etanol de cana-de-açúcar

Etanol de cana-de-açúcar no Brasil



Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy



José Goldemberg^{a,*}, Francisco F.C. Mello^b, Carlos E.P. Cerri^c,
Christian A. Davies^d, Carlos C. Cerri^b

Goldemberg et al. (2014)



- **Como aumentar a produção de etanol ?**
- **Como produzir de maneira ambientalmente mais sustentável?**



- **Como aumentar a produção de etanol ?**
- **Como produzir de maneira ambientalmente mais sustentável?**



**Novas
variedades**

Em desenvolvimento



**Etanol de segunda
geração**



Expansão de área

De imediato

2 opções

7 Mg ha⁻¹



Expansão da área agrícola

sem mais desmatamento...



Pastagem 192 milhões ha



Agricultura 60 milhões ha



Expansão da área agrícola



Pastagem 192 milhões ha
- 20 milhões ha

Agricultura 60 milhões ha
+ 20 milhões ha

ACÇÕES PARA O SETOR AGROPECUÁRIO

Recuperação/ reforma de pastagens



Melhoramento genético



Confinamento



Integração Lavoura-pecuária





- **Como aumentar a produção de etanol ?**
- **Como produzir de maneira ambientalmente mais sustentável?**

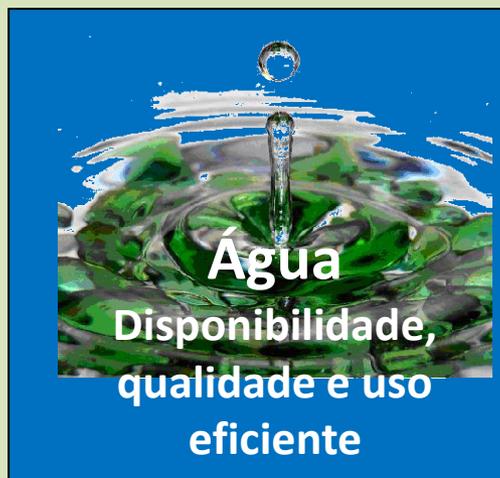
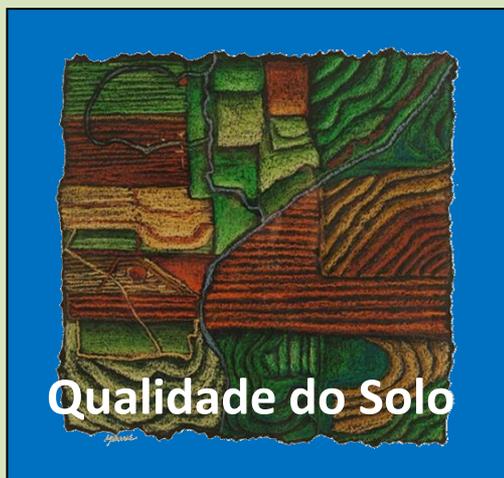
Triple Bottom Line ou **Tripé da Sustentabilidade** (Elkington, 1994)



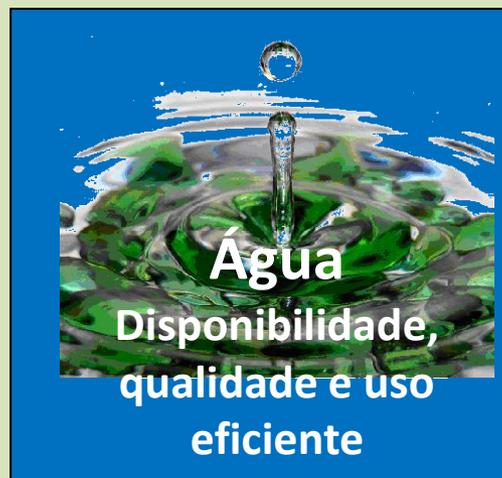
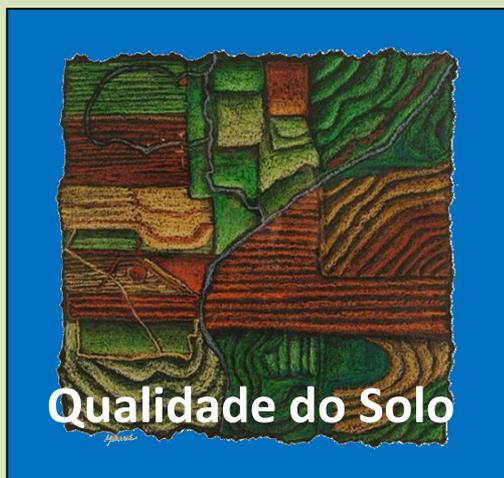
Triple Bottom Line ou **Tripé da Sustentabilidade** (Elkington, 1994)



Indicadores da sustentabilidade ambiental



Indicadores da sustentabilidade ambiental



$$\text{Pegada de carbono} = \text{Emissões de GEE} - \text{Fixações}$$

$$\text{Pegada de carbono} = \text{Emissões de GEE} - \text{Fixações}$$

**Pegada
de
carbono**

=

Emissões de GEE

—

Fixações

g CO₂eq kg açúcar⁻¹

g CO₂eq L etanol⁻¹

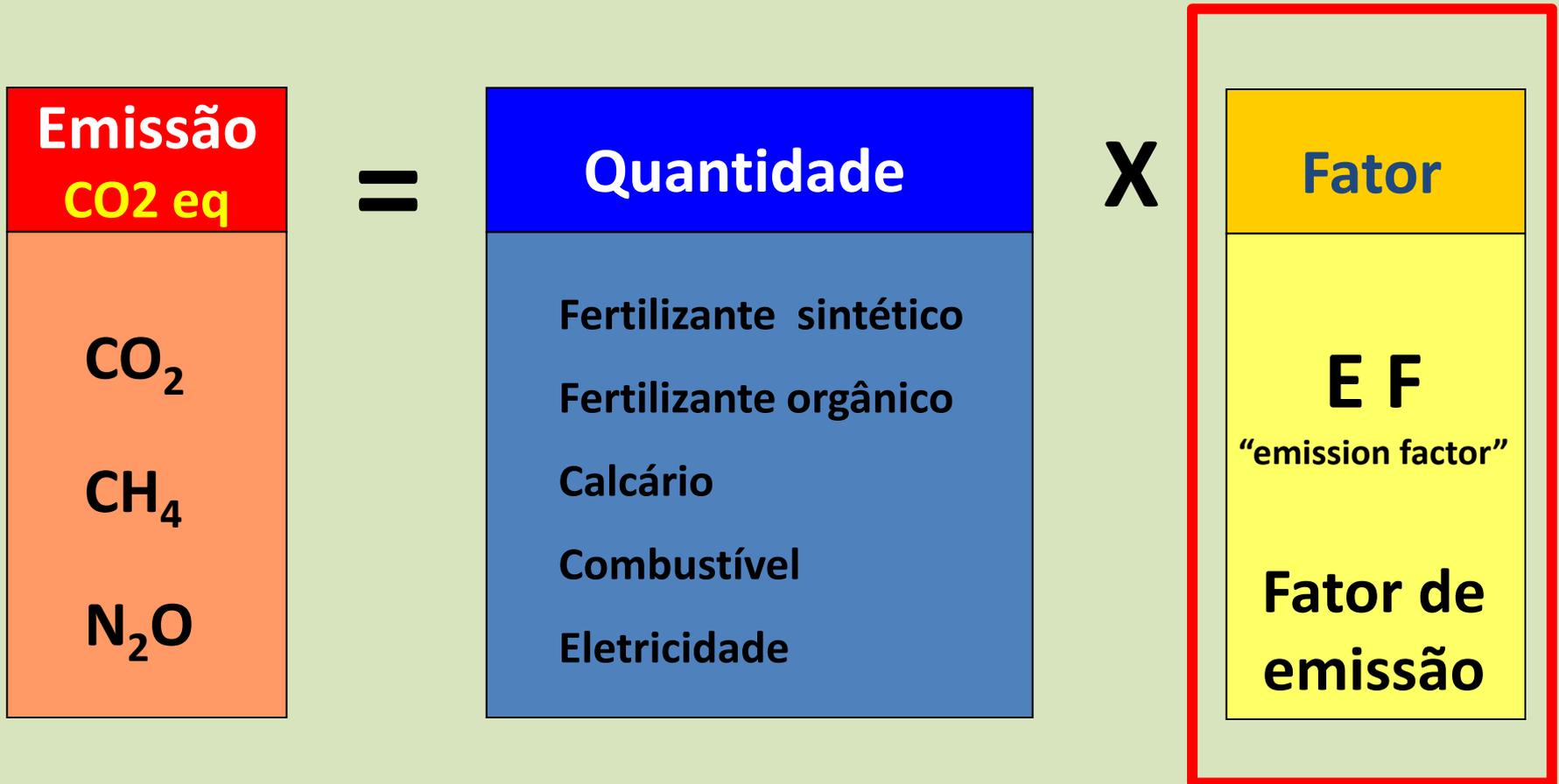
**preparo do solo,
fertilizantes, calcário,
palha, bagaço, vinhaça,
torta de filtro,
combustíveis fósseis
eletricidade,
outros**

**solo
plantas**

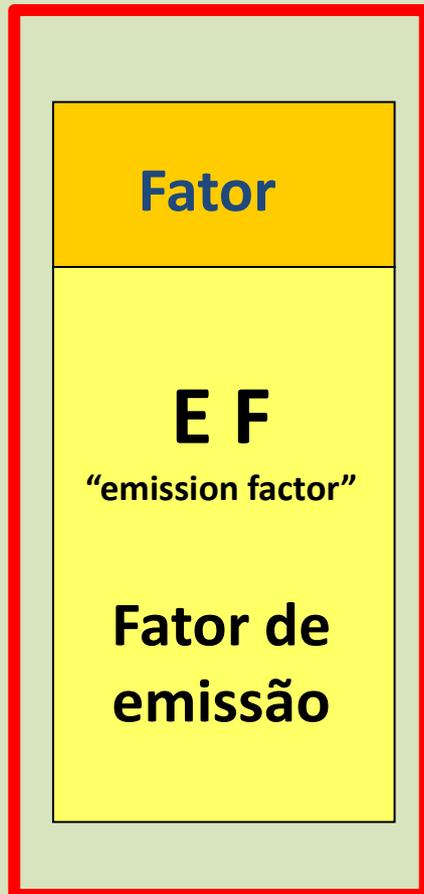
**Carbon
intensity**

g CO₂eq MJ etanol⁻¹

Princípio do cálculo das emissões



Princípio do cálculo das emissões



- "Default": dados da Literatura
- Medidas diretas no campo

Emissões de GEE no ciclo de vida da cana-de-açúcar na produção de açúcar e etanol









Amostragem de metano emitido pela vinhaça



**Fluxos de gases do
efeito estufa :
medição contínua e
acurada em tempo real**





**Ações para a redução das emissões
de GEE e fixação de carbono no solo
no agrossistema cana-de-açúcar
produtor de etanol**

REDUÇÃO

**Pegada
de
carbono**

=

Emissões de GEE

—

Fixações

solo

g CO₂eq kg açúcar⁻¹

g CO₂eq L etanol⁻¹

g CO₂eq MJ etanol⁻¹

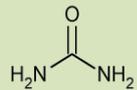
preparo do solo,
fertilizantes, calcário,
palha, bagaço, vinhaça,
torta de filtro,
combustíveis fósseis
eletricidade,
outros

O N_2O emitido por fertilizantes nitrogenados é o maior responsável pela pegada de carbono na fase agrícola da produção do etanol

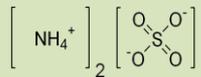


Emissão de N₂O por fertilizantes nitrogenados

Convencional



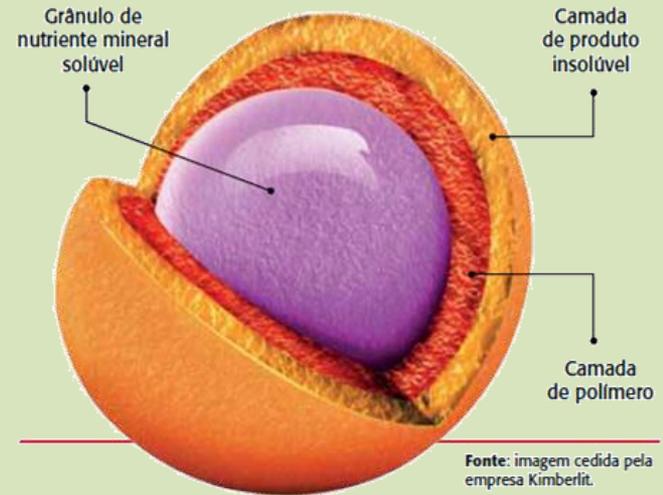
URÉIA



SULFATO DE AMÔNIA

N₂O

Revestidos



- Liberação gradual reduz lixiviação e emissão de N₂O;
- Reduz os custos de produção;
- Maior tolerância das plântulas à proximidade do fertilizante;
- Liberação lenta promove nutrição e crescimento mais uniforme das plantas;

