



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Departamento de Ciência do Solo

LSO - 0257 - Fundamentos de Ciência do Solo

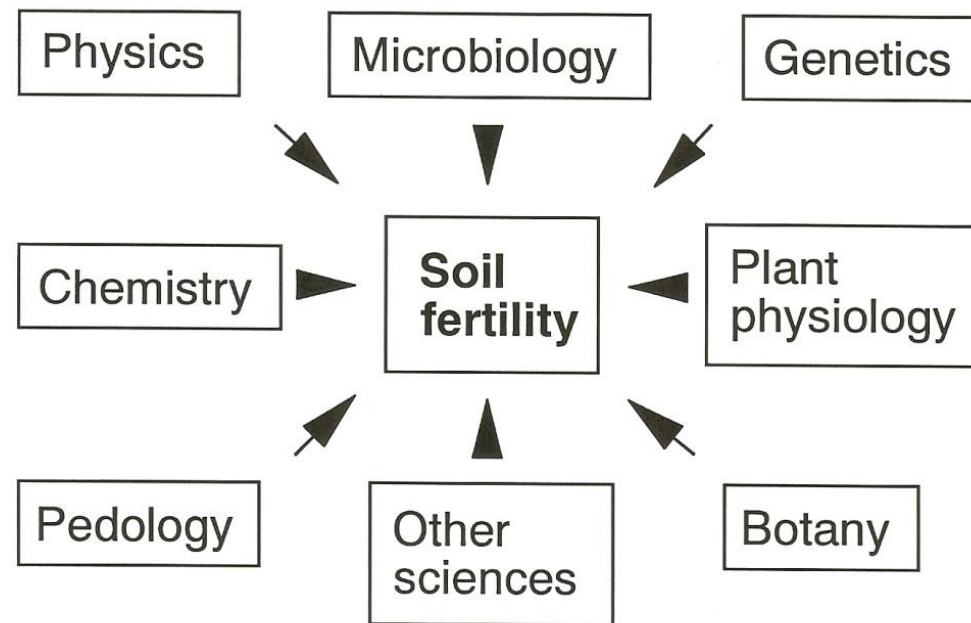
FERTILIDADE DO SOLO E CICLAGEM DE NUTRIENTES

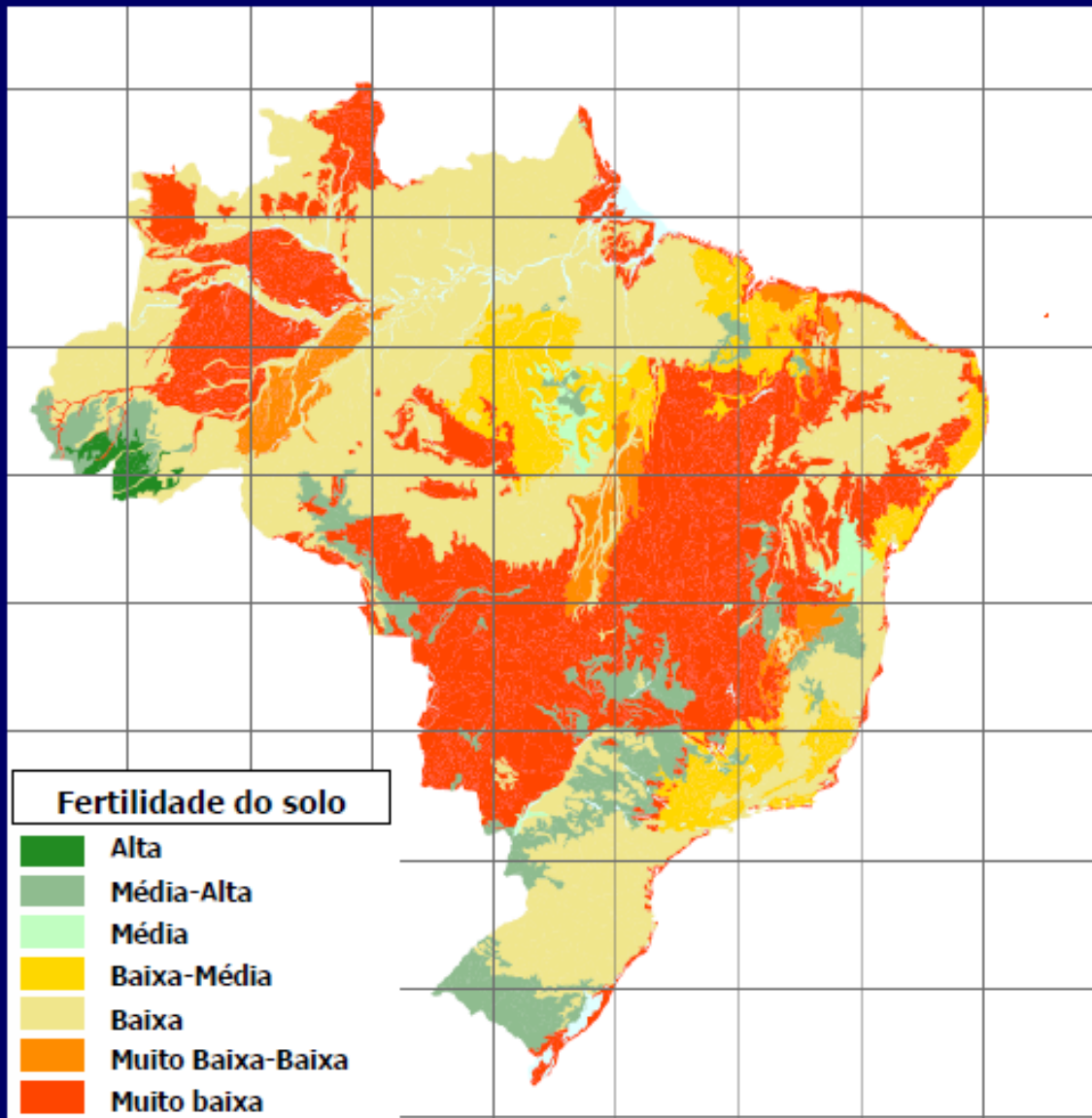
Prof. Dr. Paulo Sérgio Pavinato
Prof. Dr Antonio Roque Dechen
Prof. Dr. Quirino Augusto de Camargo Carmello

Piracicaba
2017

Fertilidade do solo

Definição - capacidade do solo em fornecer nutrientes para o desenvolvimento das plantas





Mapa de fertilidade dos solos do Brasil

FONTE: Embrapa (1980)

Solos com Fertilidade Baixa ou Muito Baixa

**Acidez
Deficiência de P**

**Avanço da Agricultura
Cerrado**

Área cultivada – grãos

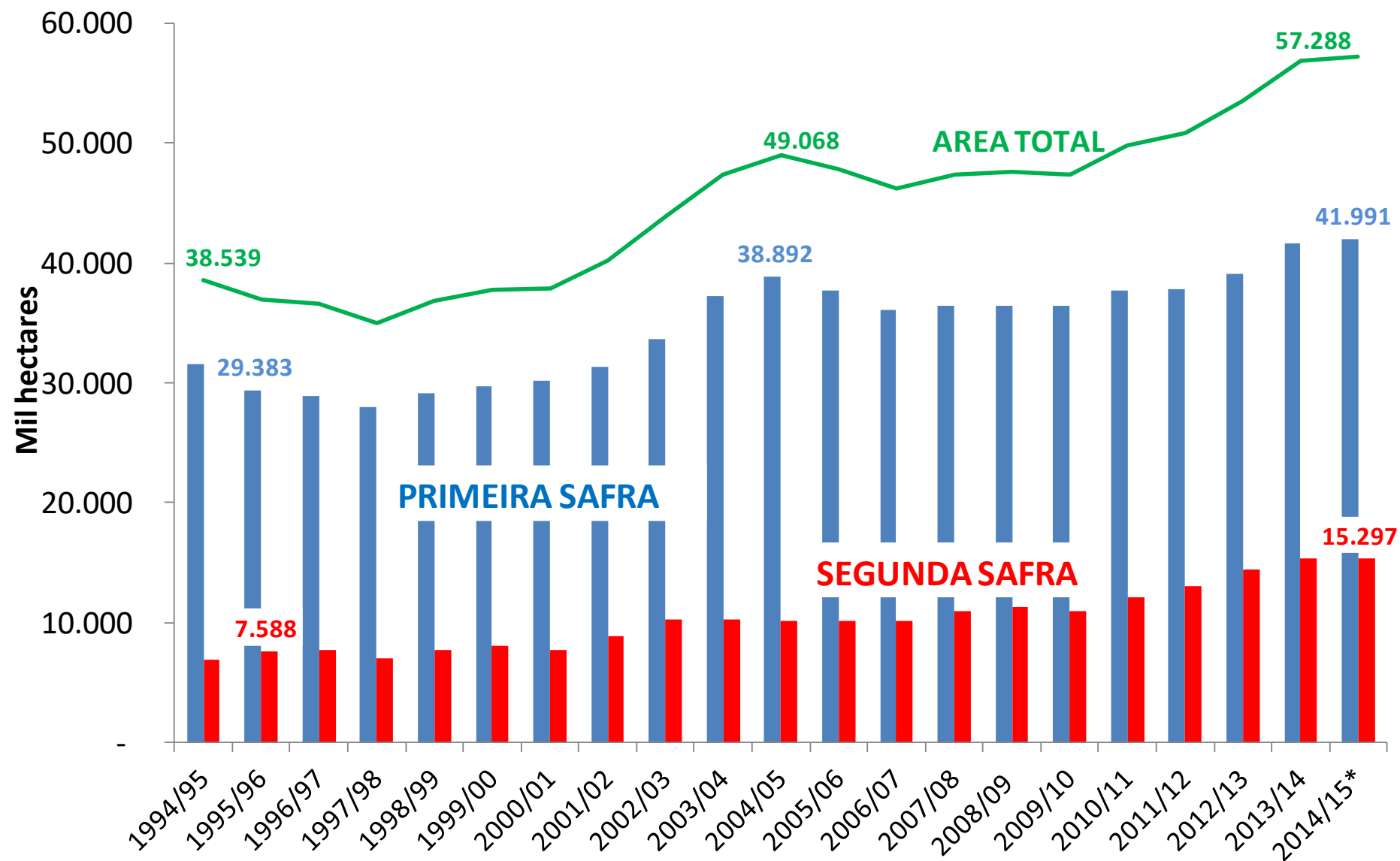
57 milhões ha

Sistema Plantio Direto

32 milhões ha

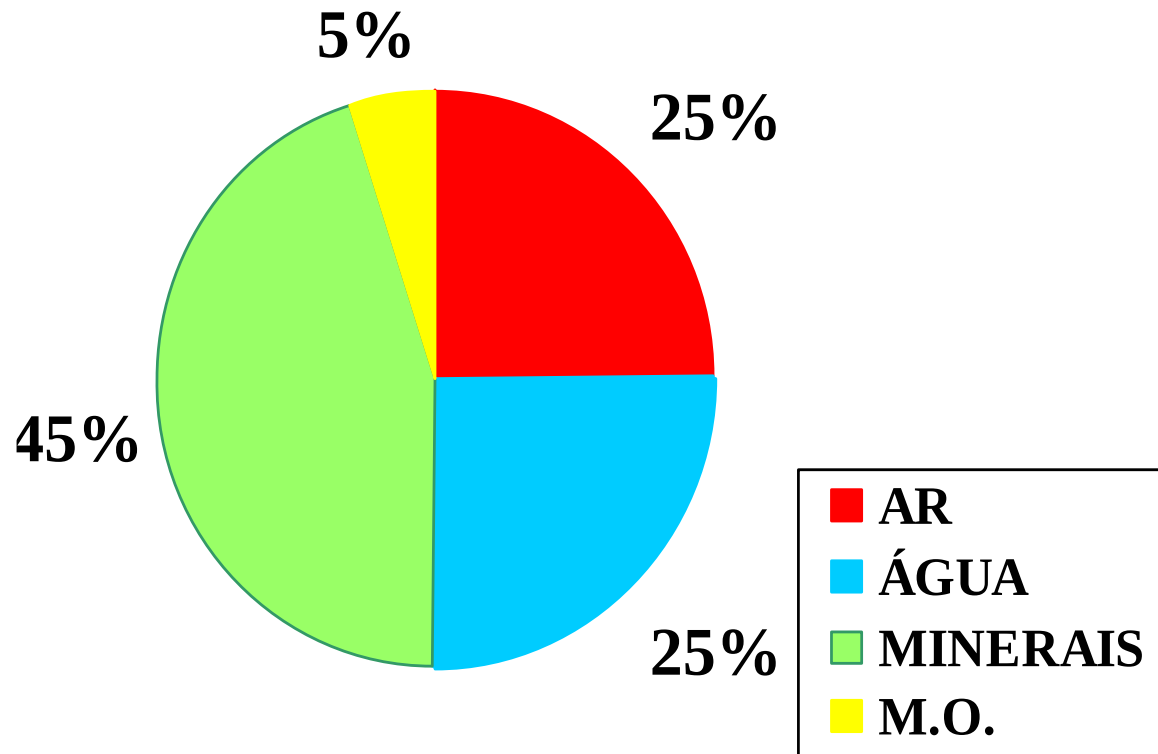
Maior sustentabilidade
da agricultura em regiões
tropicais e subtropicais

EVOLUÇÃO DA ÁREA BRASILEIRA DE GRÃOS



Solo

1. Ponto de vista físico



a) Fase gasosa

$\uparrow \text{CO}_2$

$\text{O}_2 \downarrow$

N_2

b) Fase líquida

Íons

Sais dissolvidos

c) Fase sólida

(1) Constituintes inorgânicos

(2) Constituintes orgânicos

b) Fase líquida (solução do solo)