AUMENTO

**Pegada
de
carbono**

=

Emissões de GEE

—

**Fixações
solo**

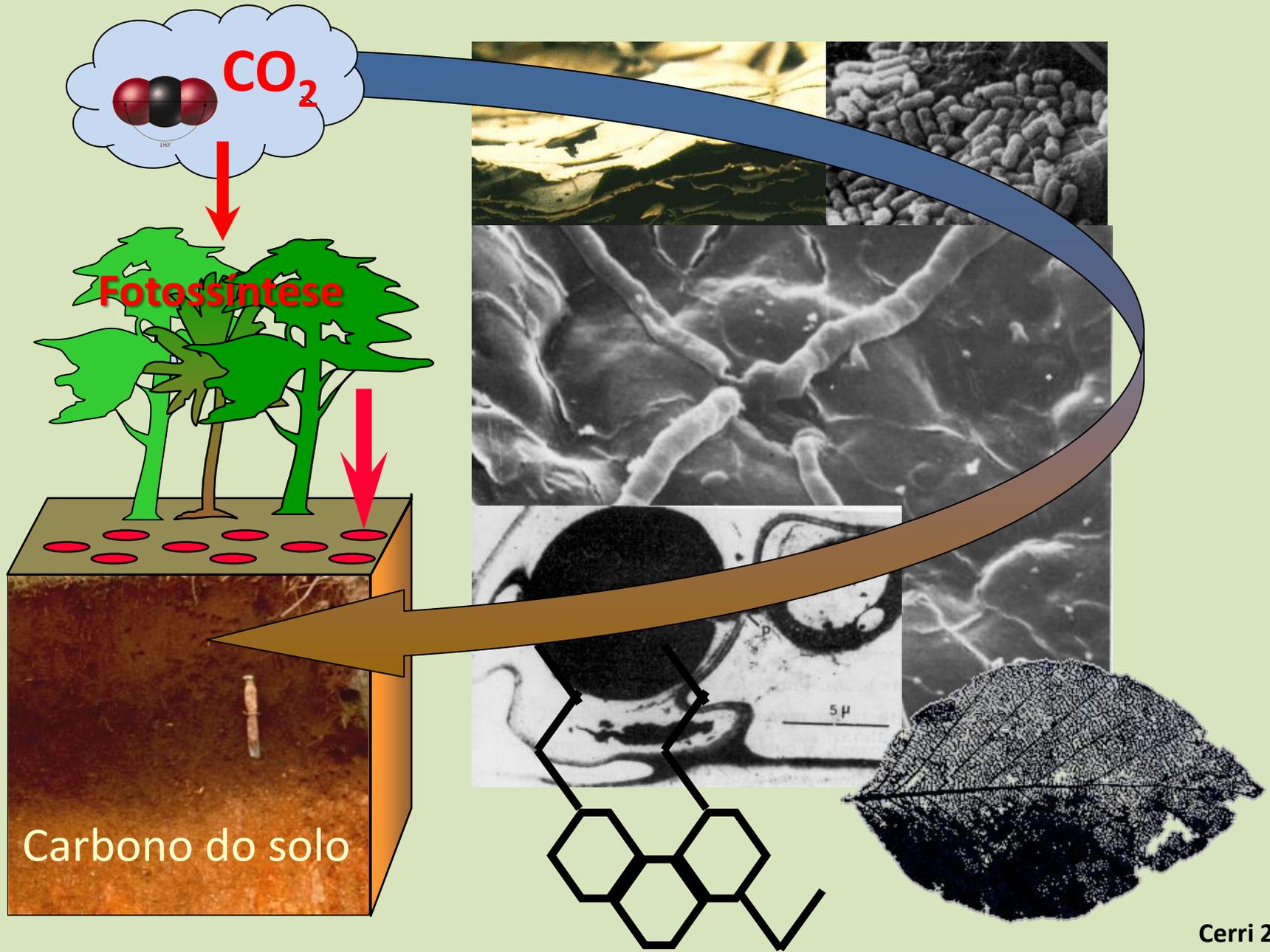
g CO₂eq kg açúcar⁻¹

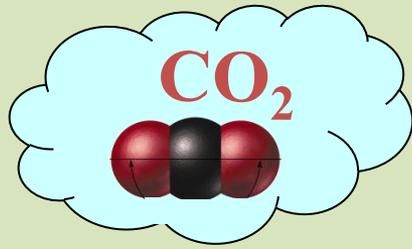
g CO₂eq L etanol⁻¹

g CO₂eq MJ etanol⁻¹

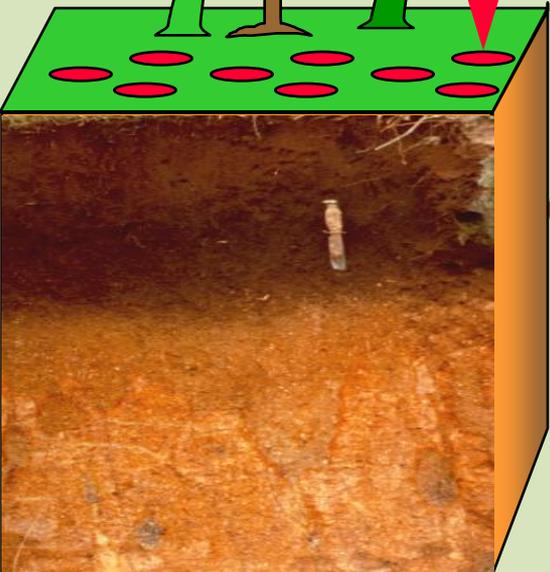
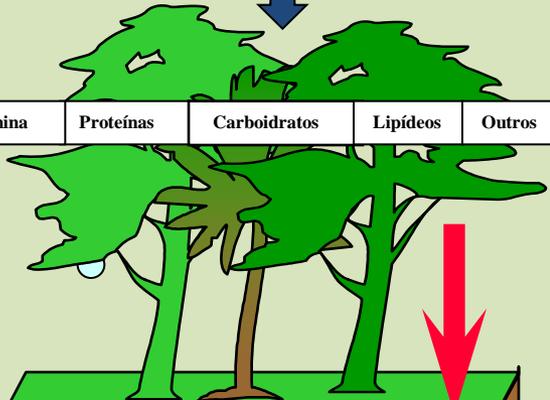
**preparo do solo,
fertilizantes, calcário,
palha, bagaço, vinhaça,
torta de filtro,
combustíveis fósseis
eletricidade,
outros**

FIXAÇÃO DE CARBONO NO SOLO

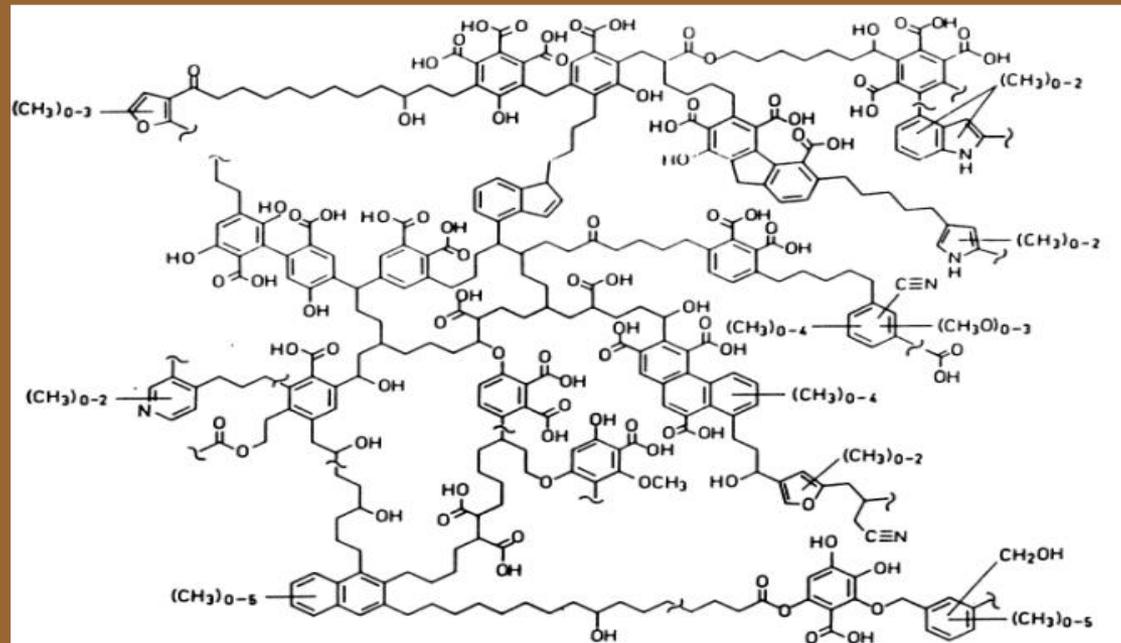




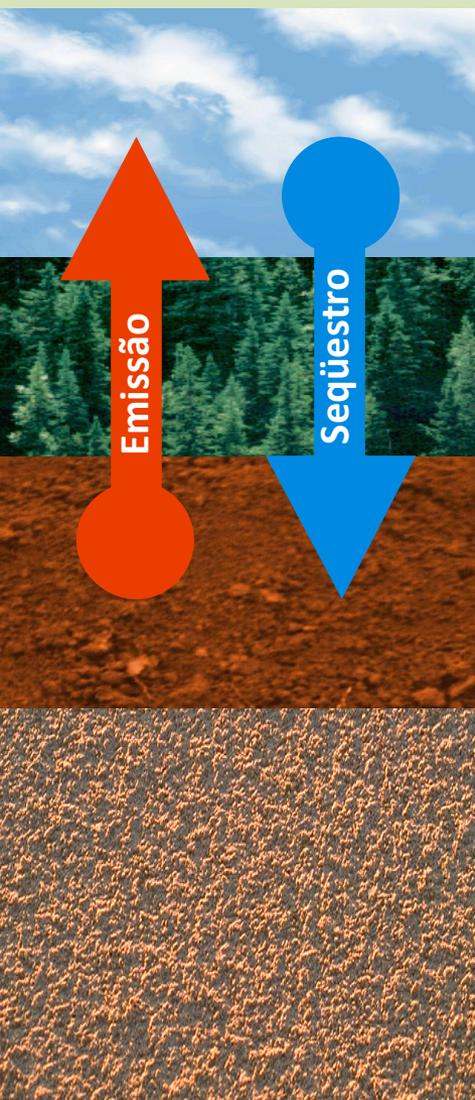
Lignina	Proteínas	Carboidratos	Lípídeos	Outros
---------	-----------	--------------	----------	--------



Substâncias húmicas



Importância do solo no ciclo global do C



		Pg
Atmosfera	760	- Δ
Vegetação	470-655	
Solo (0-30cm)	~800	
Solo (1m)	1500-2000	

Valores em Gt de C (1Gt = 10^9 t = 1 Pg)



Termo “Sequestro”

Inglês: Sequester (≠ kidnap!)

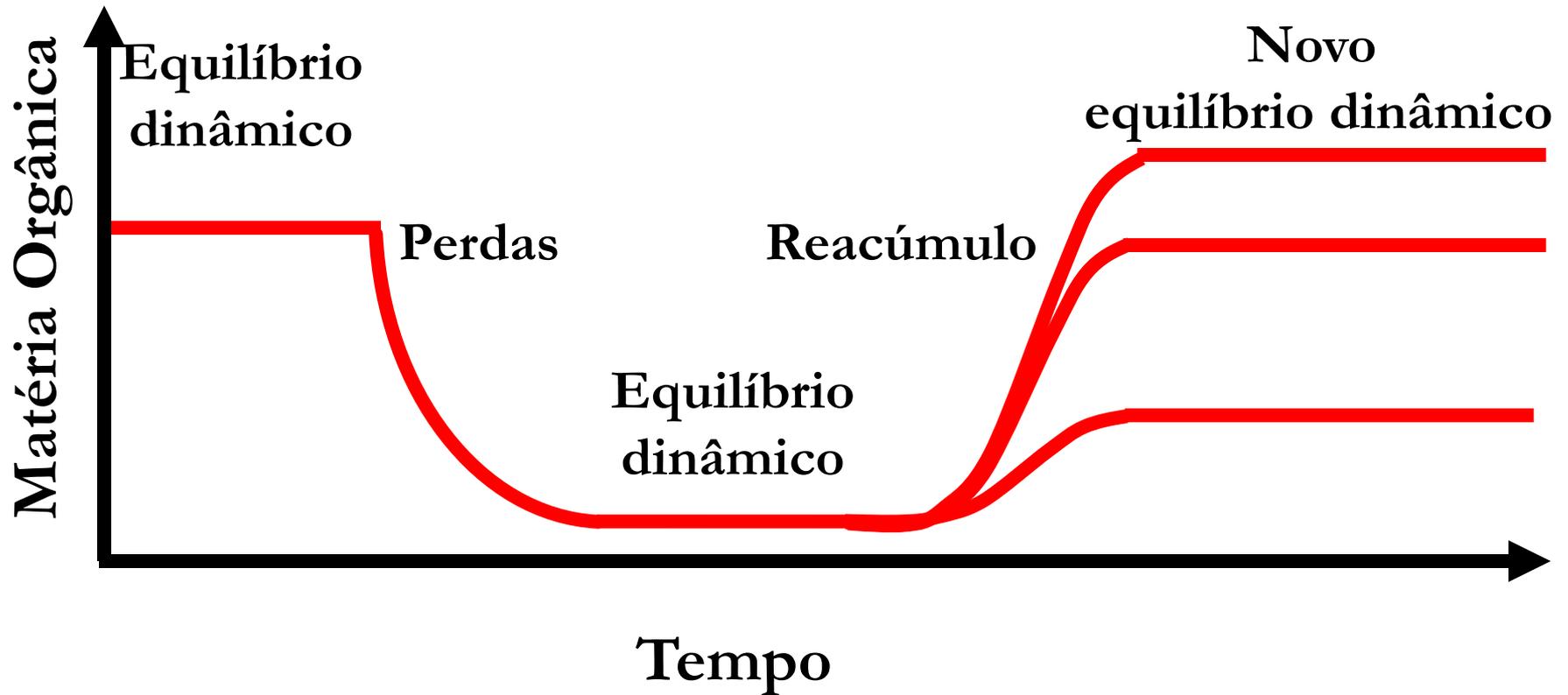
“Sequestro de C no solo” é a soma algébrica direta e indireta dos fluxos de gases do efeito estufa entre a atmosfera e solo

-os fluxos de CO_2 podem ser estimados pela variação dos estoques de carbono orgânico do solo,

- os fluxos de CH_4 e N_2O podem ser expressos em unidade “equivalente C- CO_2 ”, levando em consideração o potencial de aquecimento global de cada um dos gases do efeito estufa



Conceito



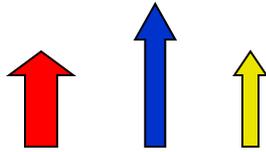
Aumento do estoque de C no solo = sequestro ?

Sequestro de C: bases teóricas



Sistema A

CO₂ CH₄ N₂O



Carbono
do solo

*Gases do
Efeito Estufa*



Sistema B

CO₂ CH₄ N₂O

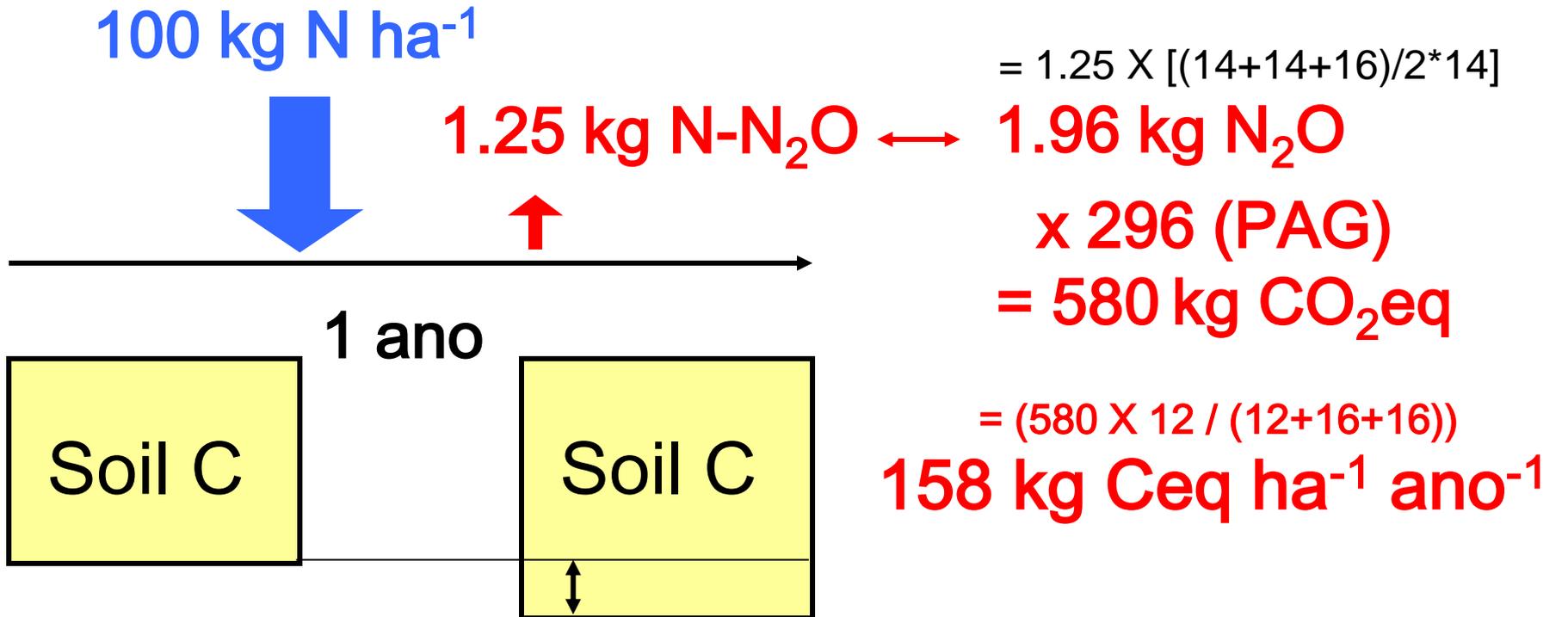


Carbono
do solo

Unidade Equivalente (Ceq)



Exemplo da fertilização nitrogenada



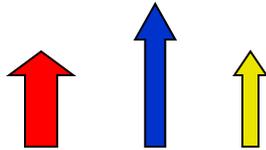
$\Delta C > 158 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para ser benéfico

Sequestro de C: bases teóricas



Sistema A

CO₂ CH₄ N₂O

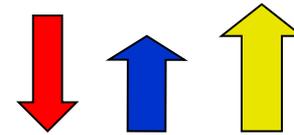


Carbono
do solo

*Gases do
Efeito Estufa*

Sistema B

CO₂ CH₄ N₂O



Carbono
do solo

Unidade Equivalente (Ceq)

Para contabilização completa
("full account") incluir também:

Combustível (máquinas, transporte)
Materia prima diferente
Calagem, pesticidas...

Sequestro de C: bases teóricas



Net Impact on GHG emissions: Results – national average emissions

Gross carbon dioxide emissions from corn crop using three tillage intensities

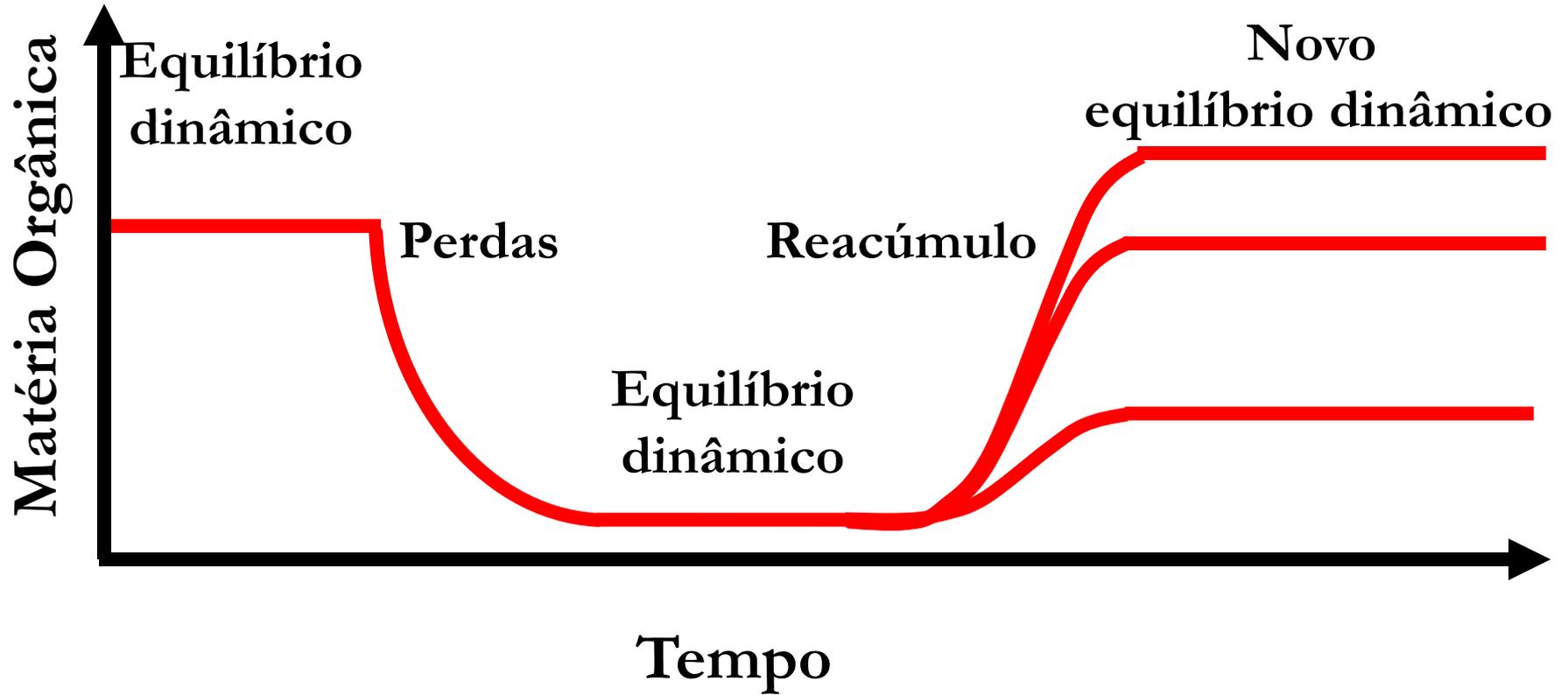
	acres treated	Conventional till	Minimum till	No-till
	%	kg C/ha/yr		
Agricultural machinery:				
Moldboard plow	-	26.75	-	-
Disc (twice)	-	17.44	17.44	-
Planting	-	6.79	6.79	6.79
Single cultivation	-	4.57	4.57	-
Pesticide application	-	2.73	2.73	2.73
Harvest w/ combine	-	16.47	16.47	16.47
Machine total	-	74.75	48.00	25.99
Crop inputs¹:				
Herbicide PPTA ²	96	14.02	15.31	18.77
Insecticide PPTA	24	5.39	4.63	3.70
N PPTA	96	108.28	148.93	151.15
P ₂ O ₅ PPTA	81	15.21	17.96	17.06
K ₂ O PPTA	72	17.12	21.79	19.70
CaCO ₃ PPTA	5	401.32	401.32	401.32
Seed production	100	50.36	50.36	50.36
Irrigation (m/ha)	15	164.57	149.14	128.57
Crop input total	n/a	234.92	286.89	283.52
TOTAL	n/a	309.67	334.89	309.51

Sequestro de C: bases teóricas

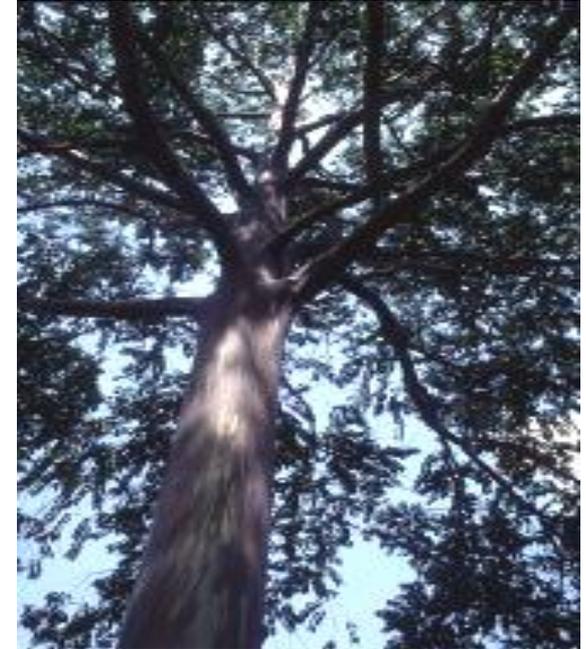
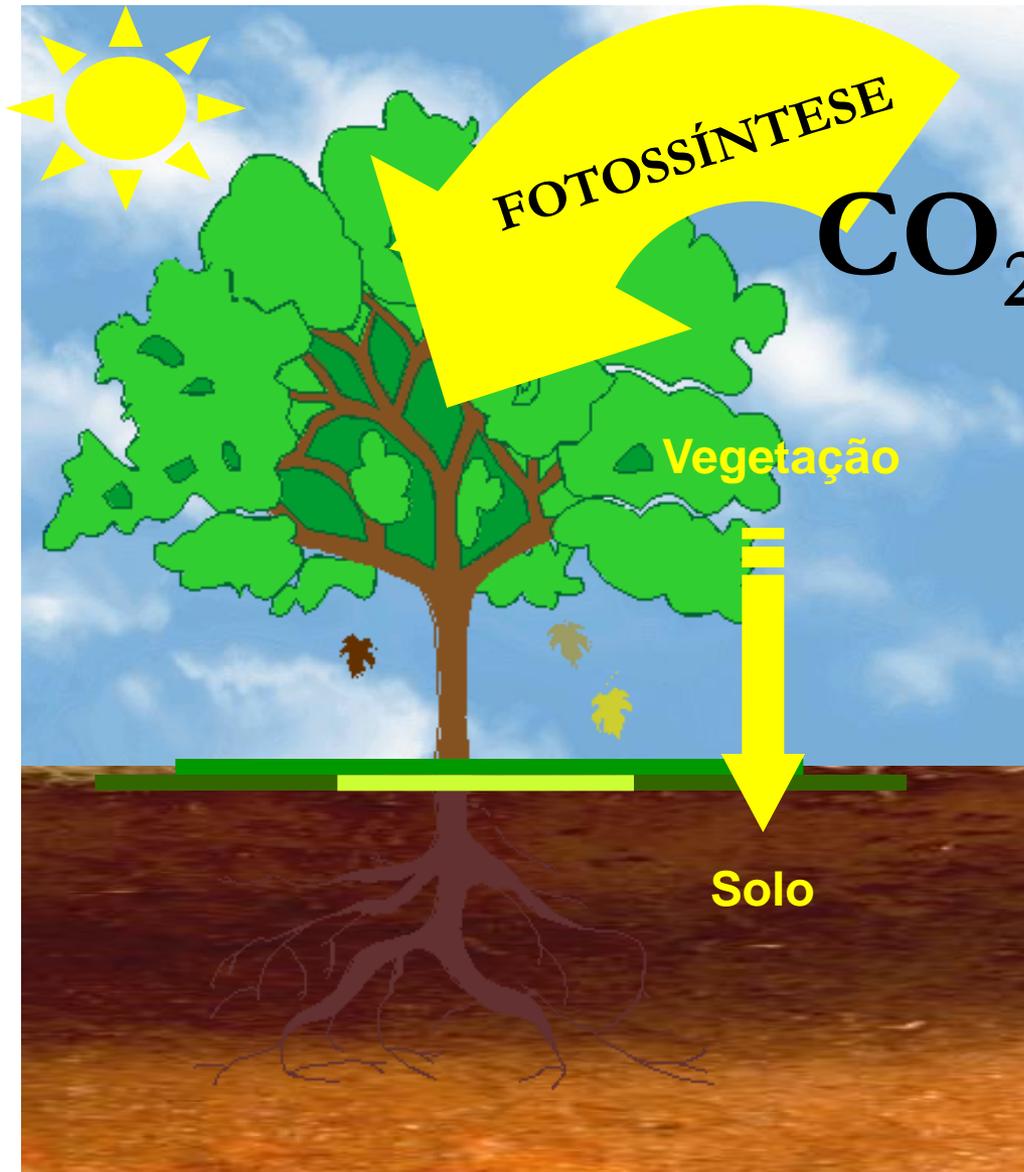


Conceito

Limite!