{ íons
sais dissolvidos

- Fator intensidade no fornecimento de nutrientes para as plantas
- Meio onde ocorre a maioria dos processos químicos e biológicos
- Meio principal para o movimento de minerais no solo

c) Fase sólida do solo:

c.1) Parte inativa: partículas $> 0,002$ mm

Pedras: Cascalhos: Areia: Silte

c.2) Parte ativa: partículas $< 0,002$ mm ($< 2\mu$)

Argila: M.O. (Humus)

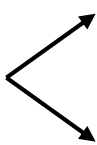
c.2) Fração ativa ou coloidal

Fração orgânica + Fração argila

- (i) Propriedades básicas para a fertilidade do solo
- (ii) Fonte de nutrientes
- (iii) Reatividade do solo
 - reação do solo
 - troca iônica

Materiais trocadores (fração coloidal)

Classificação

a) Fração argila  **Argilas silicatadas**
Óxidos de Fe e Al

b) Fração orgânica → **Humus**

Fração argila ($\emptyset < 0,002 \text{ mm}$)

Argilas silicatadas

a) Argilas 1:1 → **Tipo Caulinita**

b) Argilas 2:1 → **Tipo Montmorilonita**

a) Argilas 1:1

Lâmina de Si	1
Lâmina de Al	1

b) Argilas 2:1

Lâmina de Si	← Si ⁴⁺ ← Al ³⁺
Lâmina de Al	← Al ³⁺ ← Mg ²⁺
Lâmina de Si	

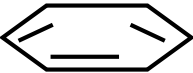
Montmorilonita: $[\text{Si}_{7,7} \text{Al}_{0,3}]^{\text{IV}} [\text{Al}_{2,6} \text{Fe}_{0,9} \text{Mg}_{0,5}]^{\text{VI}} \text{O}_{20} (\text{OH})_4 n\text{H}_2\text{O}$

Óxidos de Fe e Al

Óxidos de Fe → Goethita: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Hematita: Fe_2O_3

Óxidos de Al → Gibsita: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Fração orgânica (Humus)

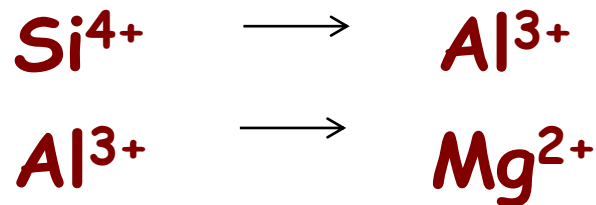
- R - COOH Carboxílico
- R -  OH Fenólico

Origem das cargas do solo

Cargas negativas

1. Permanentes

- Ocorrem: argilas 2:1
- Mecanismos: substituições isomórficas

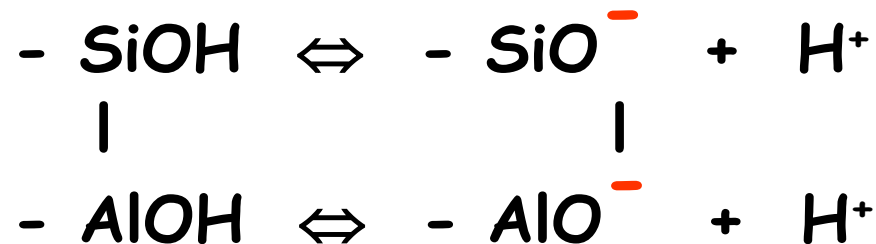


2. Dependente de pH

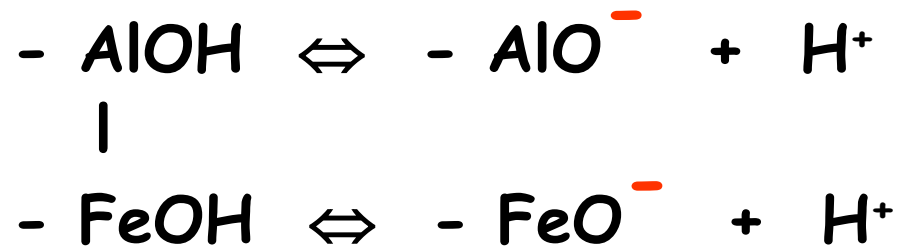
Ocorrem: Argilas 1:1
Óxidos Fe e Al
Matéria Orgânica

Mecanismos: Dissociação de H^+

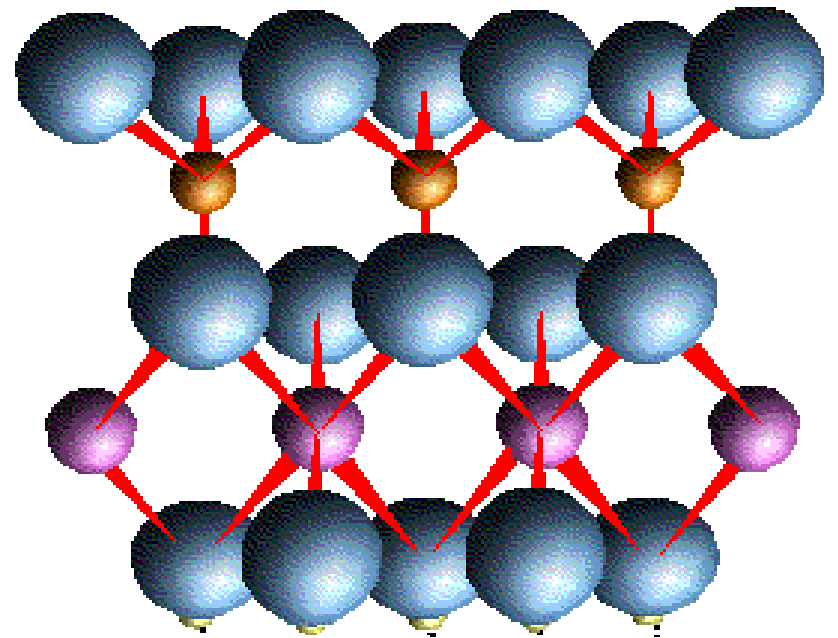
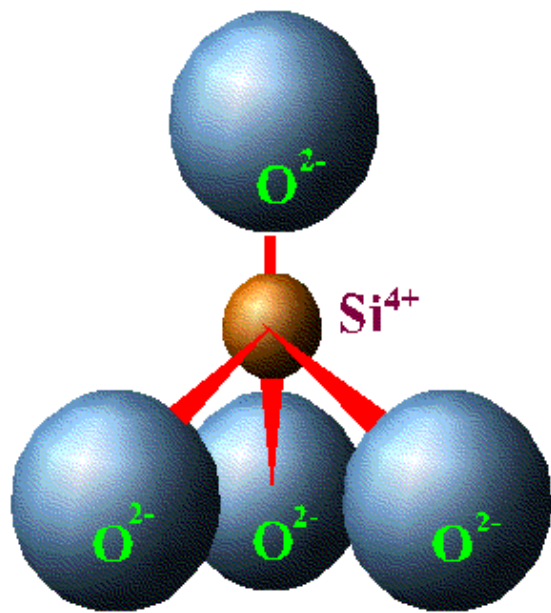
Caulinita



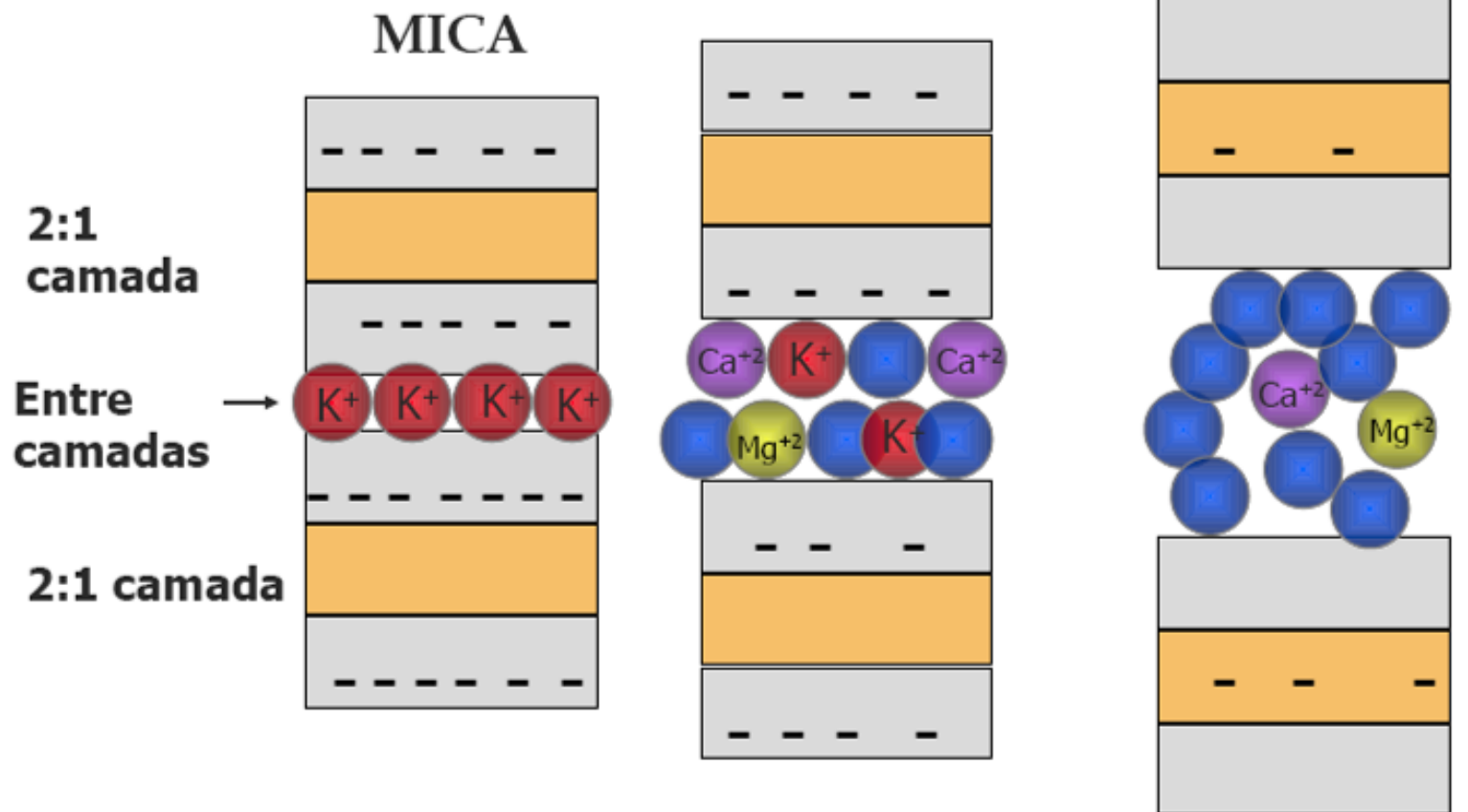
Óxidos de Fe e Al



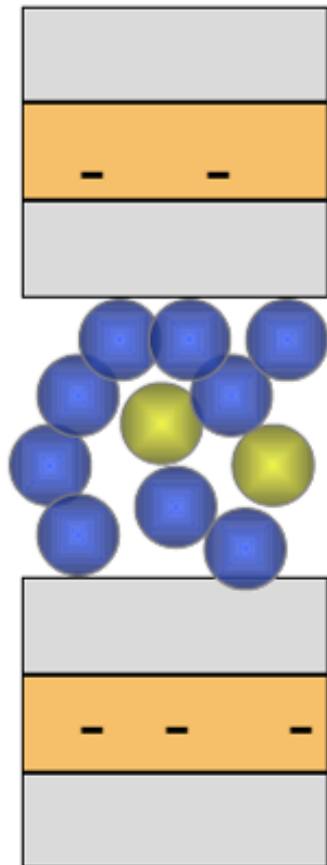
Ocorre acima do PCZ



[2:1's]



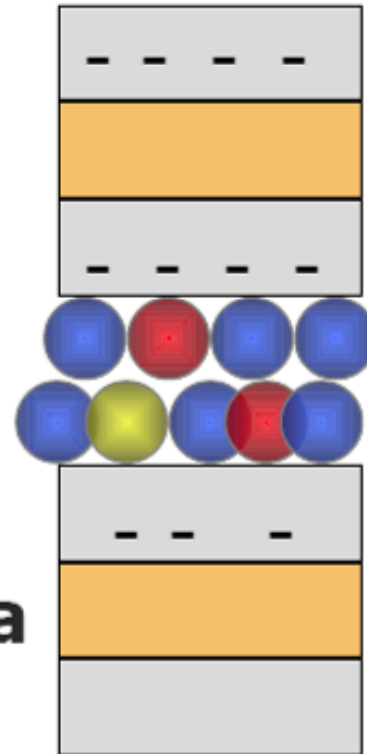
Expansiva



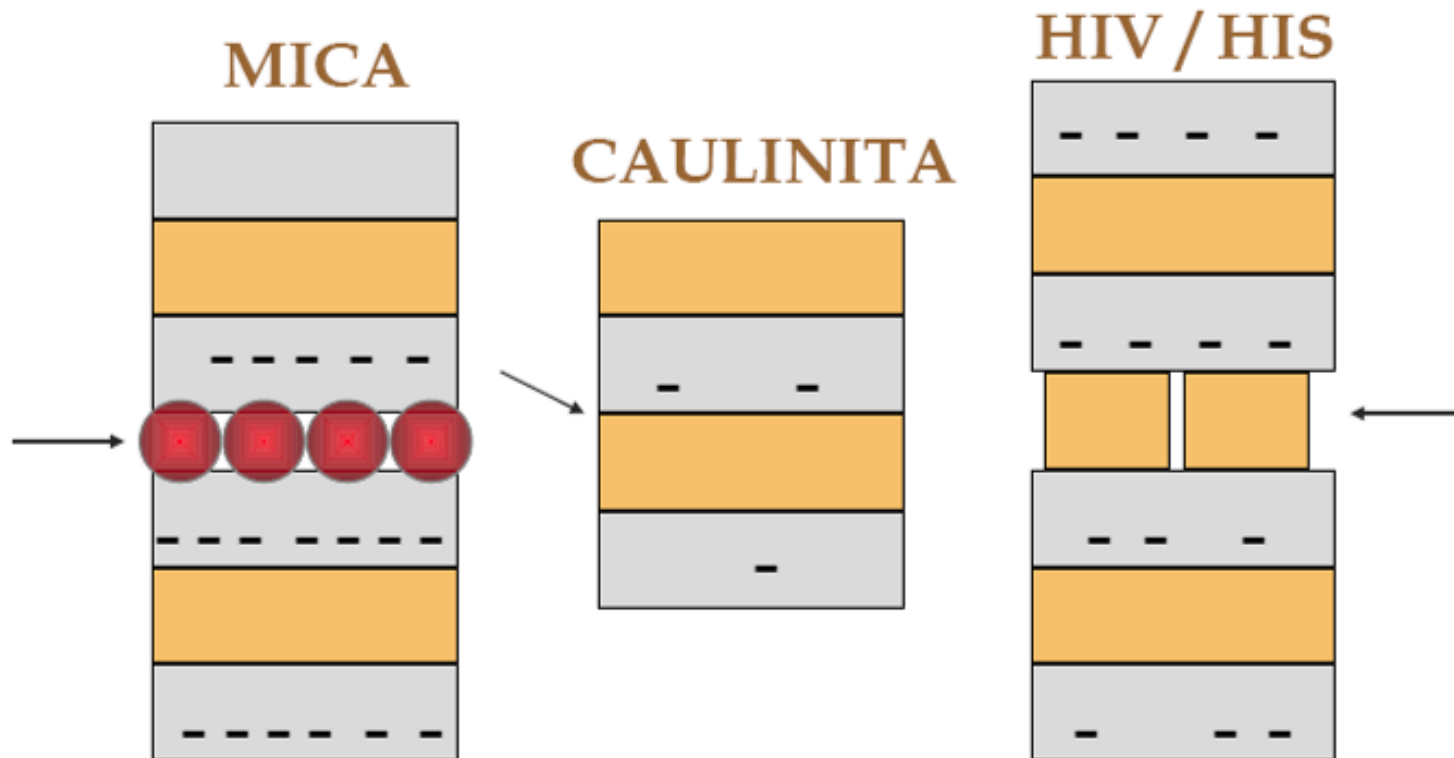
**2:1
camada**

**Entre
camadas**

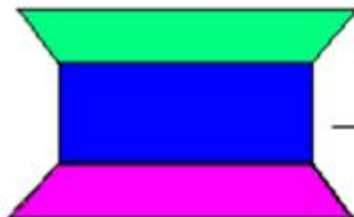
2:1 camada



Não-Expansiva



MICA



CAULINITA

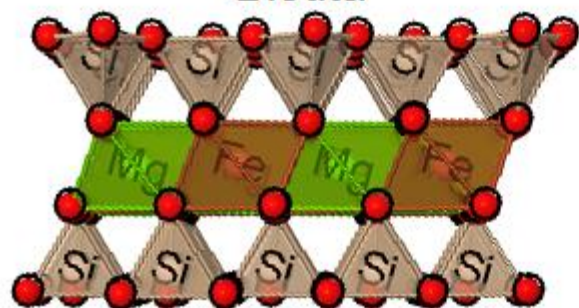


GIBBSITA

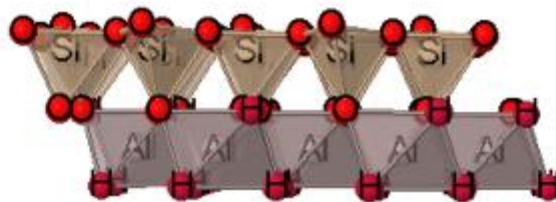


Intemperismo

Biotita



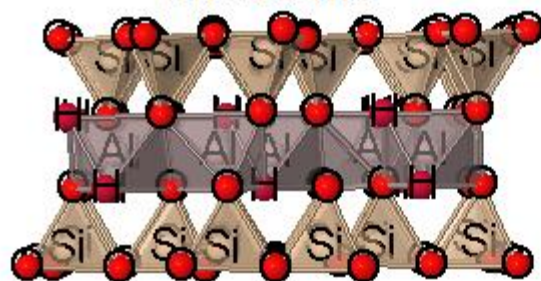
Caulinita

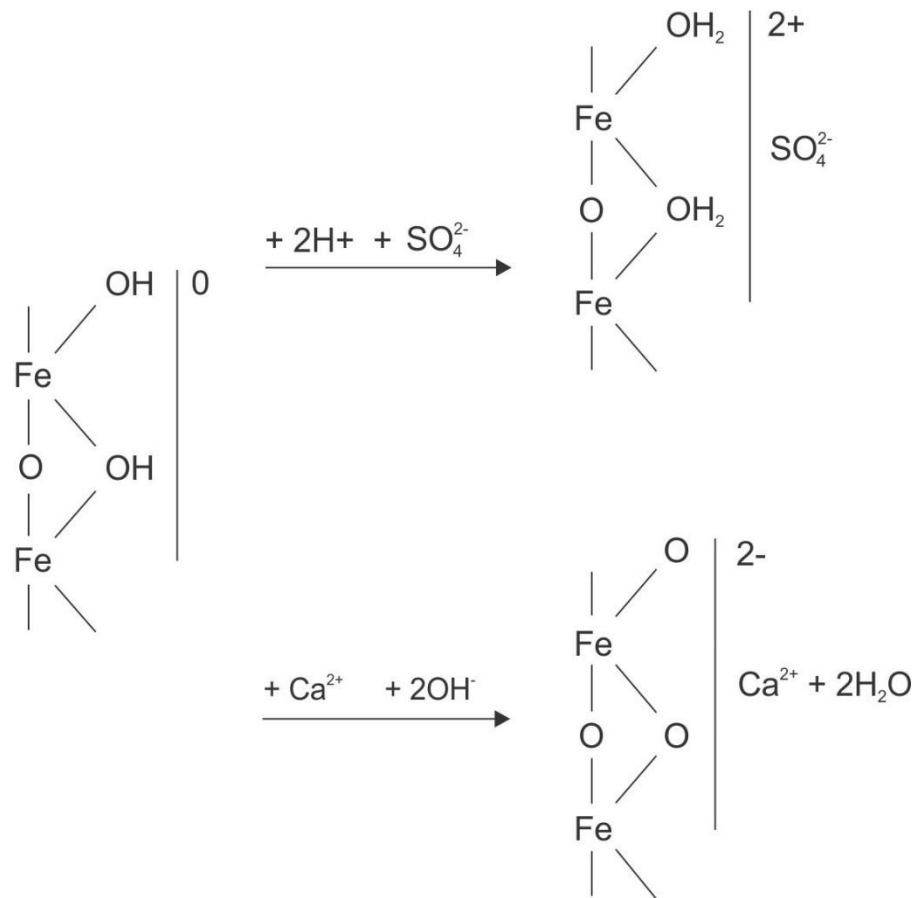


Gibbsita



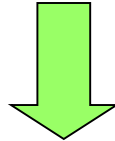
Muscovita



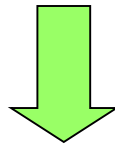


Representação esquemática do desenvolvimento de cargas elétricas negativas e positivas em superfície hidratada de óxido de ferro, com retenção de sulfato de cálcio.

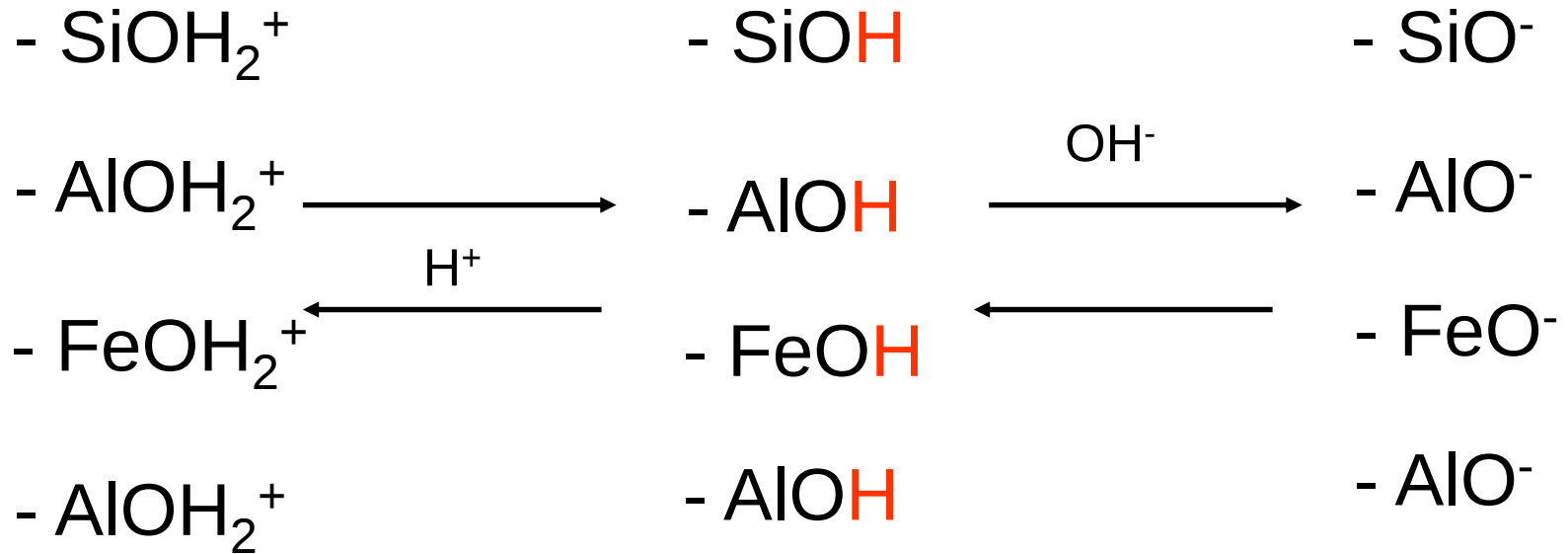
PCZ = Ponto de Carga Zero



pH do Solo = Σ Cargas Positivas (+) = Σ Cargas Negativas (-)



As cargas negativas do oxigênio estão ocupadas por hidrogênio (covalente).



CTA

PCZ

CTC

PCZ de alguns constituintes do solo

0	2	4	6	8	10 (pH)	Colóides	PCZ
+++++	+++++	+++++	+++++	+++++	-----	Óxidos amorfos	8,3
+++++	+++++	+++++	+++++	+++++	-----	Goetita (FeOOH)	6,7
+++++	+++++	+++++	+++++	+++++	-----	Hematita (Fe ₂ O ₃)	5,4
+++++	+++++	+++++	+++++	+++++	-----	Gibbsita (AlOH ₃)	5,0
+++++	+++++	+++++	+++++	+++++	-----	Minerais de argila	<2,5
+++++	+++++	+++++	+++++	+++++	-----	Húmus	<2,0

Fonte: Alleoni, L.R.F.

Características das cargas elétricas do solo

CARGAS CONSTANTES (Negativas)	CARGAS VARIÁVEIS (Negativas e positivas)
• Resultam de substituições iônicas de Si por Al ou de Al por Mg ou Fe^(III) na grade cristalina	• Resultam de reações entre os íons H⁺ e átomos de O existentes na superfície da partícula
• Ocorrem somente nos minerais de argila de grade 2:1 e 2:1:1 na alofana	• Ocorrem nos óxidos de Fe e Al, nos minerais de argila e no húmus
• Não são influenciadas pelas condições do meio como pH e concentração da solução	• São influenciadas pelas condições do meio como pH e concentração da solução
• Têm origem interna	• Têm origem externa
• São sempre negativas	• Podem ser negativas ou positivas

TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA E ÓXIDOS, PCZ, pH E CARGA LÍQUIDA DE UM SOLO TROPICAL ALTAMENTE INTemperizado



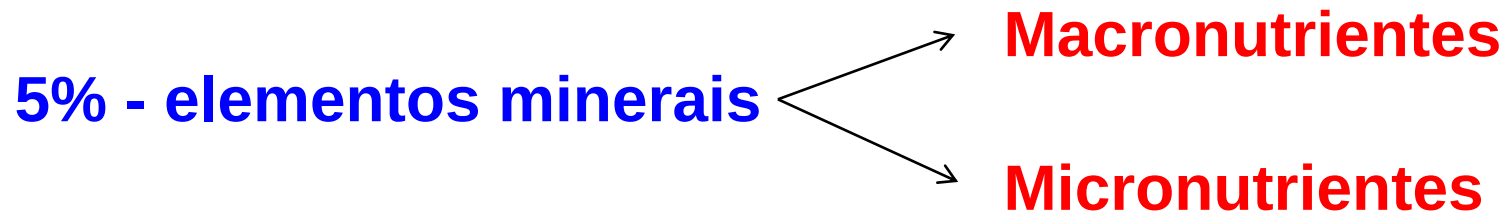
- > teor de matéria orgânica;
 - < valor de PCZ;
 - pH do solo > PCZ;
 - carga líquida (-);
 - pred. retenção de cátions == **CTC > CTA**.
-
- < teor de matéria orgânica;
 - predominam os óxidos;
 - > valor de PCZ;
 - pH do solo pode ser < PCZ;
 - carga líquida pode ser (+) == **CTA > CTC**.