Mecanismos de sequestro de C no solo





Principais processos:

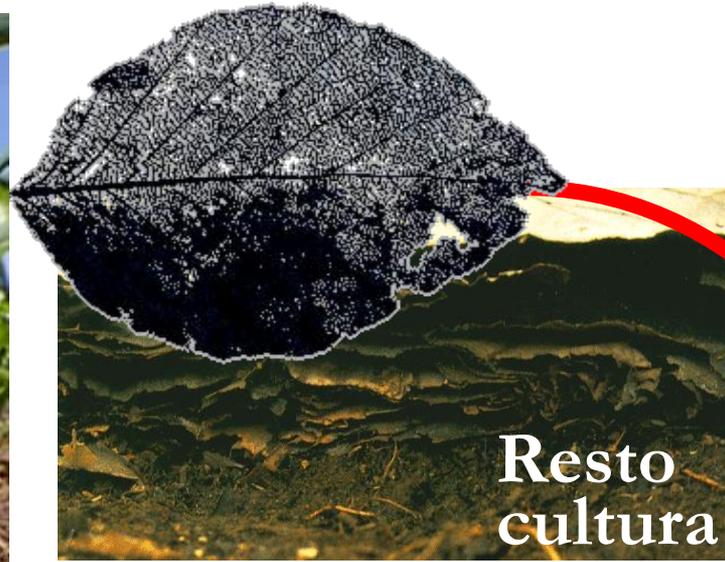
- Humificação de materiais orgânicos
- Deposição profunda de materiais orgânicos abaixo da zona de aração
- Agregação (complexos organo-minerais) etc...



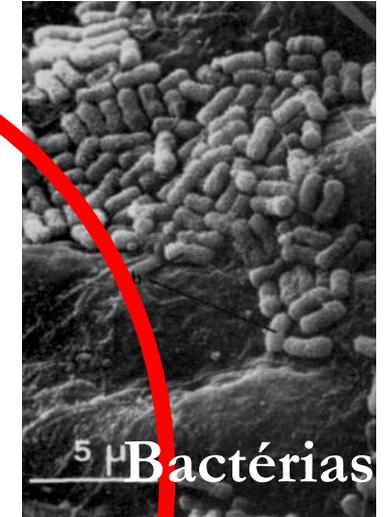
Principais processos:

- **Humificação de materiais orgânicos**
- Deposição profunda de materiais orgânicos abaixo da zona de aração
- Agregação (complexos organo-minerais) etc...