Solo

2. Ponto de vista químico

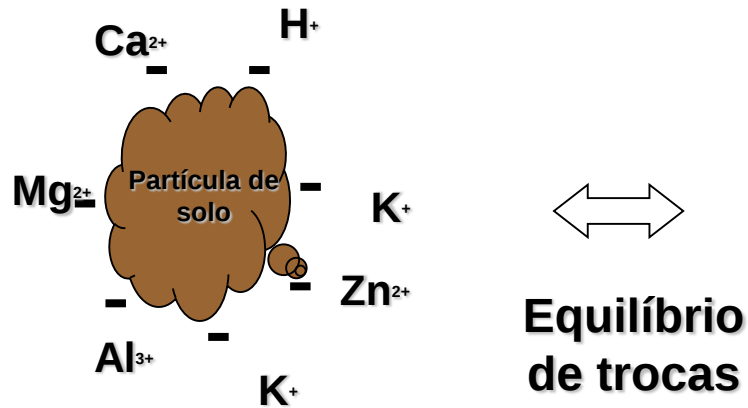
95% - H, O e C

5% - elementos minerais

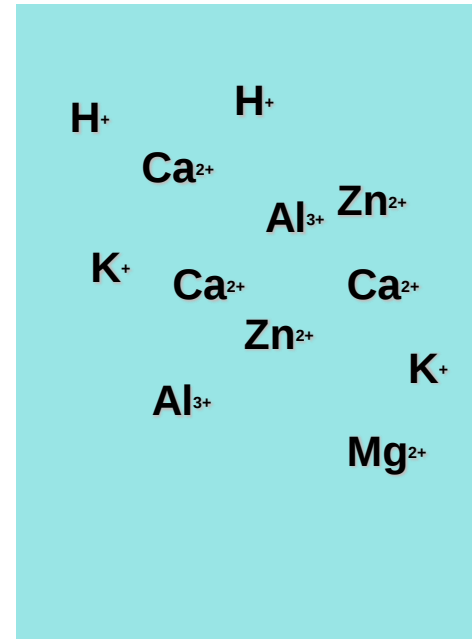


Solo

3. Ponto de vista físico-químico



**Componente sólida -
Complexo de Troca**
(nutrientes adsorvidos)



Solução do solo
(nutrientes dissolvidos/
disponíveis)

CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIIONS

CTC - expressa o número de mols de cargas negativas por unidade de massa ou volume.

Unidades: $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (massa), $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (volume)

- Reações de troca de cátions são baseadas em carga por carga (e não íon por íon).

Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

$$CTC_{\text{efetiva}} = Ca + Mg + K + Al \text{ (cátions trocáveis)}$$

$$CTC_{\text{a pH 7,0}} = Ca + Mg + K + Al + H$$

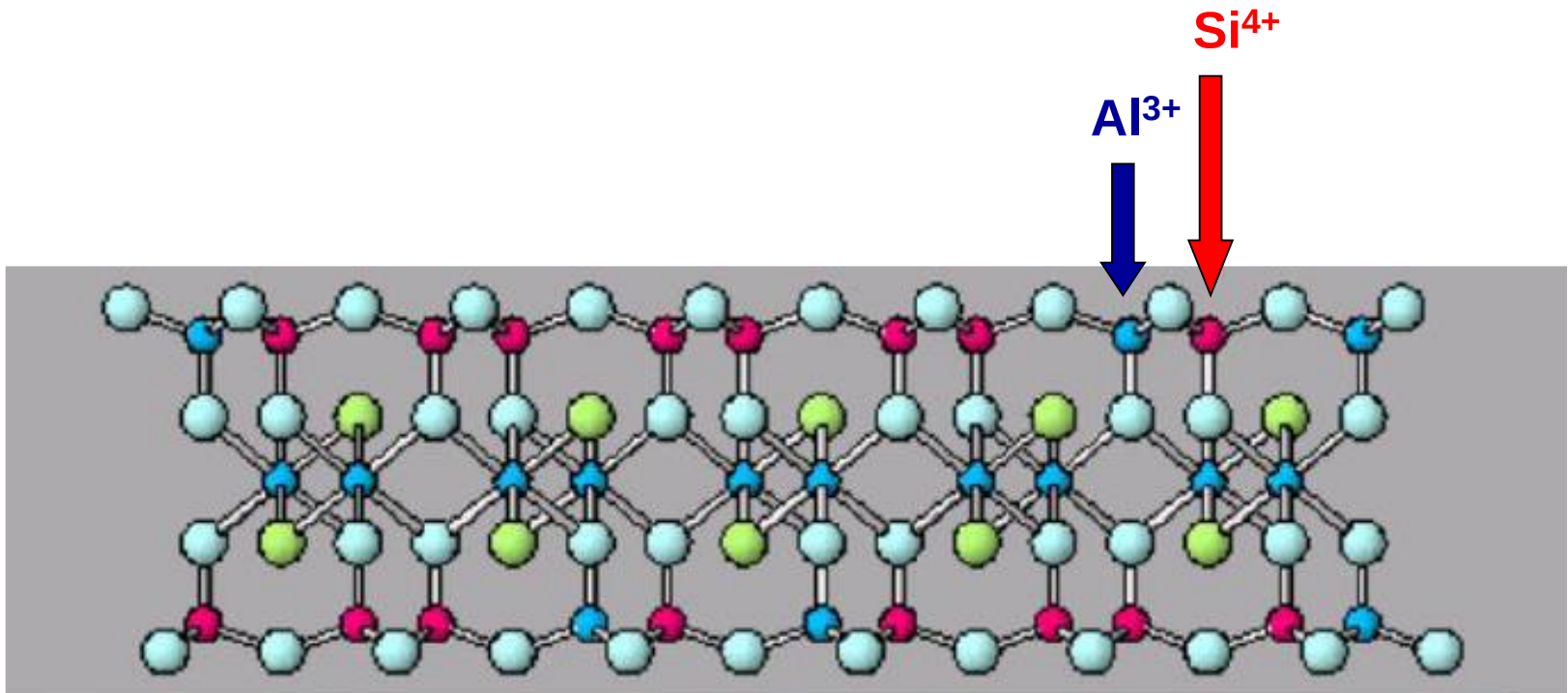
CTC permanente - Substituição isomórfica

- Substituição de um elemento por outro de igual tamanho
 - ocorre durante a formação do mineral
 - ocorre tanto no tetraedro como no octaedro
 - O Si^{4+} é substituído por Al^{3+} nos tetraedros
 - O Al^{3+} é substituído por Mg^{2+} ou Fe^{2+} , nos octaedros

Acontece quando o mineral está se formando;

NÃO ocorre nos filossilicatos 1:1

Cargas eléctricas permanentes

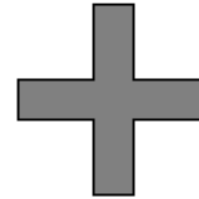


Substituição isomórfica

Tetraedro **sem** substituição isomórfica

Cada O está ligado a dois Si,
então vai uma carga negativa
para cada Si

$$\text{Si} = +4 \times 1 \longrightarrow +4$$



$$\text{O} = -1 \times 4 \longrightarrow -4$$

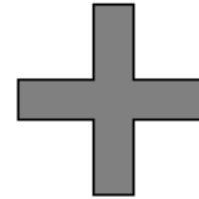
0

Substituição isomórfica

Tetraedro **com** substituição isomórfica

$$\text{Al} = +3 \times 1 \longrightarrow +3$$

Cada O está ligado a dois Al,
então vai uma carga negativa
para cada Al



$$\text{O} = -1 \times 4 \longrightarrow -4$$

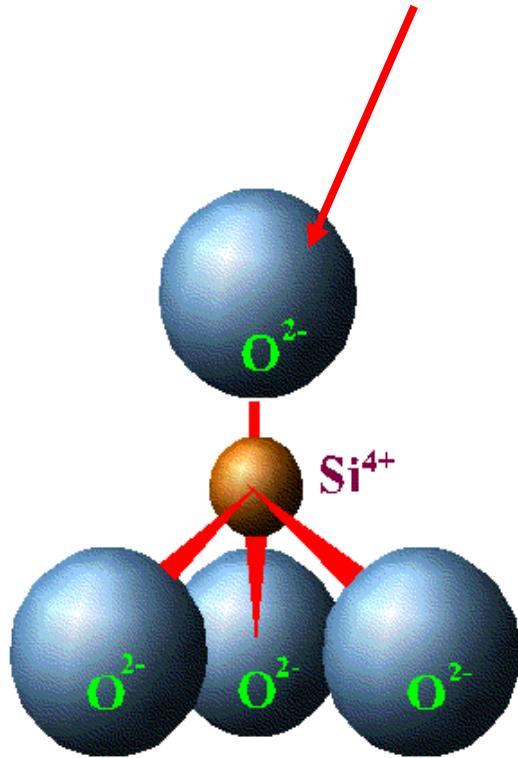
No entanto cada Al somente faz 3
ligações, sobra um O insatisfeito

-1

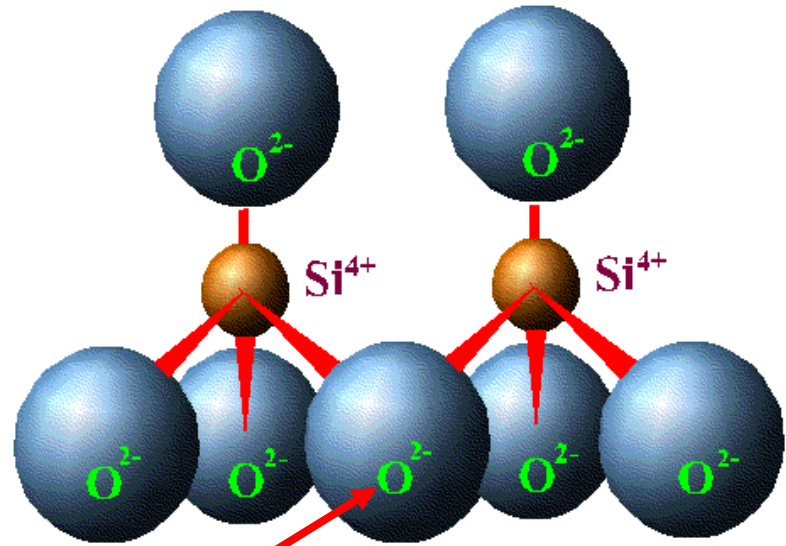
Fica sobrando uma carga negativa!!!!

UNIDADE FUNDAMENTAL DOS MINERAIS SILICATADOS

O oxigênio é -2 mas neste momento tem uma valência satisfeita estando com carga -1



Tetraedro de Silício



Tetraedros de Silício unidos
pelo oxigênio basal

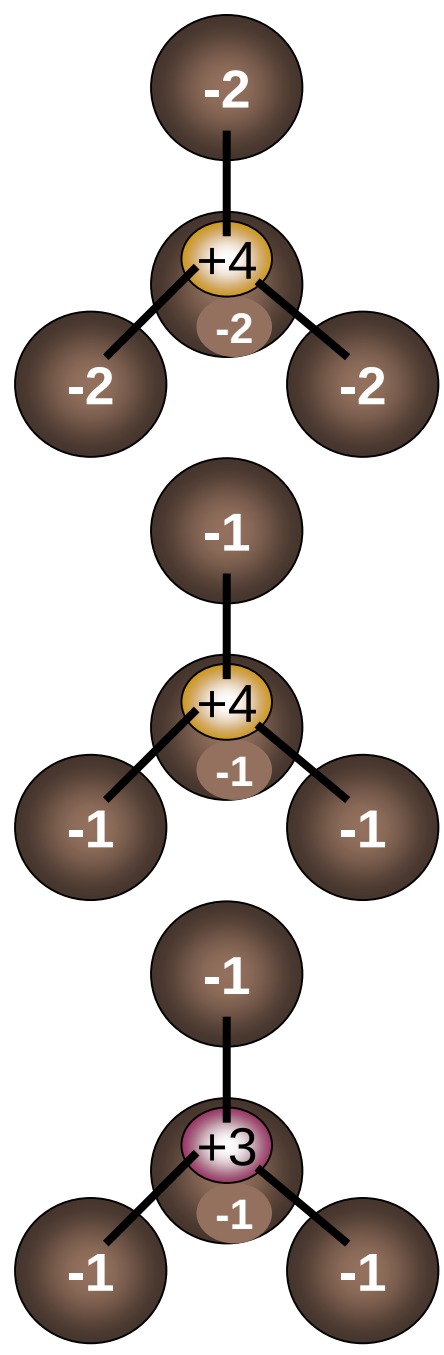
O oxigênio é -2 mas este tem as duas valências satisfeitas, os demais estão -1

Carga total satisfeita

Substituição isomórfica

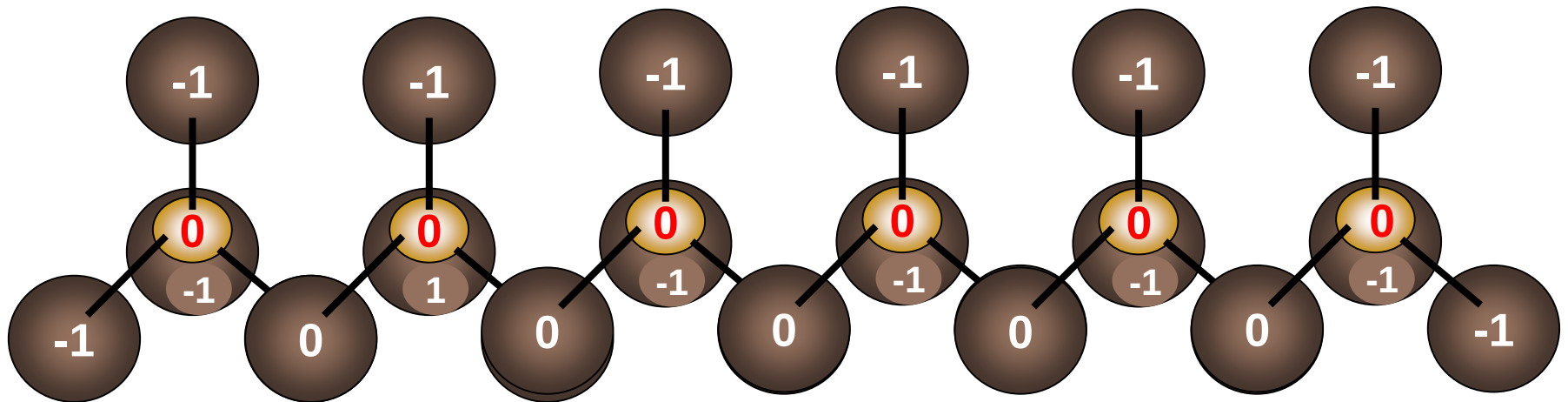
Embora o tetraedro isolado tenha carga líquida negativa de -4 os oxigênios compartilhados fazem com que na estrutura de um argilomineral os tetraedros tenham carga líquida zero.

Quando ocorre a substituição isomórfica do íon central ocorre sobra de carga negativa gerando as cargas permanentes do solo

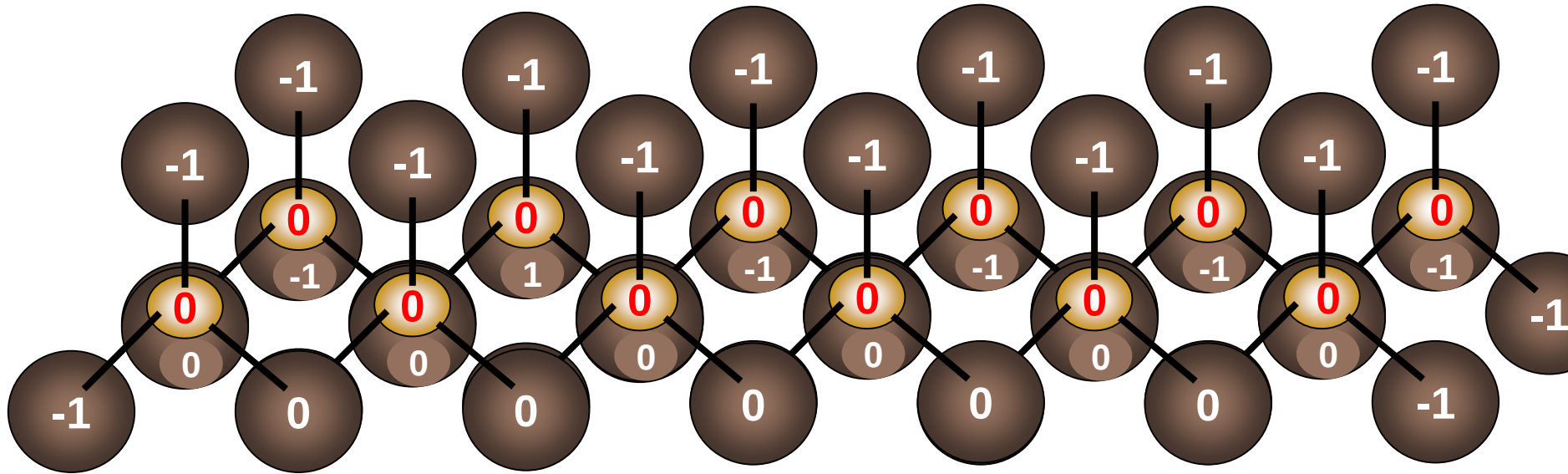


- 8 O
+4 Si
-4
-4 O
+4 Si
0
-4 O
+3 Al
-1

Como surgem as cargas???



Como surgem as cargas???



Cargas elétricas das argilas

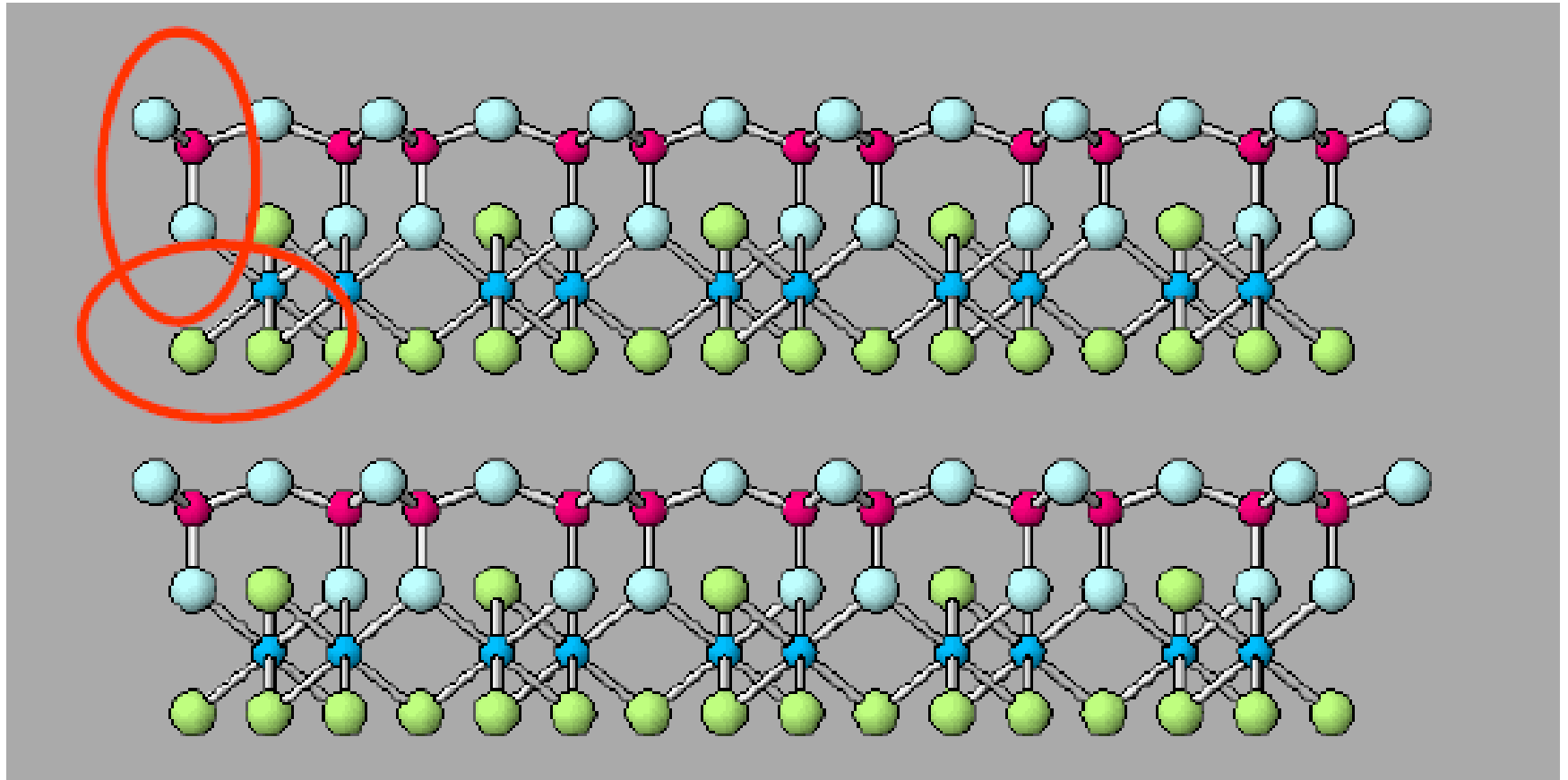


E o outro tipo de CTC - dependente de pH?

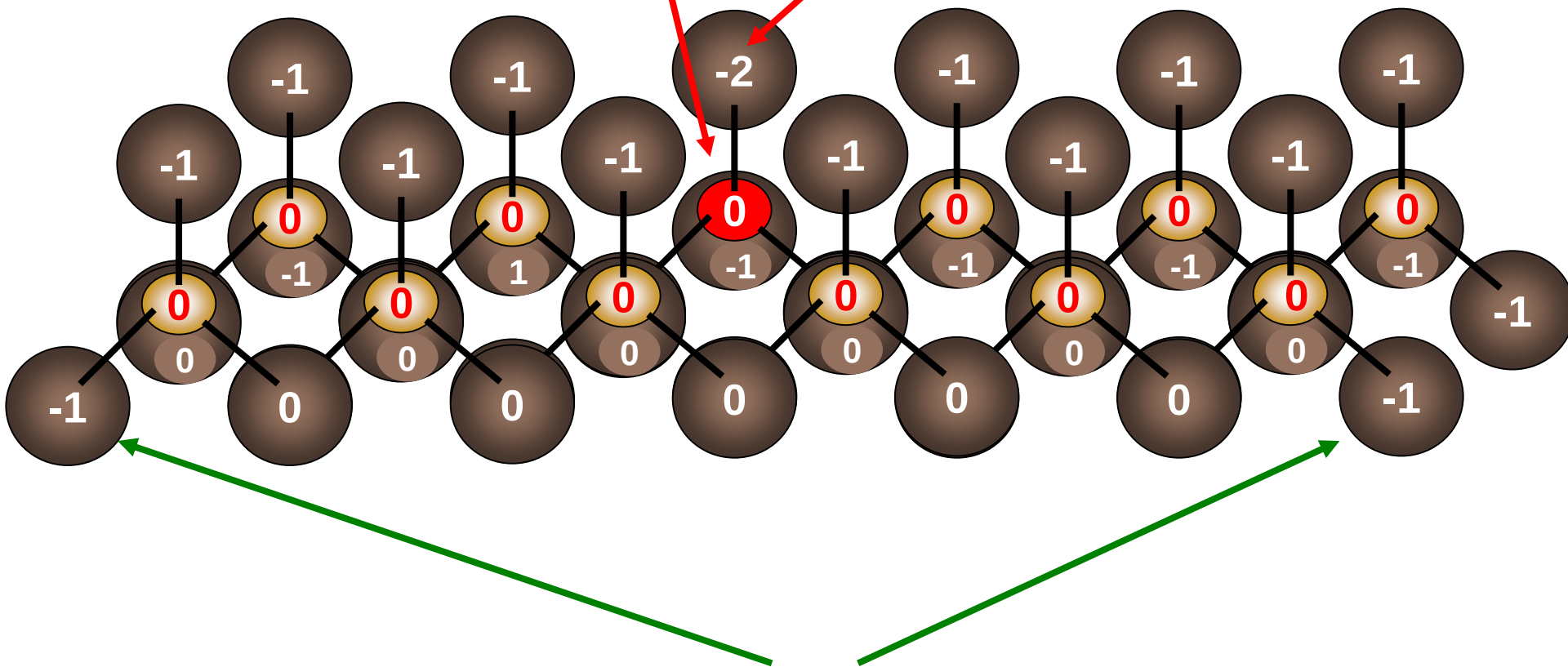
Cargas variáveis

- Estas cargas são geradas nas ligações insatisfeitas na borda dos minerais;
- Ocorrem em **TODOS** os colóides do solo:
 - Filossilicatos 2:1
 - Filossilicatos 1:1
 - Óxidos
 - Matéria Orgânica

Caulinita



A substituição do Si^{4+} por Al^{3+} , gera sobra de cargas negativas
CARGAS PERMANENTES



Arestas quebradas resultam em cargas insatisfeitas
CARGAS VARIÁVEIS OU pH DEPENDENTES

- Fatores que afetam a troca iônica

Material	CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)
Ácidos húmicos	200 - 400
M.O. humificada	100 - 250
Vermiculita	100 - 150
Montmorilonita	80 - 120
Ilita	30 - 50
Caulinita	3 - 15
Óxidos de Fe e Al	2 - 5

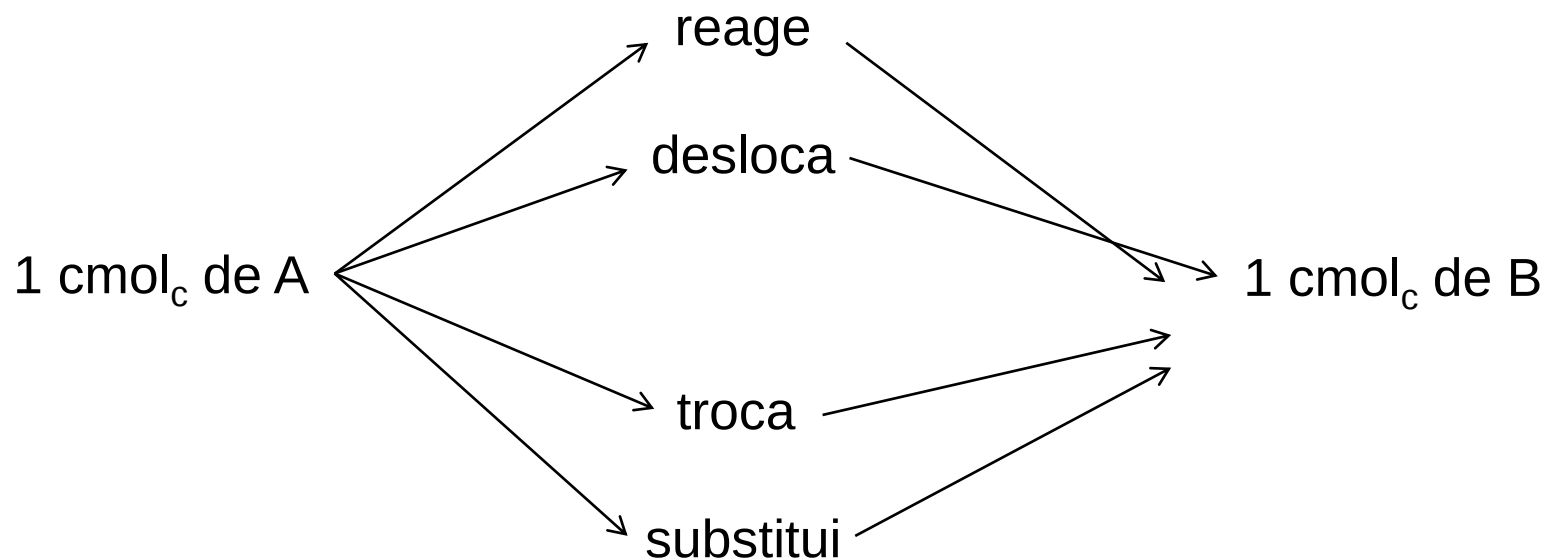
Contribuição da matéria orgânica do solo na CTC de solos de diferentes ambientes do território brasileiro