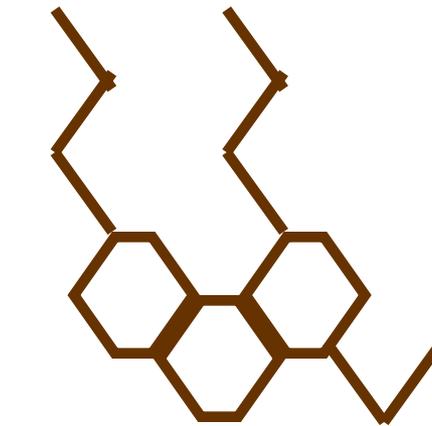
Mecanismos de sequestro de C no solo



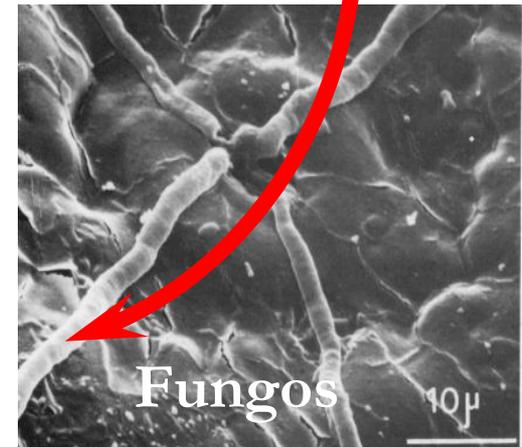
Resto cultura



5 μ Bactérias



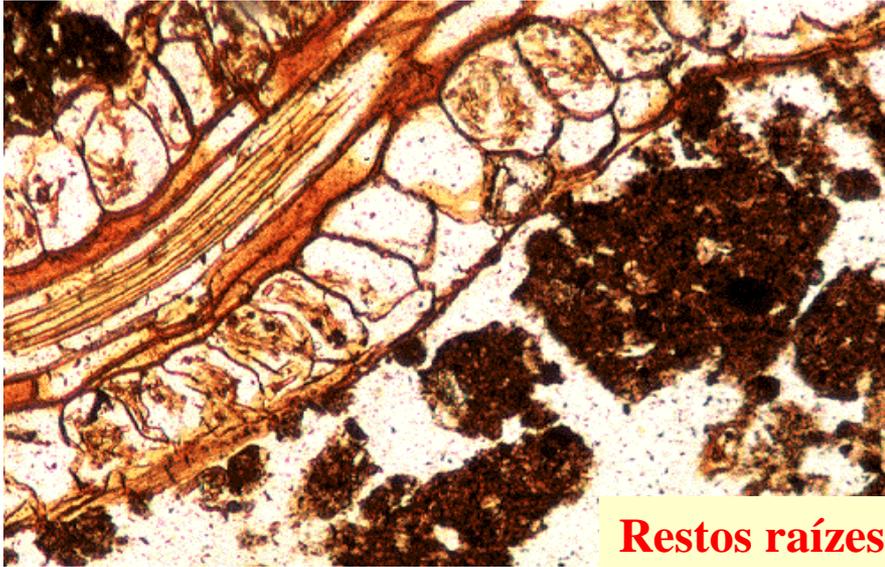
Humus



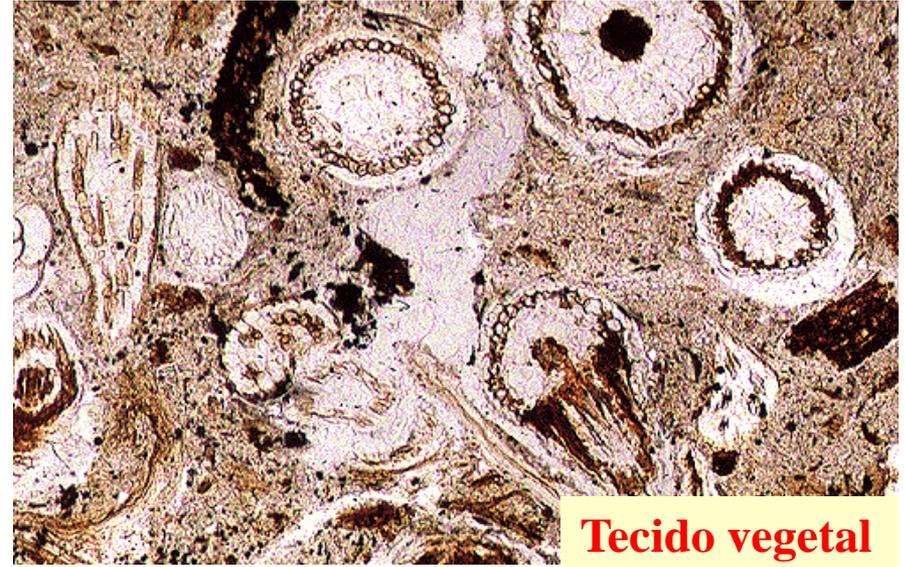
Fungos

10 μ

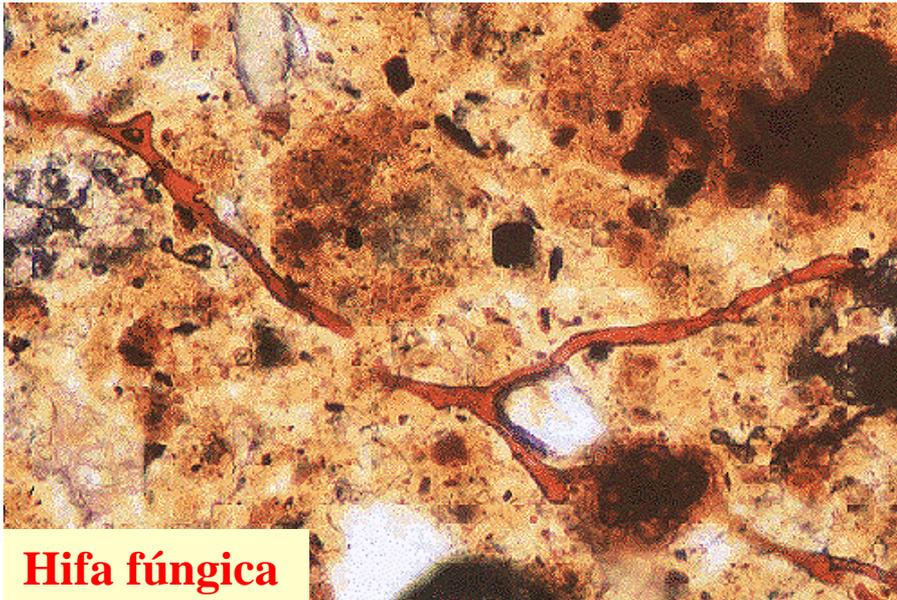
Mecanismos de sequestro de C no solo



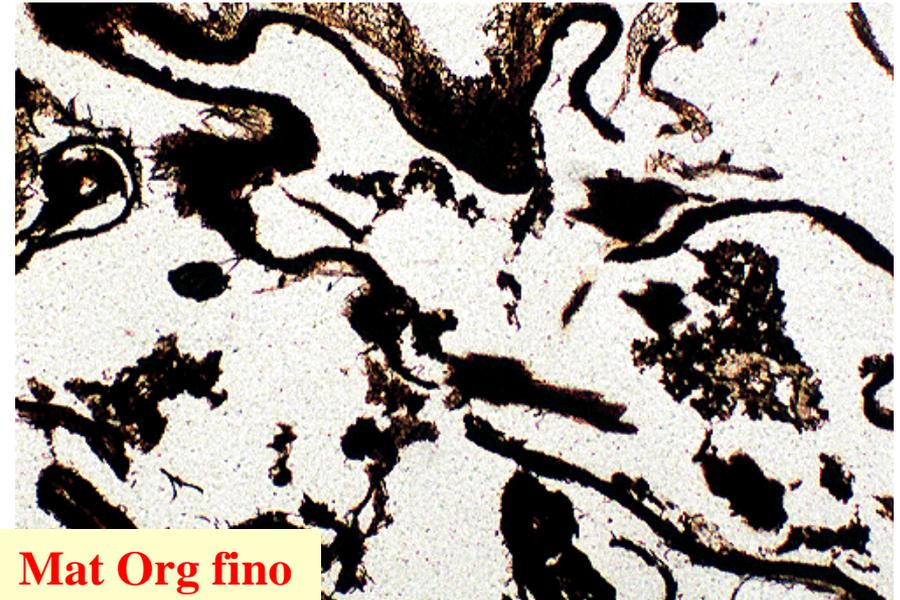
Restos raízes



Tecido vegetal



Hifa fúngica



Mat Org fino



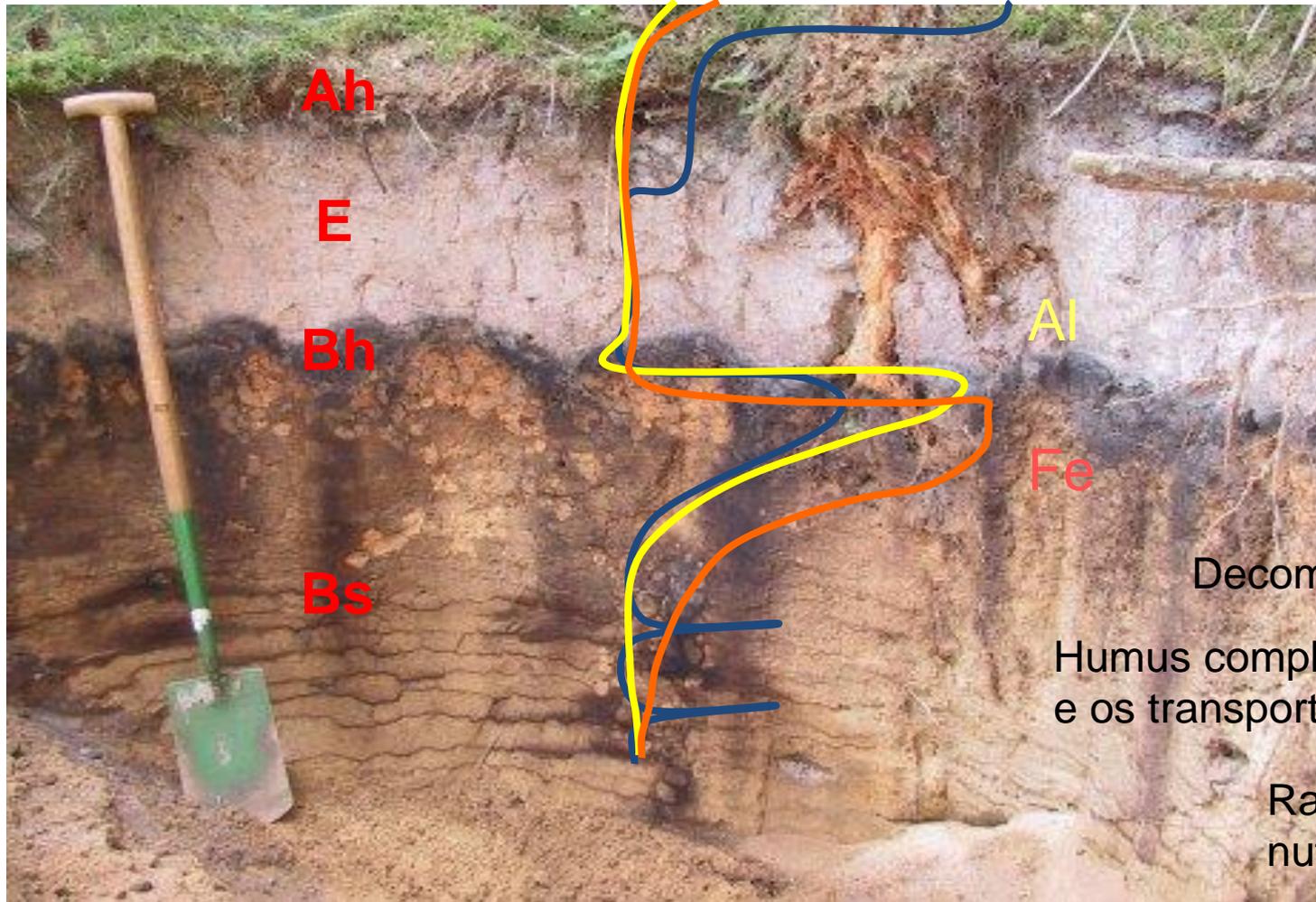
Principais processos:

- Humificação de materiais orgânicos
- **Deposição profunda de materiais orgânicos abaixo da zona de aração**
- Agregação (complexos organo-minerais) etc...



Podzol

C



Ah

E

Bh

Bs

Al

Fe

Decomposição liteira

Humus complexa Fe e Al
e os transporta para baixo

Raízes procuram
nutrientes



Podzol





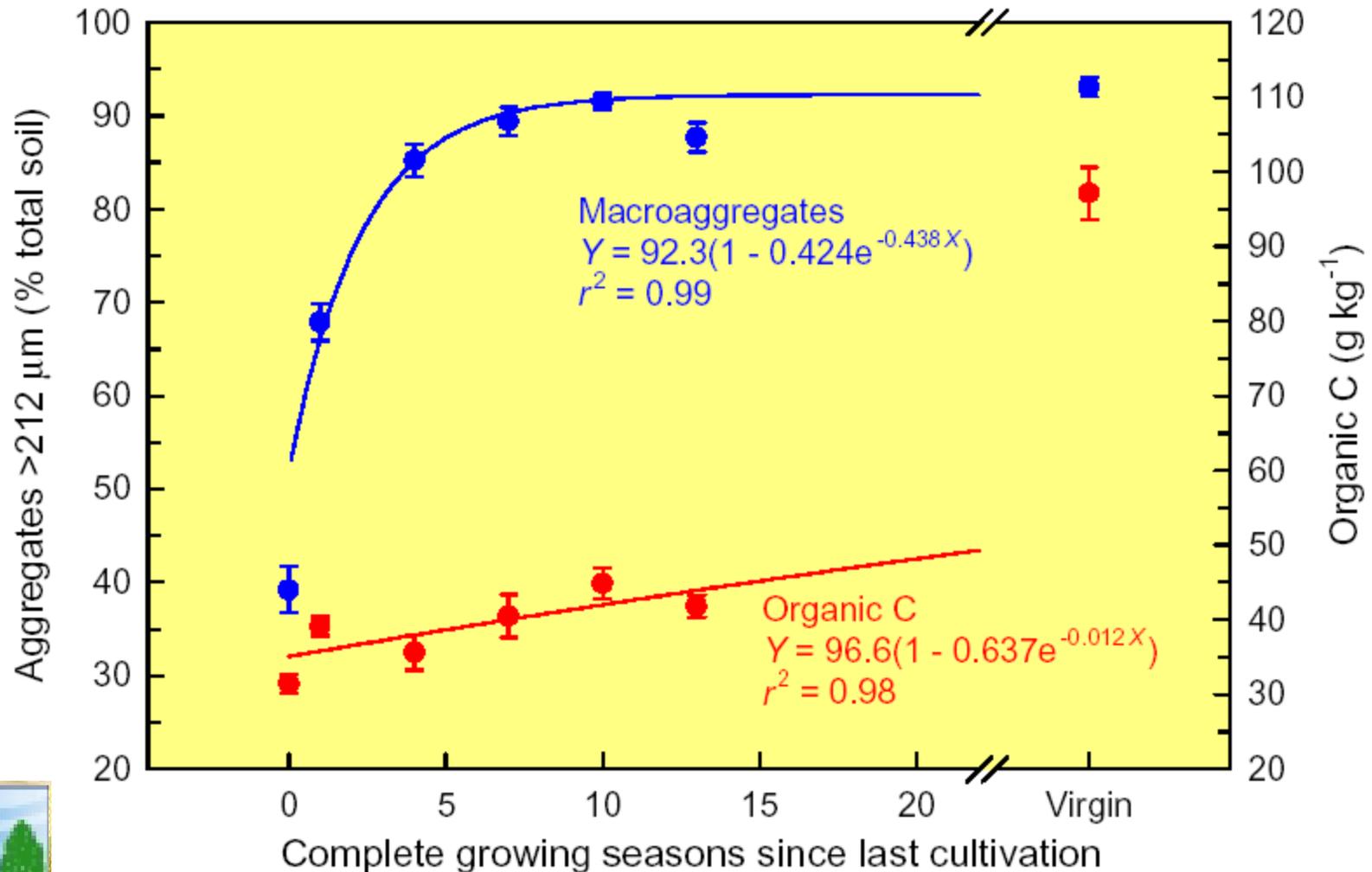
Principais processos:

- Humificação de materiais orgânicos
- Deposição profunda de materiais orgânicos abaixo da zona de aração
- **Agregação (complexos organo-minerais)** etc...

Mecanismos de sequestro de C no solo



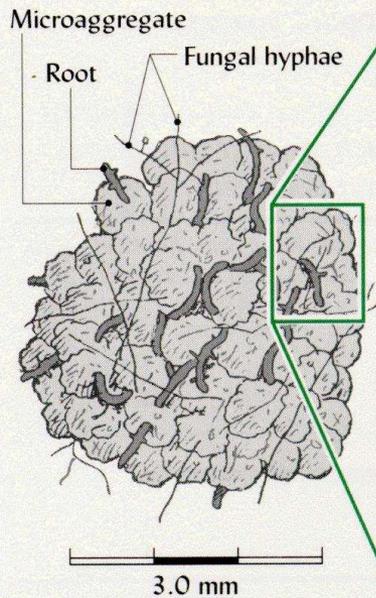
Changes in Aggregation and Organic Carbon in a Prairie Soil



Mecanismos de sequestro de C no solo

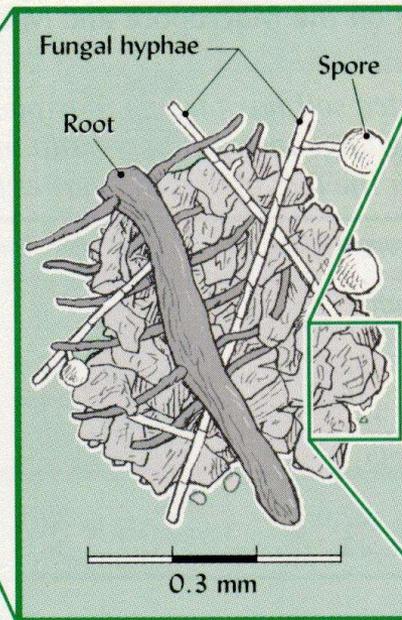


Propriedades	Observações	Efeito sobre o solo
Combinação com minerais de argila	Cimentam partículas do solo em unidades estruturais chamadas de agregados	Permite trocas gasosas, Estabilidade estrutural, Aumenta a permeabilidade



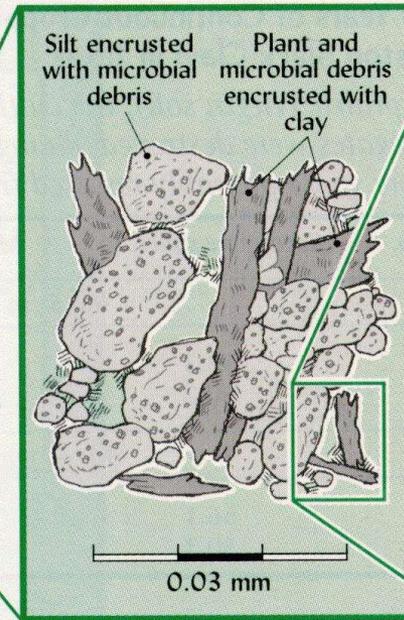
Macroaggregate

- Roots
- Hyphae



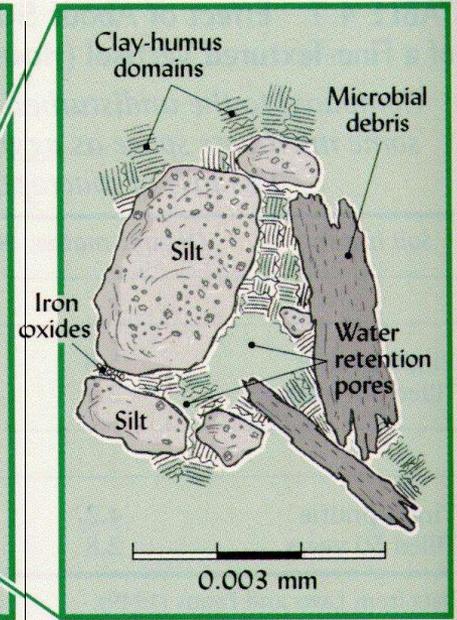
Microaggregate

- Root hairs
- Hyphae
- Polysaccharides



Submicroaggregate

- Mineral grains encrusted with plant and microbial debris
- Plant debris coated with clay

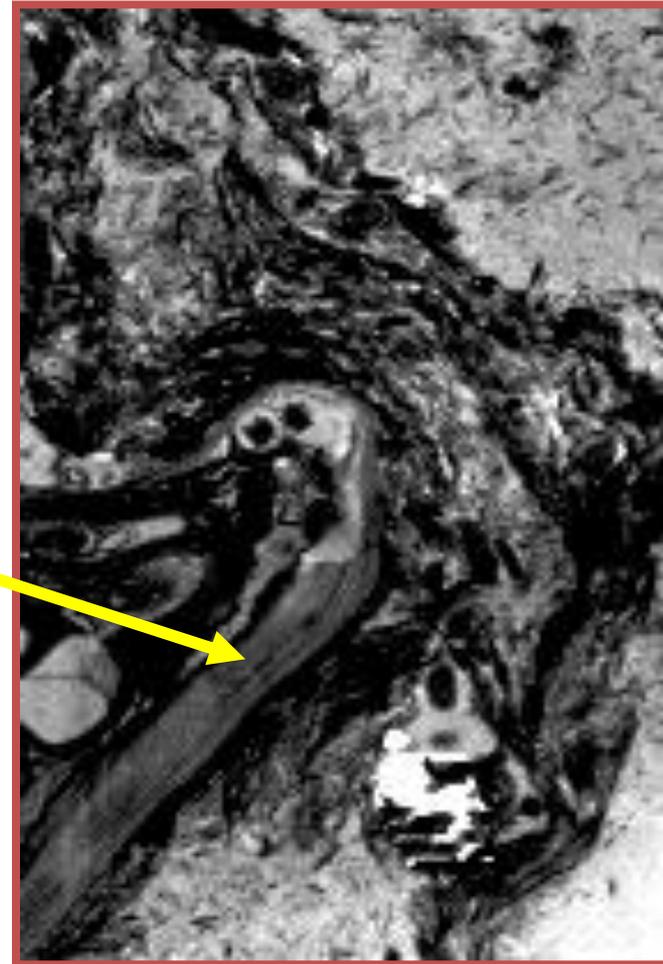


Primary particles

- of silt, clay and humus
- Clay and clay-humus domains



Localização da Matéria Orgânica nos Macro e Micro-Agregados



Agregado com resíduos vegetais

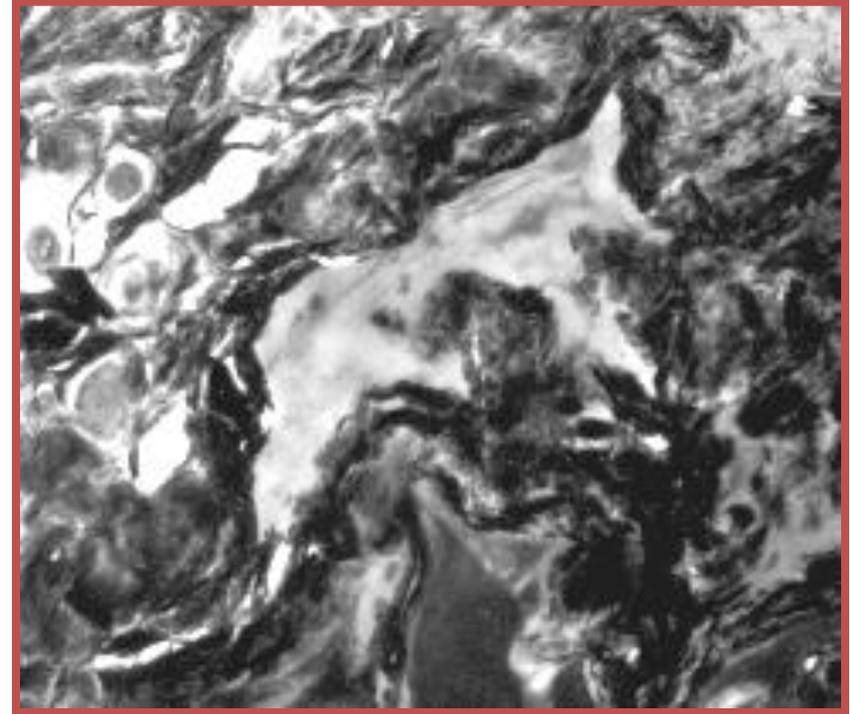
Mecanismos de sequestro de C no solo



Localização da Matéria Orgânica nos Macro e Micro-Agregados



Micro-agregado bacterianos

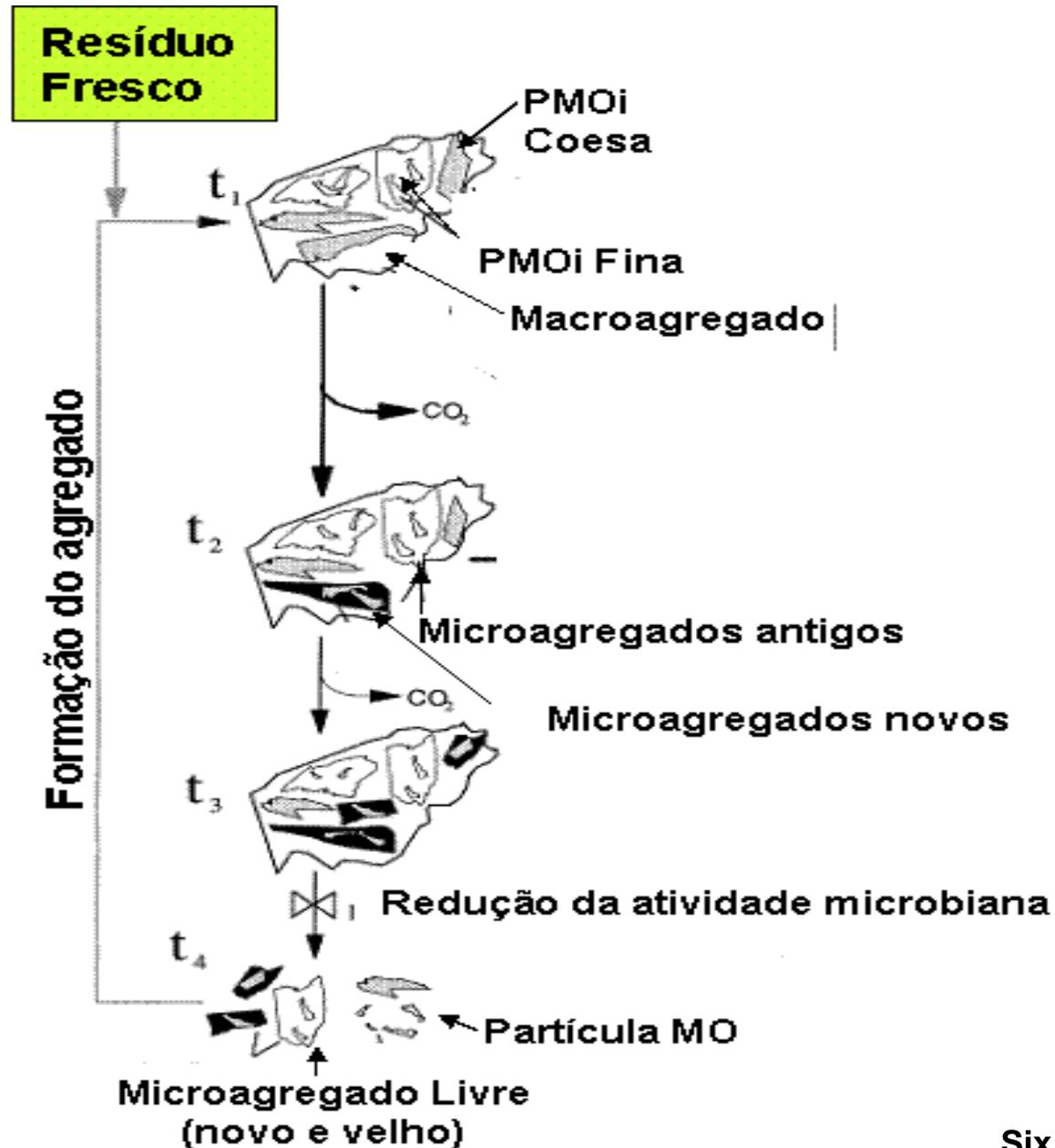


*Micro-agregado com
MO amorfa*

Mecanismos de sequestro de C no solo



Modelo conceitual do ciclo de vida do macro-agregado e da formação do microagregado





Estimativa do “turnover” da matéria orgânica nos agregados do solo

Matéria Orgânica nos agregados	Tempo estimado (anos)
Solo não agregado	1-7
Macroagregados (>250 um)	1-23
Microagregado (20-250 um)	3-80
Silte mais argila (<20 um)	5-1000

Carter (2001)

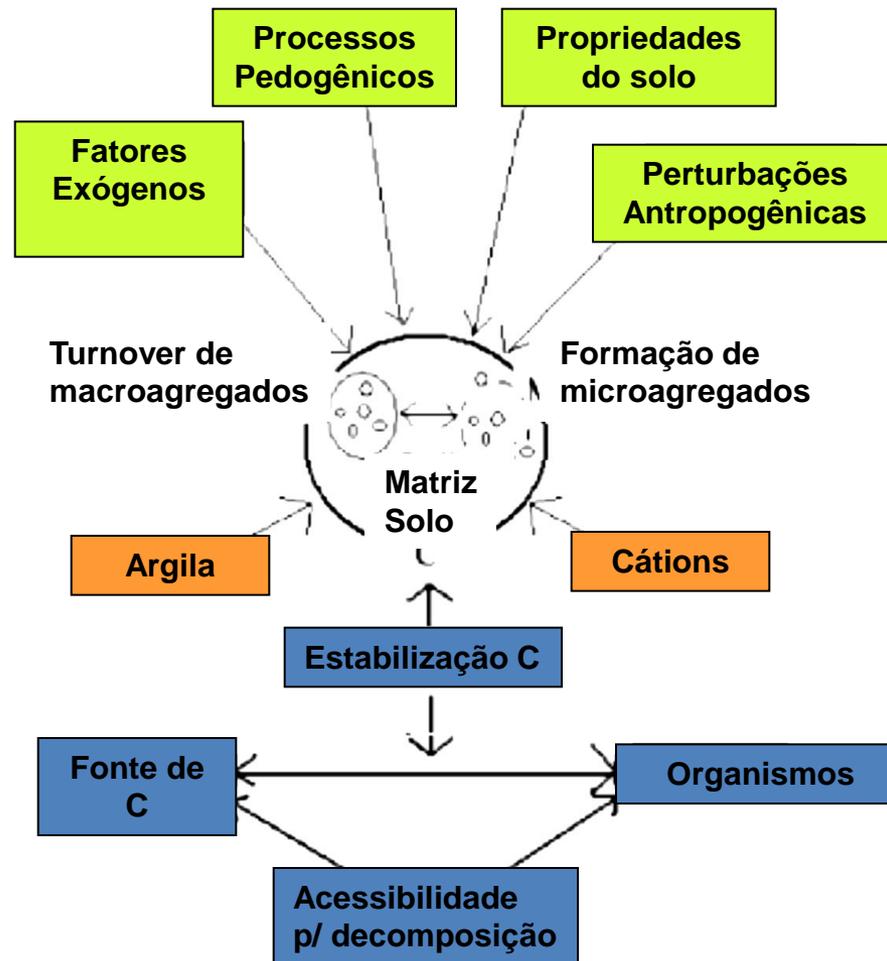
ESTABILIZAÇÃO: principal forma de sequestro de carbono no solo em longo prazo, tanto em condições de clima temperado como de clima tropical.

Denef et al., 2007

Mecanismos de sequestro de C no solo



Fatores que afetam a agregação do solo



Sequestro de C: bases teóricas



Sistema Plantio Direto

(Sequestro de C = ΔC no solo – fluxo de gases)

Solo	Local	ΔC	Gases(C-eq)	Taxa Sequestro
			Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹	
LV ¹	PR	1,62	0,26	1,36
LV ²	GO	1,26	0,34	0,94
LVA ³	RO	0,38	0,15	0,23

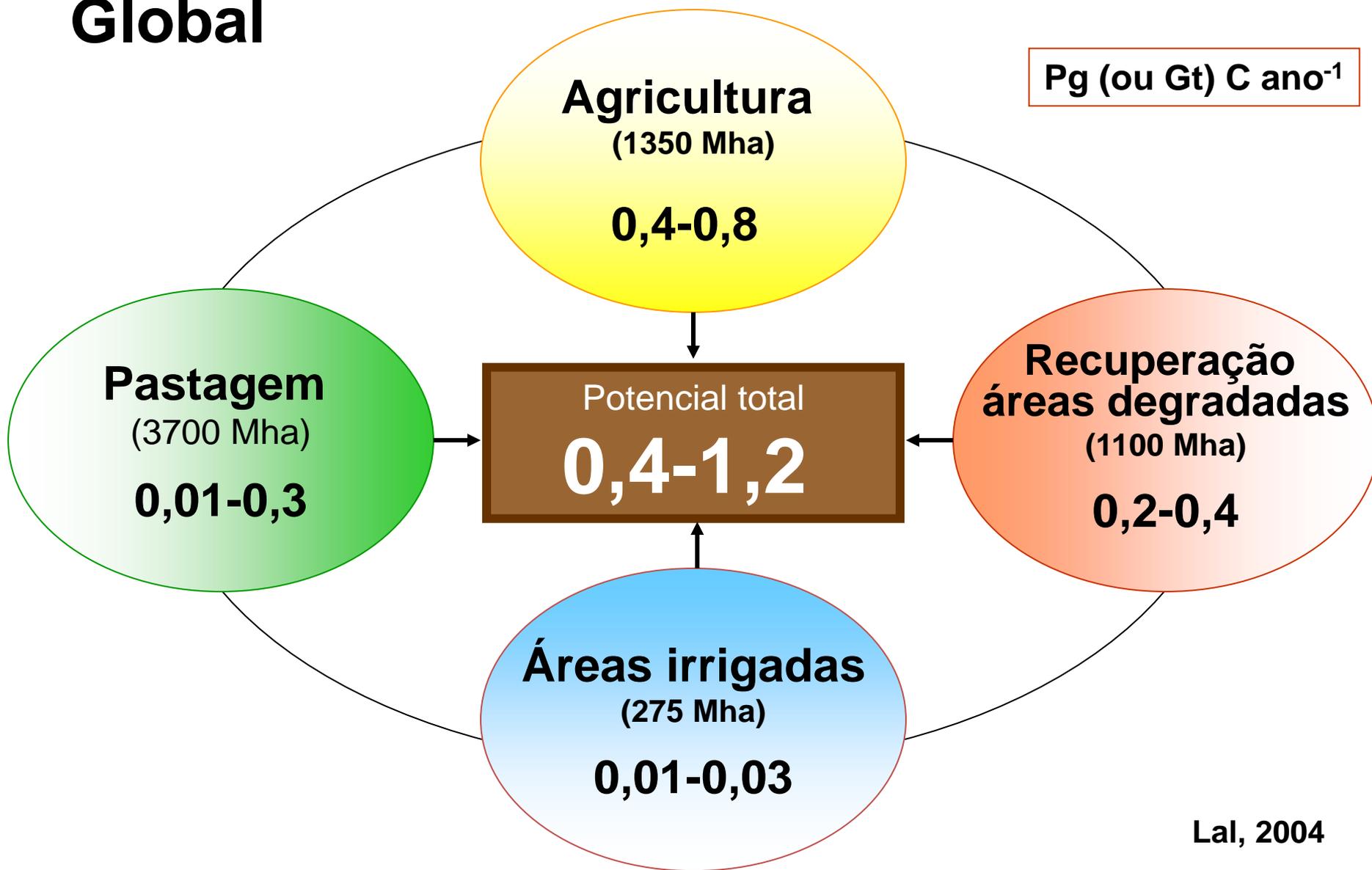
Fonte: Adaptado de ^{1,2}Siqueira Neto (2003 e 2006); ³(Carvalho, 2006)

Bernoux et al., 2006

Potencial de sequestro de C no solo



Global



Potencial de sequestro de C no solo



E U A Emissão total de GEEs: ~ 1600 Mt Ceq ano⁻¹

The Potential of U.S. Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect

30-100 Mt Ceq ano⁻¹

Área pastagem ~ 336 Mha



R.F. Follett • J.M. Kimble • R. Lal

The Potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect

270 Mt Ceq ano⁻¹

137 Mha, equivale a 8% área agrícola mundial

Sequestro C sob pastagem + agricultura
9-24% das emissões totais de GEE

erosão
combustível
restos culturais
ração racional

R. Lal • J.M. Kimble
R.F. Follett • C.V. Cole

Potencial de sequestro de C no solo



América Latina

13 Zonas Biogeoclimáticas

Potencial Sequestro C
0,1 - 0,2 Pg C ano⁻¹

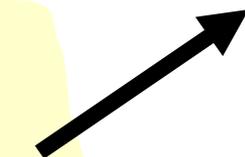
Taxa de sequestro
0,3-1,5 t C ha⁻¹ ano⁻¹



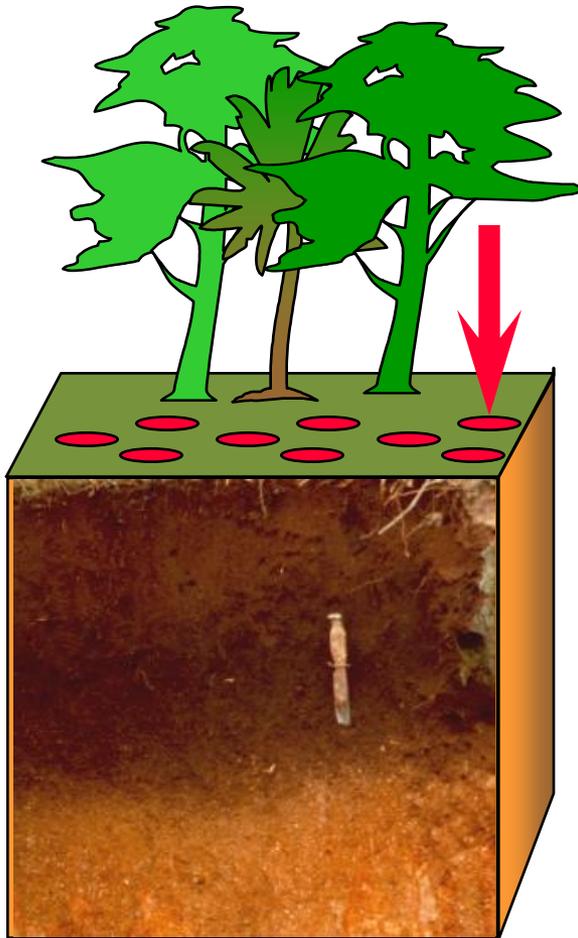
Potencial de sequestro de C no solo



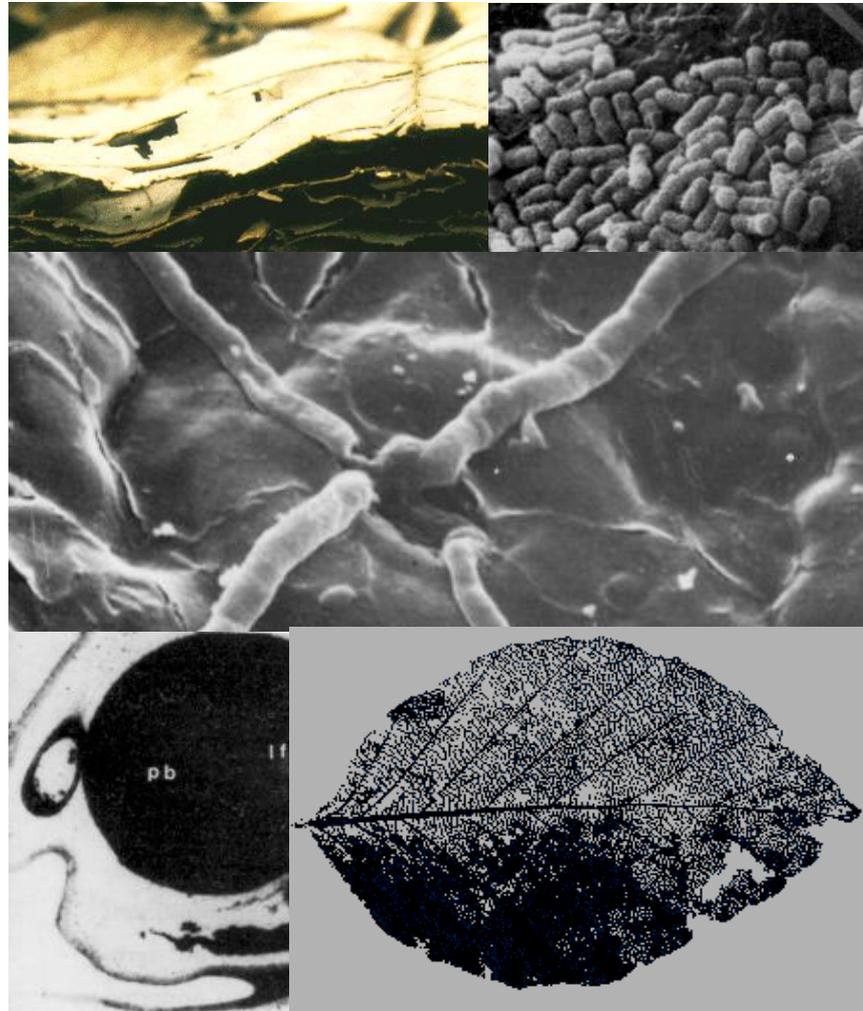
Amazônia



ORIGEM DO CARBONO NO SOLO



ÚNICA
ORIGEM



ISÓTOPO

ISOTOPO



“igual” “lugar”



Tabela Periódica

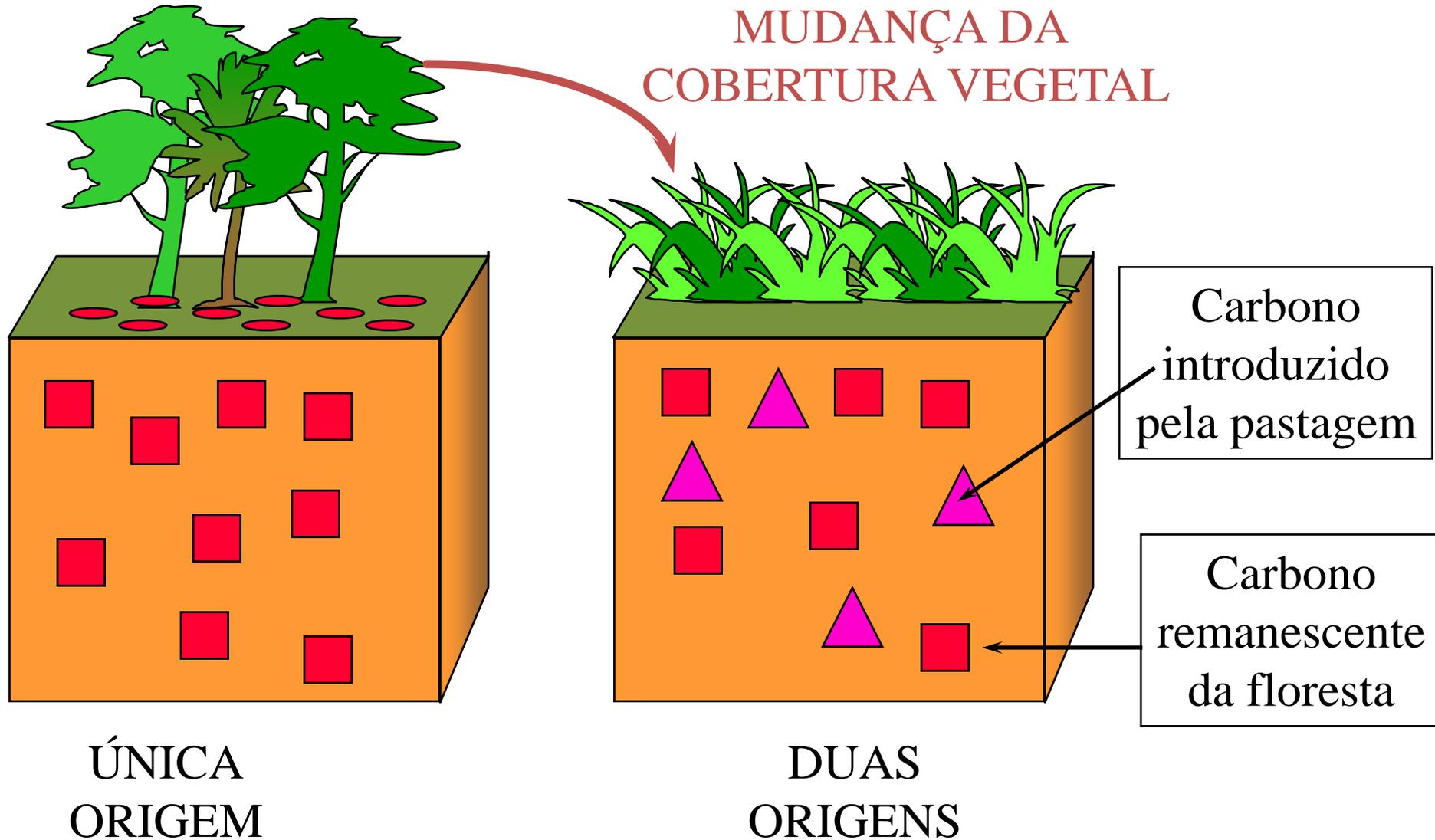
ISÓTOPOS

- *São variantes do mesmo elemento químico*
- *Mesmo número de Prótons,
diferentes números de Nêutrons*

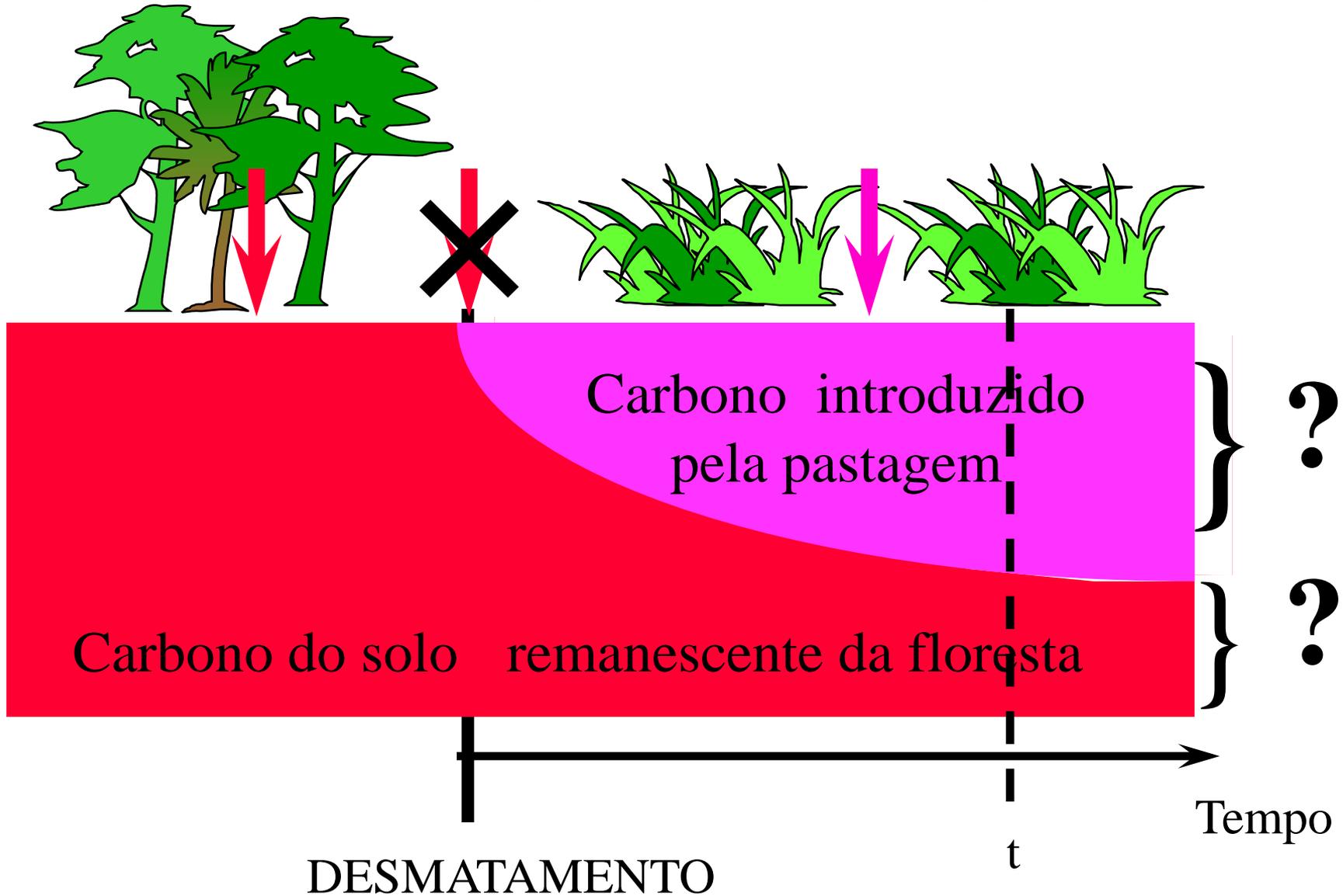
Isótopos de Carbono

	Prótons	Nêutrons
¹² C	6	6
¹³ C	6	7
¹⁴ C	6	8

ORIGEM DO CARBONO NO SOLO



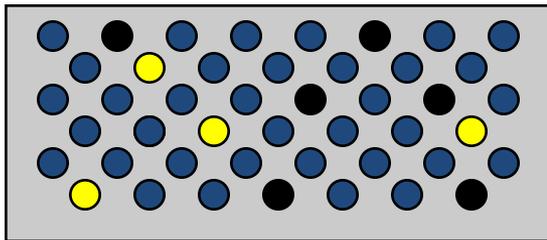
EVOLUÇÃO DO CARBONO NO SOLO APÓS DESMATAMENTO



INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE O ISOTÓPO UTILIZADO

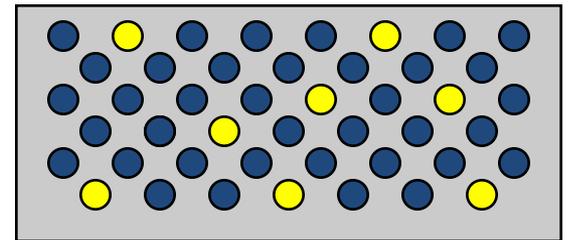
● EXPRESSÃO DA CONCENTRAÇÃO UNIDADES δ EM ‰

$$\delta = (R_{\text{amostra}} - R_{\text{PDB}}) R_{\text{PDB}} \times 1000$$



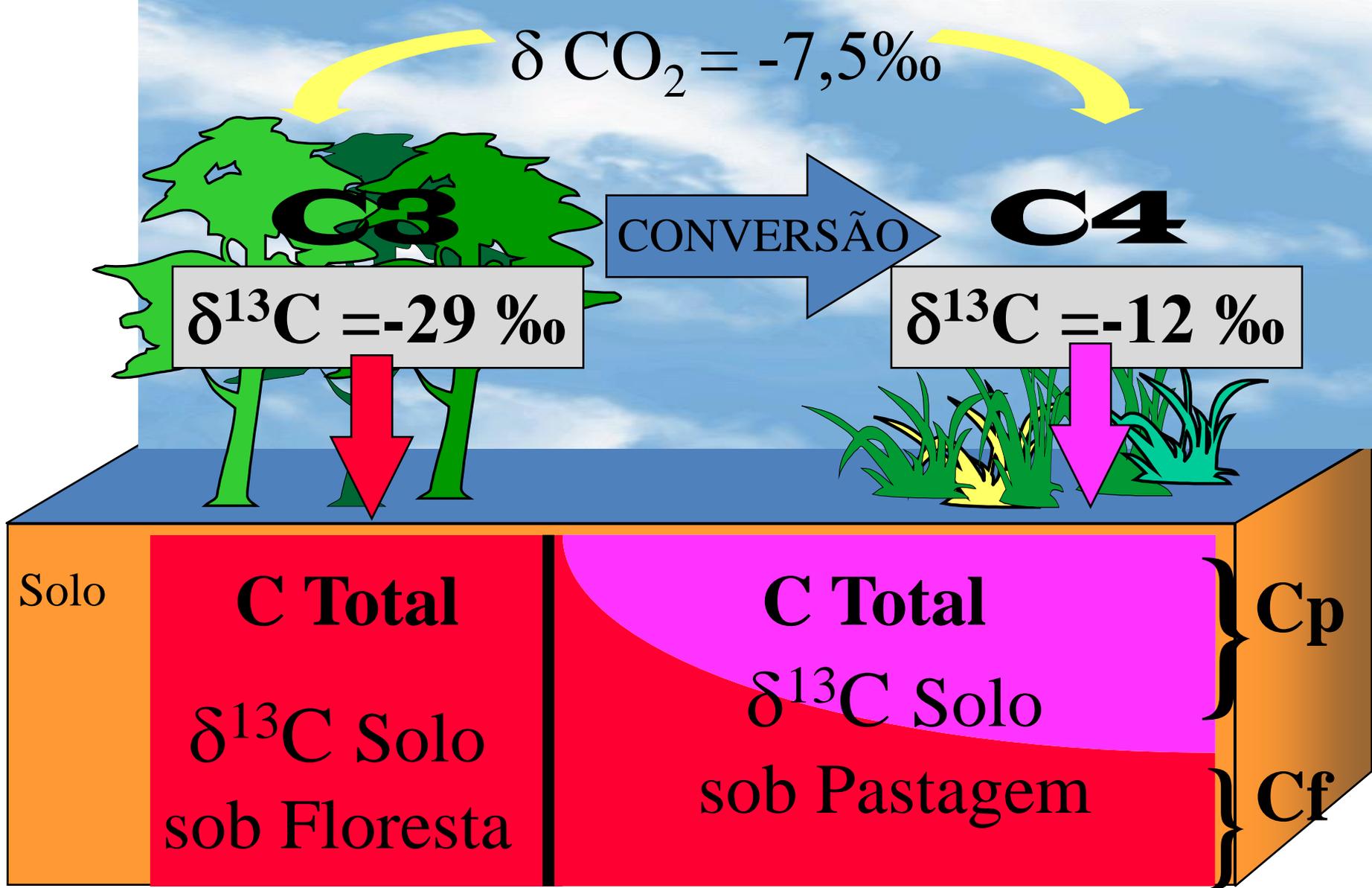
AMOSTRA

$$R = \frac{^{13}\text{C} \text{ (yellow circle)}}{^{12}\text{C} \text{ (blue circle)}}$$



PDB = REFERÊNCIA
INTERNACIONAL

VALORES NEGATIVOS



$$C_{\text{solo}} = C_{\text{f}} + C_{\text{p}}$$

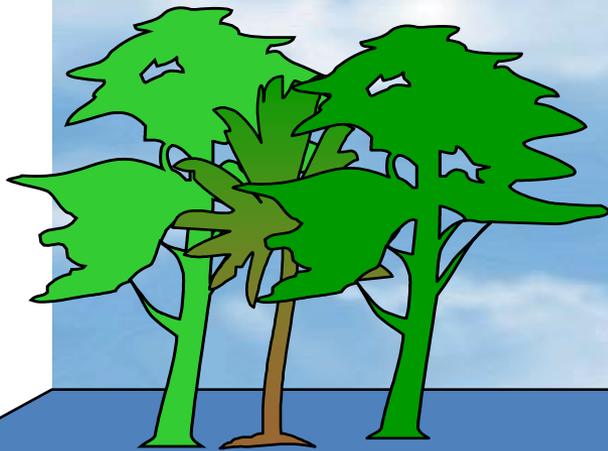
$$C_{\text{solo}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{solo}} = C_{\text{f}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{f}} + C_{\text{p}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{p}}$$

APLICAÇÃO PIONEIRA

AGROSSISTEMA CANA-DE-AÇÚCAR EM PIRACICABA

FLORESTA NATIVA (C3)

$$\delta^{13}\text{C} = -29 \text{ ‰}$$



CANA-DE-AÇÚCAR (C4)

$$\delta^{13}\text{C} = -12 \text{ ‰}$$

12 ANOS



50 ANOS



$$\delta^{13}\text{C}_{\text{solo}} = -27 \text{ ‰}$$

$$-24 \text{ ‰}$$

$$-19 \text{ ‰}$$

ENRIQUECIMENTO EM CARBONO 13

0-20 cm

FLORESTA NATIVA (C3)

$$\delta^{13}\text{C} = -29 \text{ ‰}$$



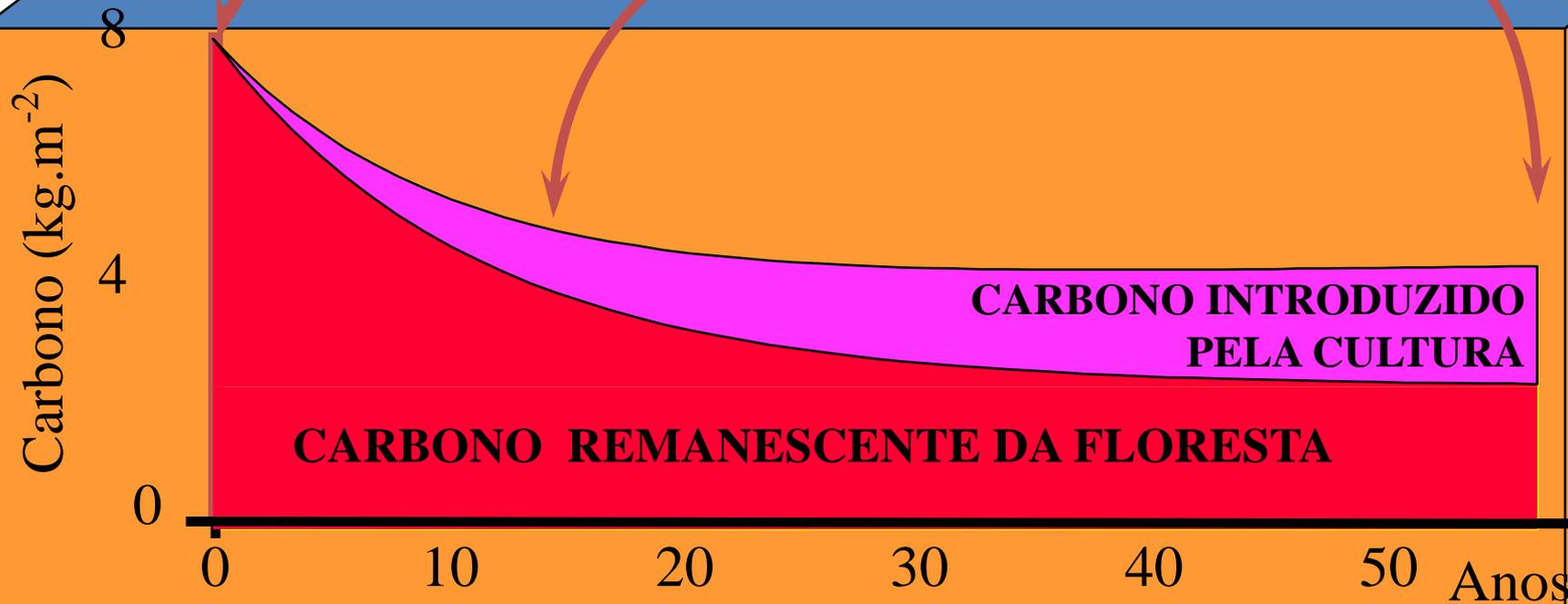
CANA-DE-AÇÚCAR (C4)

$$\delta^{13}\text{C} = -12 \text{ ‰}$$

12 ANOS



50 ANOS



Cálculo do estoque de carbono na camada 0-20 cm

Floresta	Camada cm	Densidade	% C	$\delta^{13}\text{C}$
	0-6	1,22	4,78	} - 25,5
	6-12	1,38	2,32	
	12-20	1,35	1,64	

Cana de açúcar	12 anos			
	0-10	1,24	1,65	} - 22,8
	10-20	1,54	1,55	

Cana de açúcar	50 anos			
	0-10	1,26	1,46	} - 20,2
	10-20	1,28	1,57	

$\delta^{13}\text{C}$ da serapilheira da cana = - 13 ‰

Floresta Natural

$$\begin{aligned} C_{0-6} &= 1,22 \text{ g.cm}^3 \cdot 6\text{cm} \cdot 4,78\text{g.100g} = 34,99\text{g.100cm}^2 \\ &= \frac{34,99 \cdot 10^{-3} \text{ kg}^2}{100 \cdot 100^{-2} \text{ m}^{-2}} = 3,5 \text{ kg m}^{-2} \end{aligned}$$

$$C_{6-12} = 1,38 \text{ g.cm}^3 \cdot 6\text{cm} \cdot 2,32 \text{ g.100g} = 1,9 \text{ kg m}^{-2}$$

$$C_{12-20} = 1,35 \text{ g.cm}^3 \cdot 8\text{cm} \cdot 1,64 \text{ g.100g} = 1,8 \text{ kg m}^{-2}$$

$$C_{0-20} = \dots\dots\dots = 7,2 \text{ kg m}^{-2}$$

Cálculo do estoque de carbono no camada 0-20 cm

Cana-de-açúcar 12 anos

$$C_{0-20} = \dots\dots\dots = 4,4 \text{ kg m}^{-2}$$

Cana-de-açúcar 50 anos

$$C_{0-20} = \dots\dots\dots = 3,8 \text{ kg m}^{-2}$$

Cálculo do carbono remanescente da floresta (Cf) e do introduzido pela cana-de-açúcar (Cc)

Equações :

$$C_s = C_c + C_f$$

C_s = Carbono do solo

$$C_s \cdot \delta^{13}C_s = C_c \cdot \delta^{13}C_c + C_f \cdot \delta^{13}C_f$$

Exemplo : cana-de-açúcar 12 anos

$$C_s = 4,4 = C_c + C_f$$

$$\begin{aligned} C_s \cdot \delta^{13}C_s &= 4,4 \cdot -22,8 \\ &= C_c \cdot \delta^{13}C_c + C_f \cdot \delta^{13}C_f \\ &= C_c \cdot -13 + C_f \cdot -25,5 \end{aligned}$$

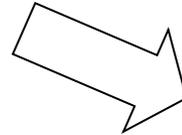
$$4,4 \cdot -22,8 = -13 \cdot C_c - 25,5 \cdot C_f$$

$$C_c = 4,4 - C_f$$

Cálculo do carbono remanescente da floresta (C_f) e do introduzido pela cana-de-açúcar (C_c)

$$4,4 \cdot -22,8 = -13(4,4 - C_f) - 25,5 C_f$$

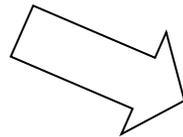
$$C_f = \frac{4,4 \cdot -22,8 + 13 \cdot 4,4}{13 - 25,5}$$



$$C_f = 3,45 \text{ kg m}^{-2}$$

$$C_s = C_c + C_f$$

$$4,4 = C_c + 3,45$$



$$C_c = 0,95 \text{ kg m}^{-2}$$