Região	Classes de solos avaliadas (nº)	% da CTC devida à matéria orgânica do solo	Fonte
Estado de São Paulo	16	70 a 74	Raij (1969)
Estado do Paraná	12	75 a 90	Pavan, Bingham e Pratt (1985)
Cerrados	14	75 a 85	Resck (1998)

IMPLICAÇÕES PRÁTICAS

SOLO COM CTC 10 a 50 mmol _c dm ⁻³	SOLOS COM CTC > 60 mmol _c dm ⁻³
Alta porcentagem de areia	Alta porcentagem de argila
Baixo teor de matéria orgânica	Alto teor de matéria orgânica
N e K lixiviam com mais facilidade	Maior quantidade de calcário é necessário para aumentar o pH
Menor quantidade de calcário é necessário para aumentar o pH	Maior capacidade de retenção de nutrientes
Menor capacidade de retenção de umidade	Maior capacidade de retenção de umidade

Importante:



$$\begin{aligned}\text{Ex: } 1 \text{ mol}_c \text{ Ca}^{2+} &= \text{Peso atômico} \div \text{valência} \div 1.000 \\ &= 40,08 \text{ g} \div 2 = 20,04 \text{ g de Ca}^{2+}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Ex: } 1 \text{ mol}_c \text{ Mg}^{2+} &= \text{Peso atômico} \div \text{valência} \div 1.000 \\ &= 24,30 \text{ g} \div 2 = 12,15 \text{ g de Mg}^{2+}\end{aligned}$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Departamento de Ciência do Solo

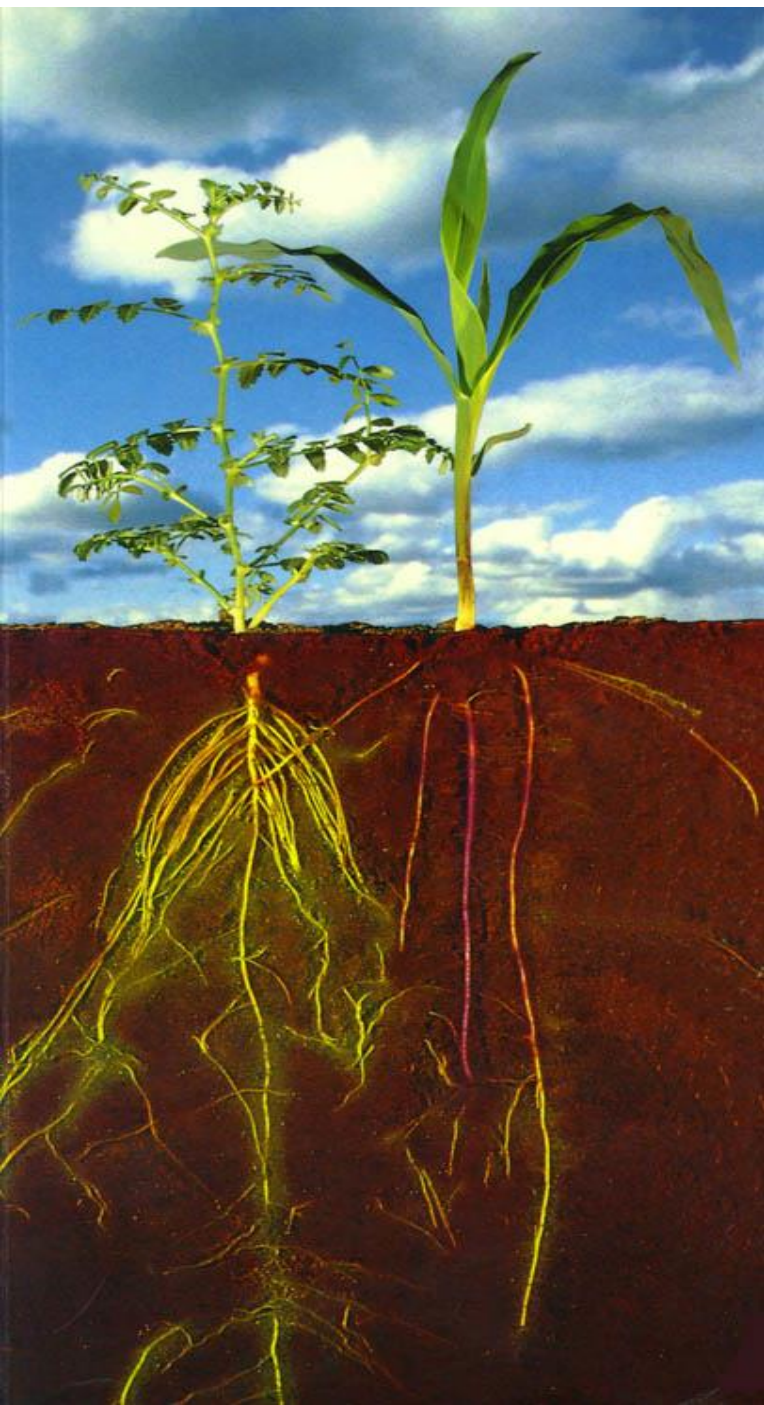
LSO - 0257 - Fundamentos de Ciência do Solo

FERTILIDADE DO SOLO E CICLAGEM DE NUTRIENTES

Parte 2

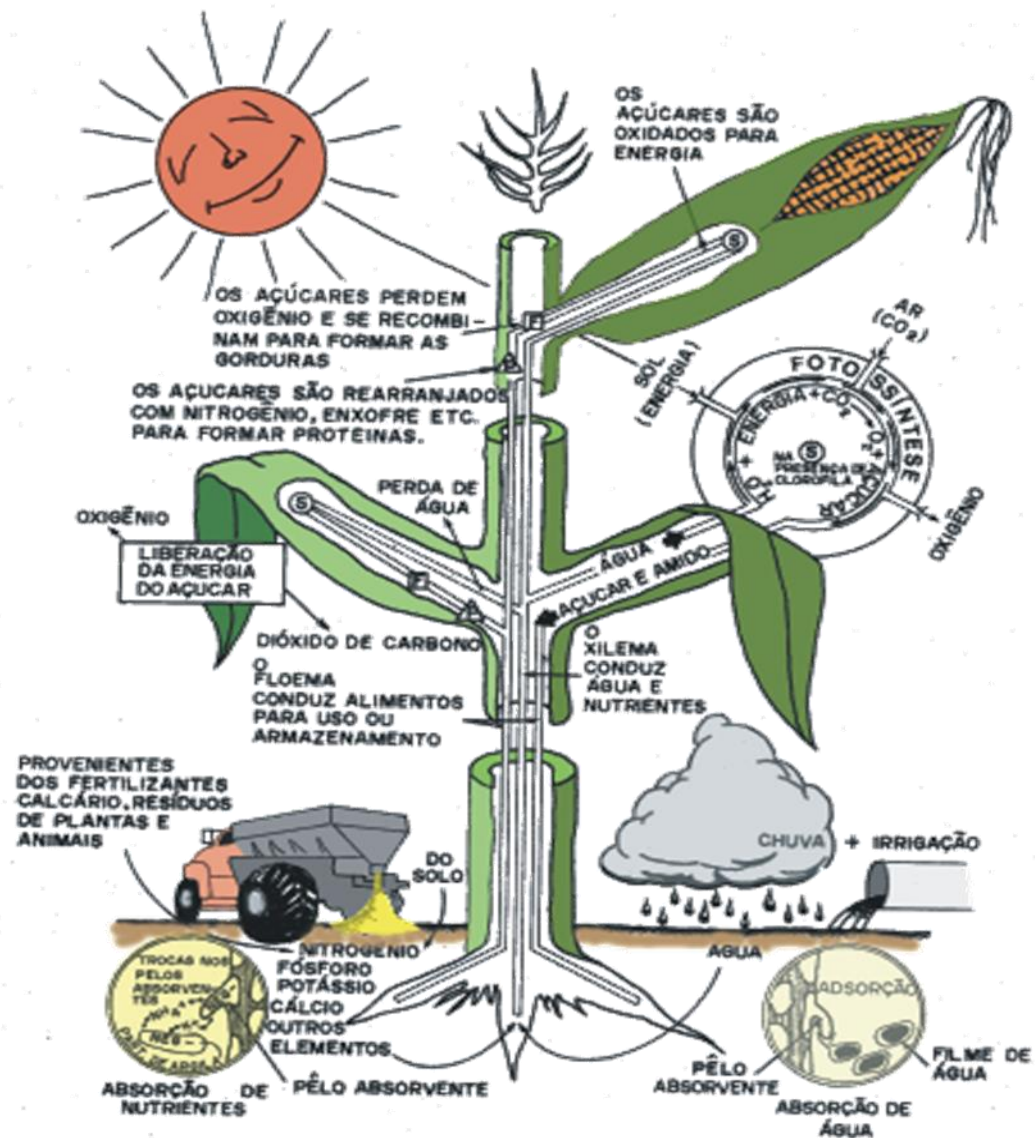
Prof. Dr. Paulo Sérgio Pavinato
Prof. Dr. Antonio Roque Dechen
Prof. Dr. Quirino Augusto de Camargo Carmello

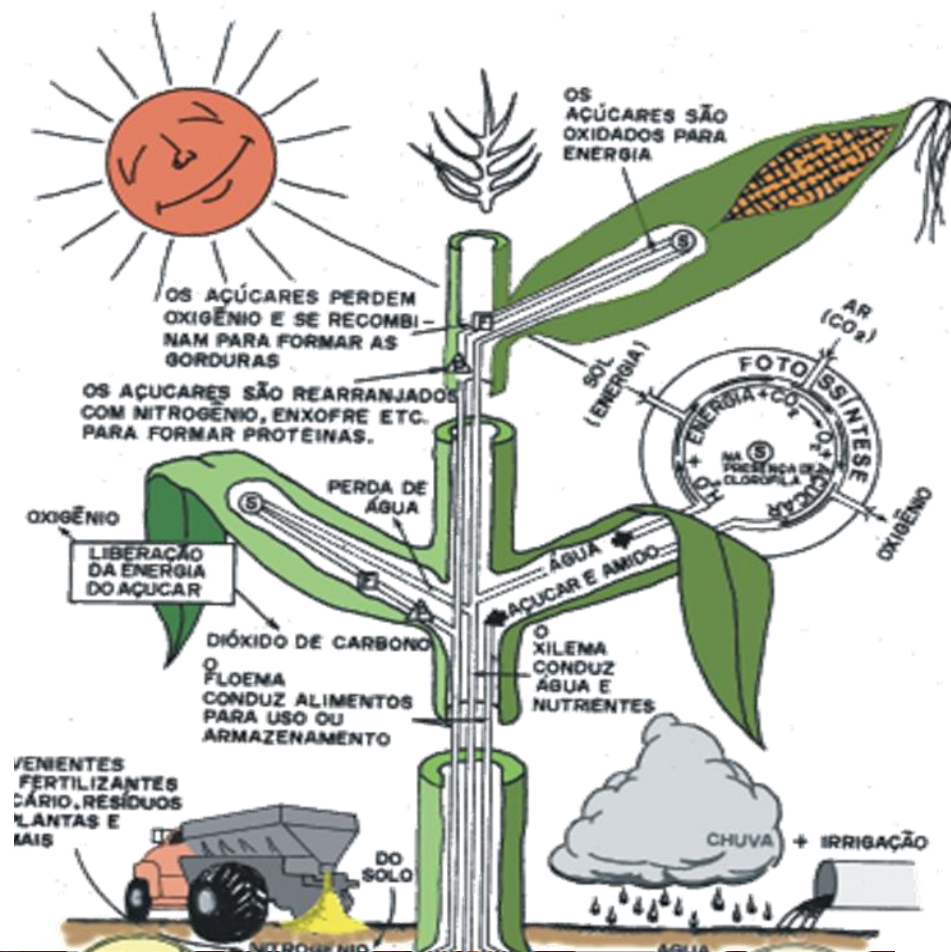
Piracicaba
2017



SINTOMATOLOGIA
É CONSEQUÊNCIA:

ABSORÇÃO
TRANSPORTE
REDISTRIBUIÇÃO
FUNÇÕES





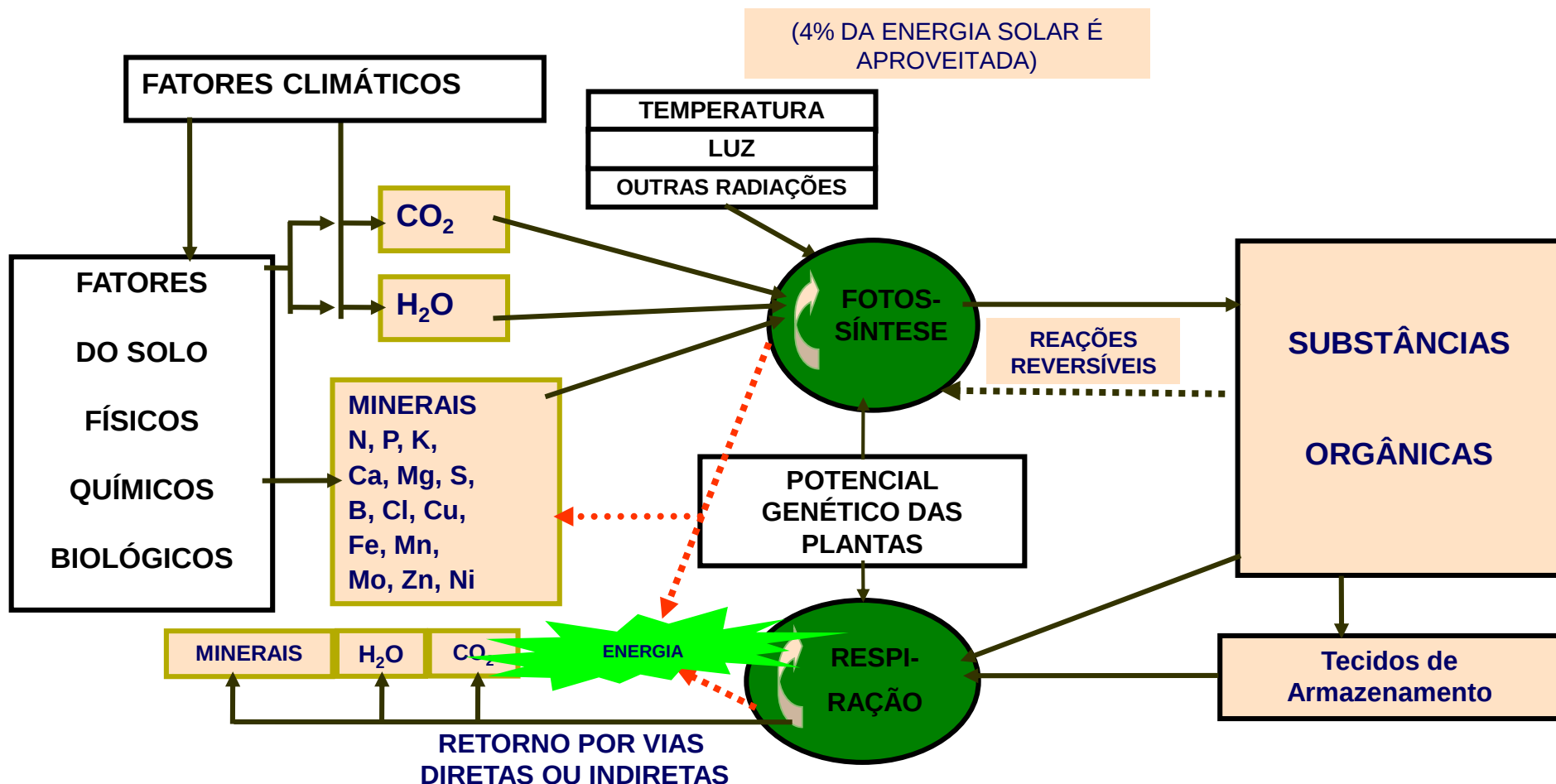
SOLUÇÃO
DO
SOLO

ESQUEMA SIMPLIFICADO DA PRODUÇÃO DE SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS NAS PLANTAS (BERGMANN & NEUBERT, 1976)

COMPONENTES DE FORMAÇÃO

TRANSFORMAÇÕES ENERGÉTICAS

ACUMULADORES DE ENERGIA

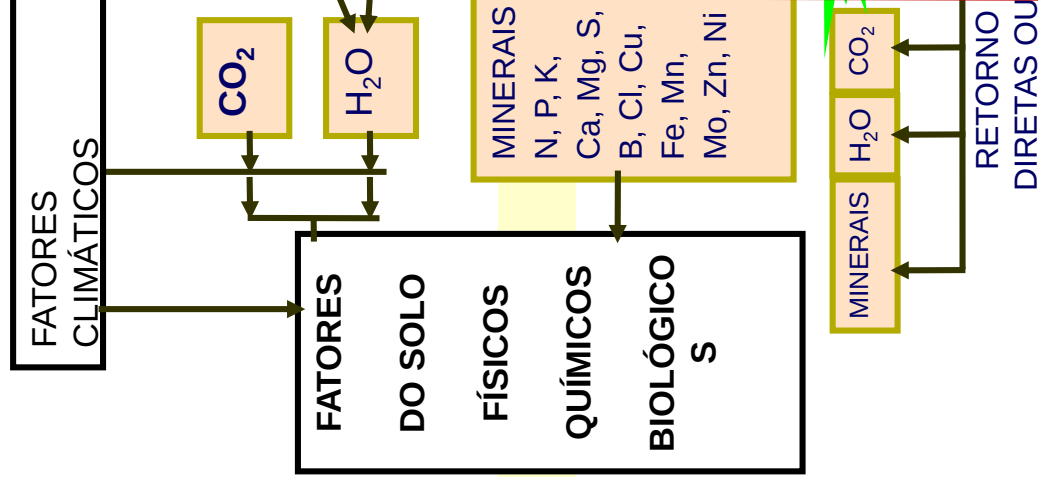


(Bergmann & Neubert, 1976), Modificado DEON, 2006



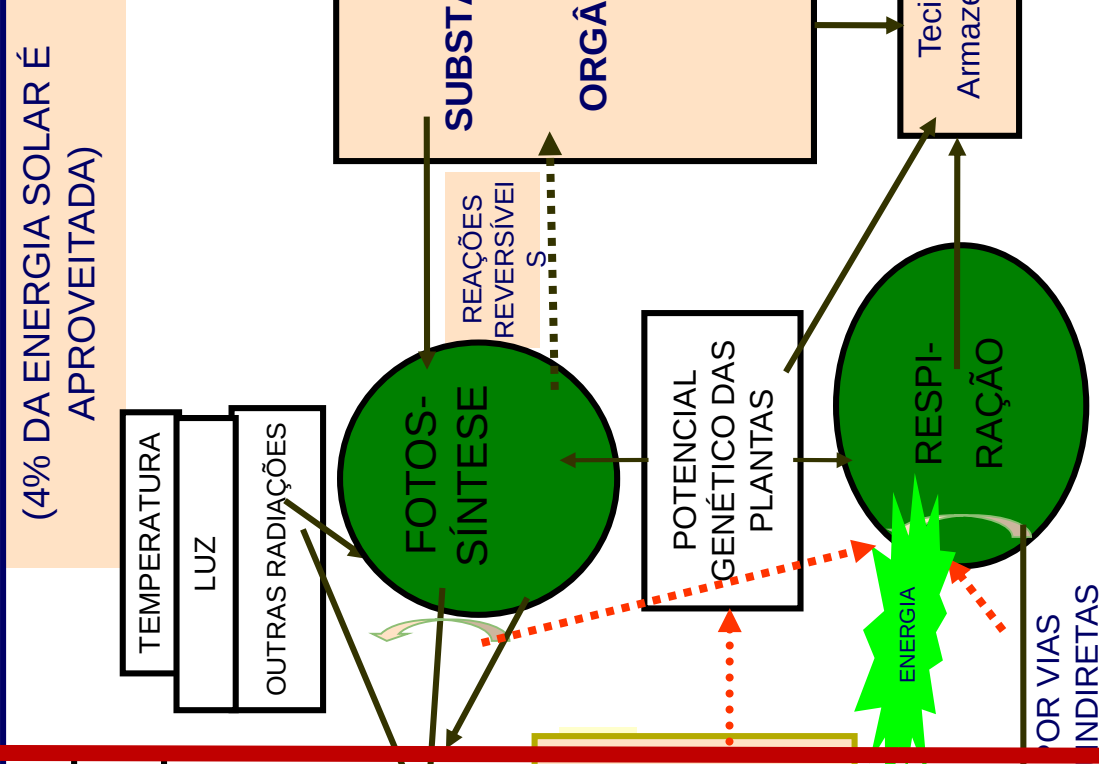
ESQUEMA SIMPLIFICADO DA PRODUÇÃO DE SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS NAS PLANTAS (BERGMANN & NEUBERT, 1976)

COMPONENTES DE FORMAÇÃO

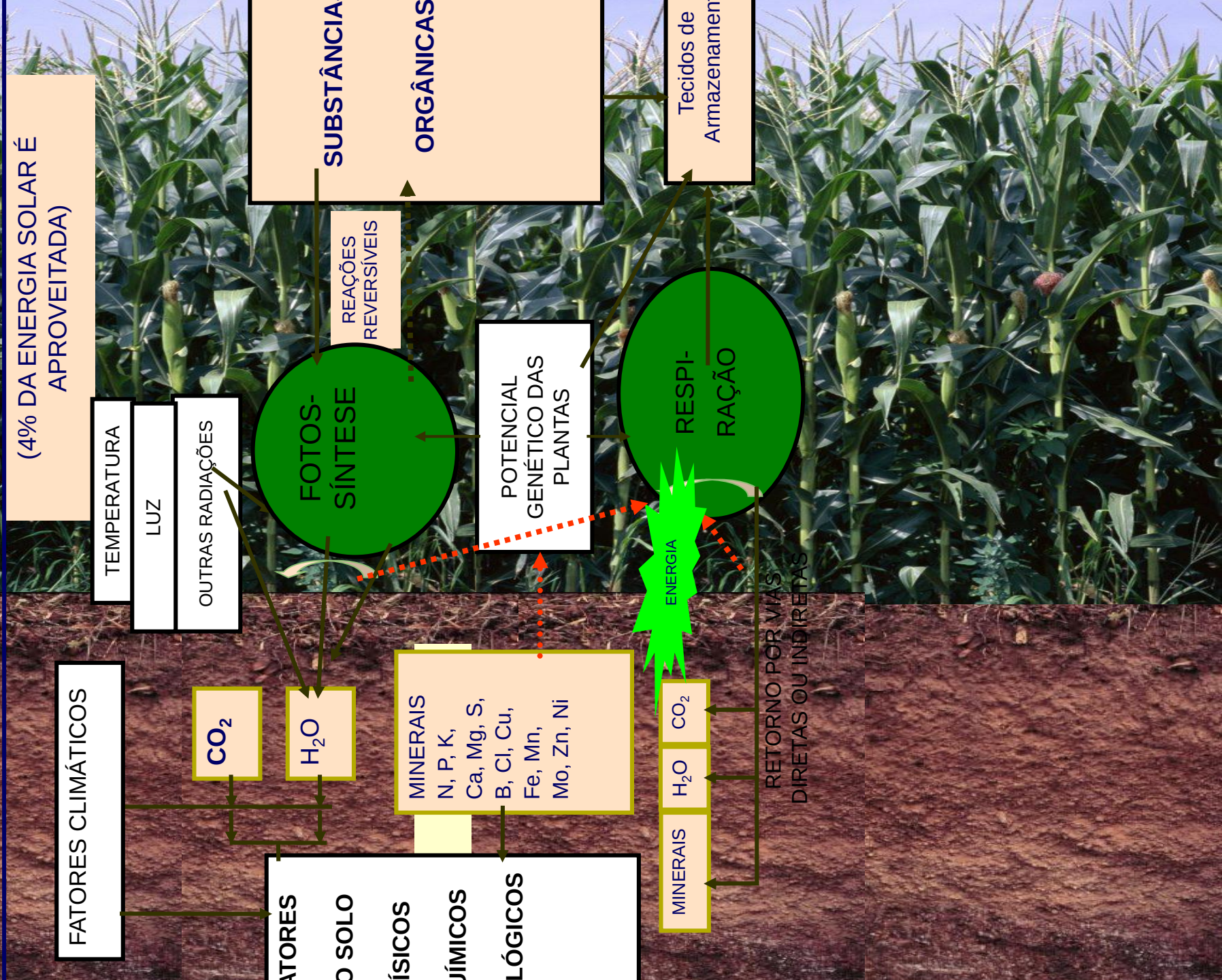


NUTRIENTE NA SOLUÇÃO DO SOLO

TRANSFORMAÇÕES ENERGÉTICAS ACUMULADORES DE ENERGIA



FOTOSSÍNTESE



ASPECTOS BÁSICOS DE QUÍMICA DO SOLO:

Fase Sólida

Fase Solução

Formação de P – Ca, Fe e/ou Al

EQUILÍBRIO

CONSEQUÊNCIAS:

⇓ [P] na solução

Transporte até superfície da raiz por difusão

⇓

Disponibilidade de P às plantas



Al^{3+}

H^+

K^+

Ca^{2+}

Mg^{2+}

H_2PO_4^-

Ca^{2+}

H^+

H^+

Al^{3+}

H^+

H^+

NH_4^+

Cl^-

Fe^{3+}

H^+

SO_4^{2-}

Al^{3+}

K^+

H^+

H^+

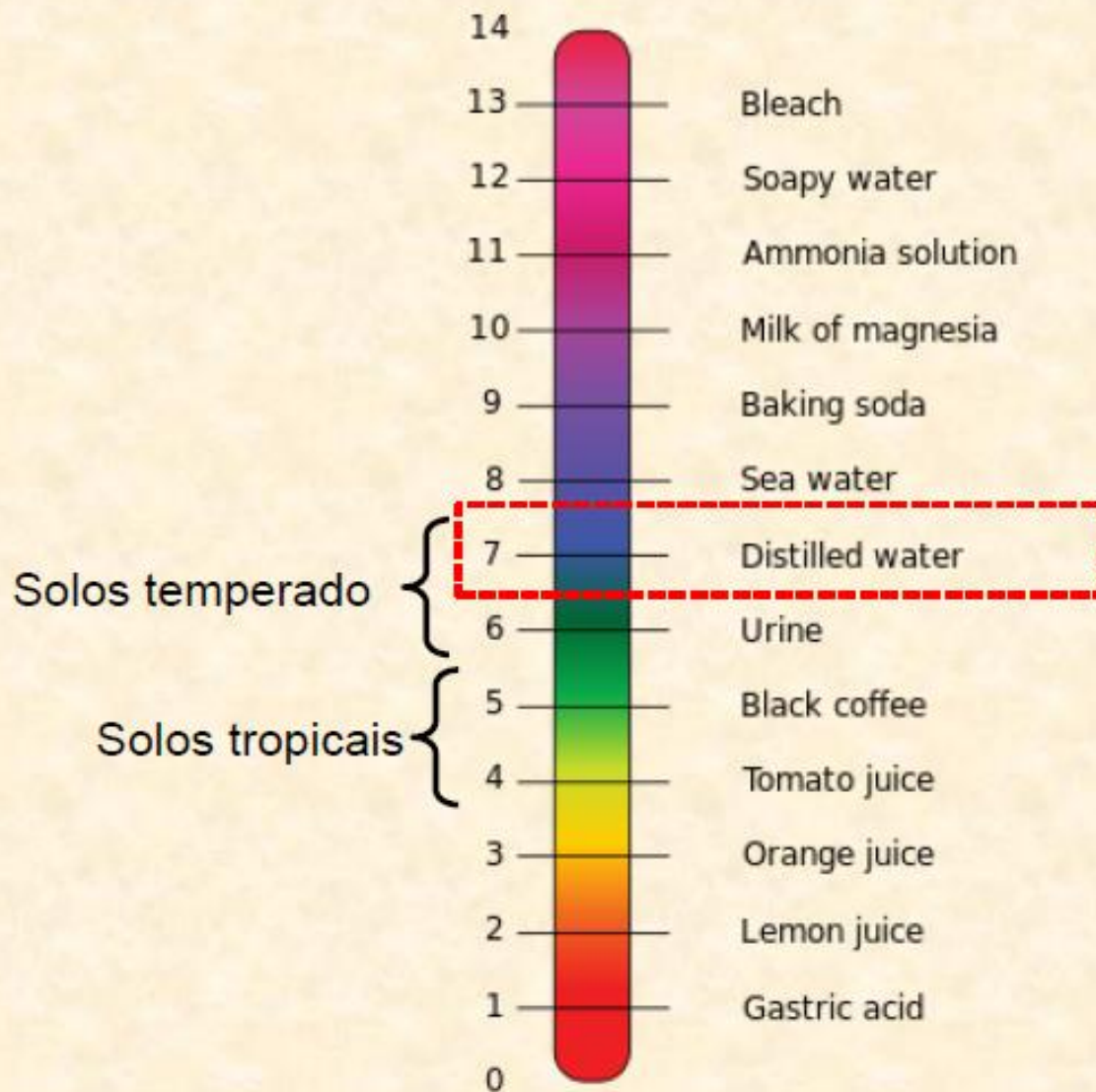
Ca^{2+}

REAÇÃO DO SOLO



Representa o caráter
“acido” ou alcalino do solo

Exemplos de valores de pH



CRITÉRIOS PARA CALAGEM

V(%)	pH - CaCl ₂	pH - Água	m(%)
4	3,8	4,4	90
12	4,0	4,6	68
20	4,2	4,8	49
28	4,4	5,0	32
36	4,6	5,2	18
44	4,8	5,4	7
52	5,0	5,6	0
60	5,2	5,8	0
68	5,4	6,0	0
76	5,6	6,2	0
84	5,8	6,4	0
92	6,0	6,6	0
100	6,2	6,8	0

$$m = \frac{100 \times Al}{S + Al}$$

$$S + Al$$

$$N.C. = \frac{T(V2 - V1)}{100} \times F$$

$$F = 100/PRNT$$

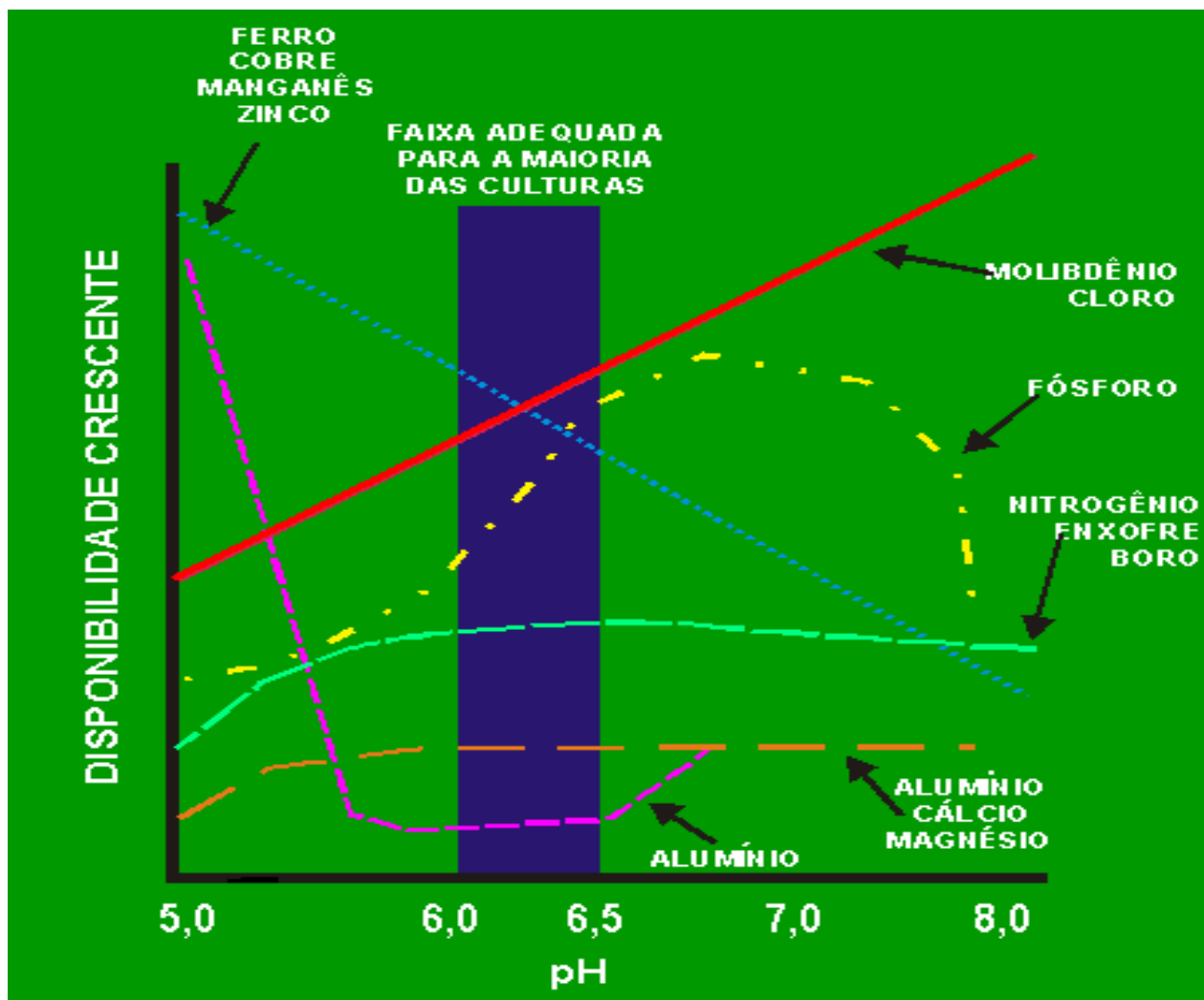
$$PRNT = Eq. CaCO_3 \times (0,4 + Y)$$

$$Eq. CaCO_3 = CaO\% \times 1,79 + MgO\% \times 2,46$$

X = % do calcário retido na peneira 50, porém que passa na peneira 10.

Y = % do calcário que passa na peneira 50.

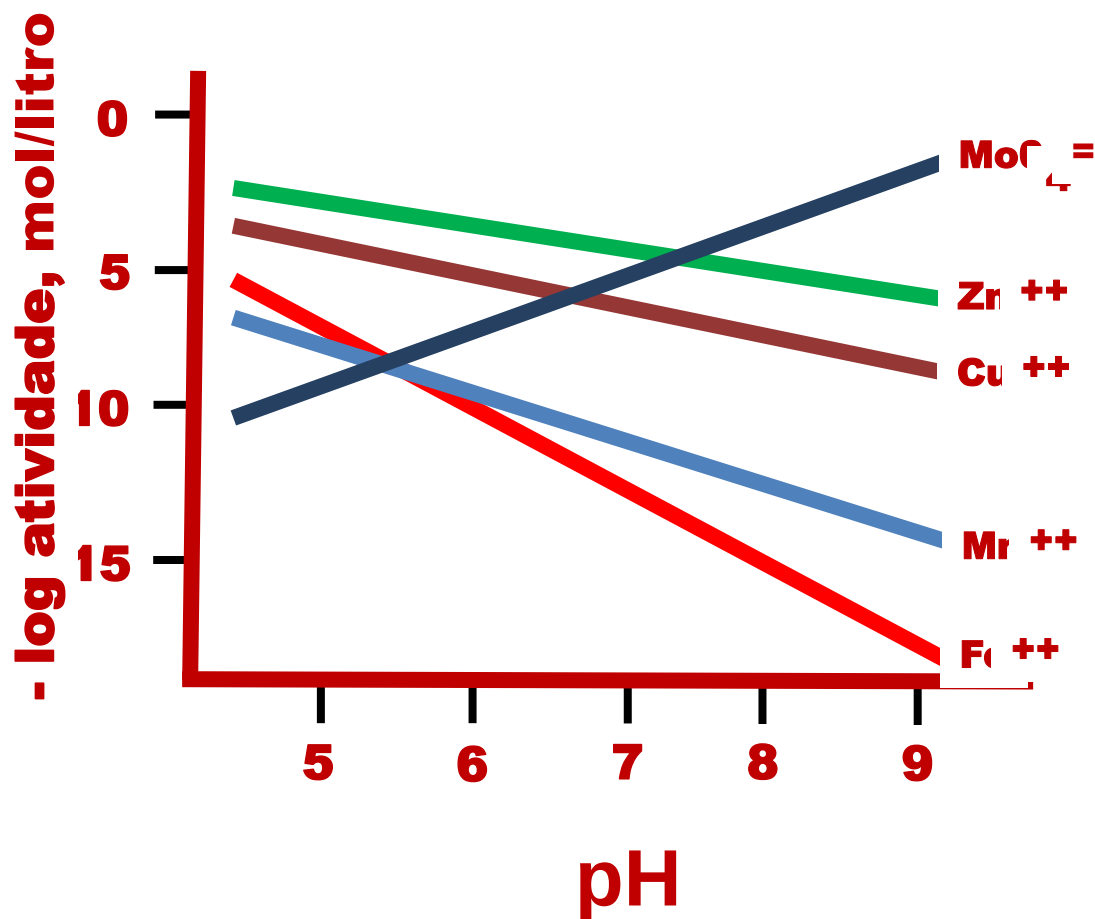
pH E A DISPONIBILIDADE DOS ELEMENTOS NO SOLO



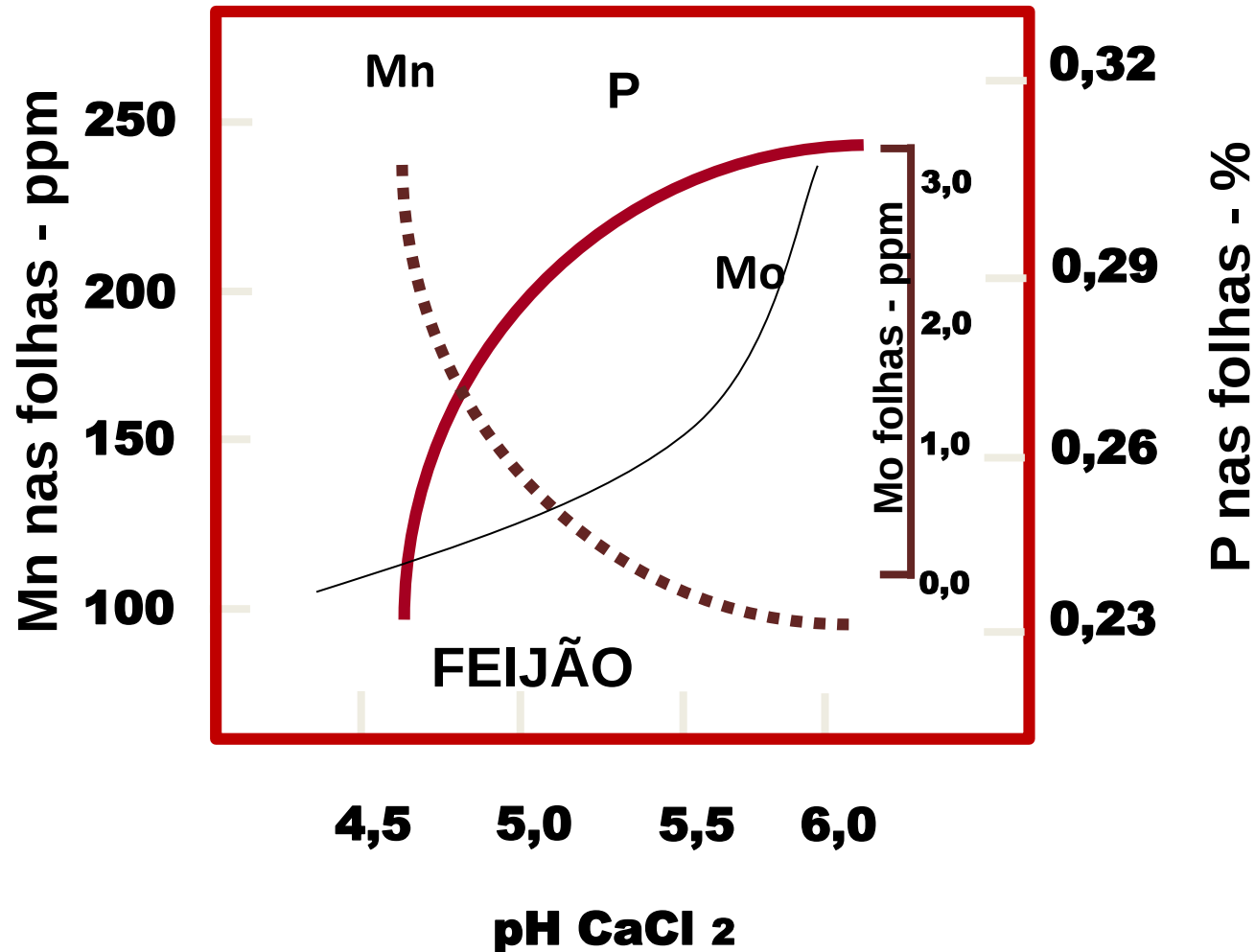
pH E A DISPONIBILIDADE DOS ELEMENTOS DO SOLO



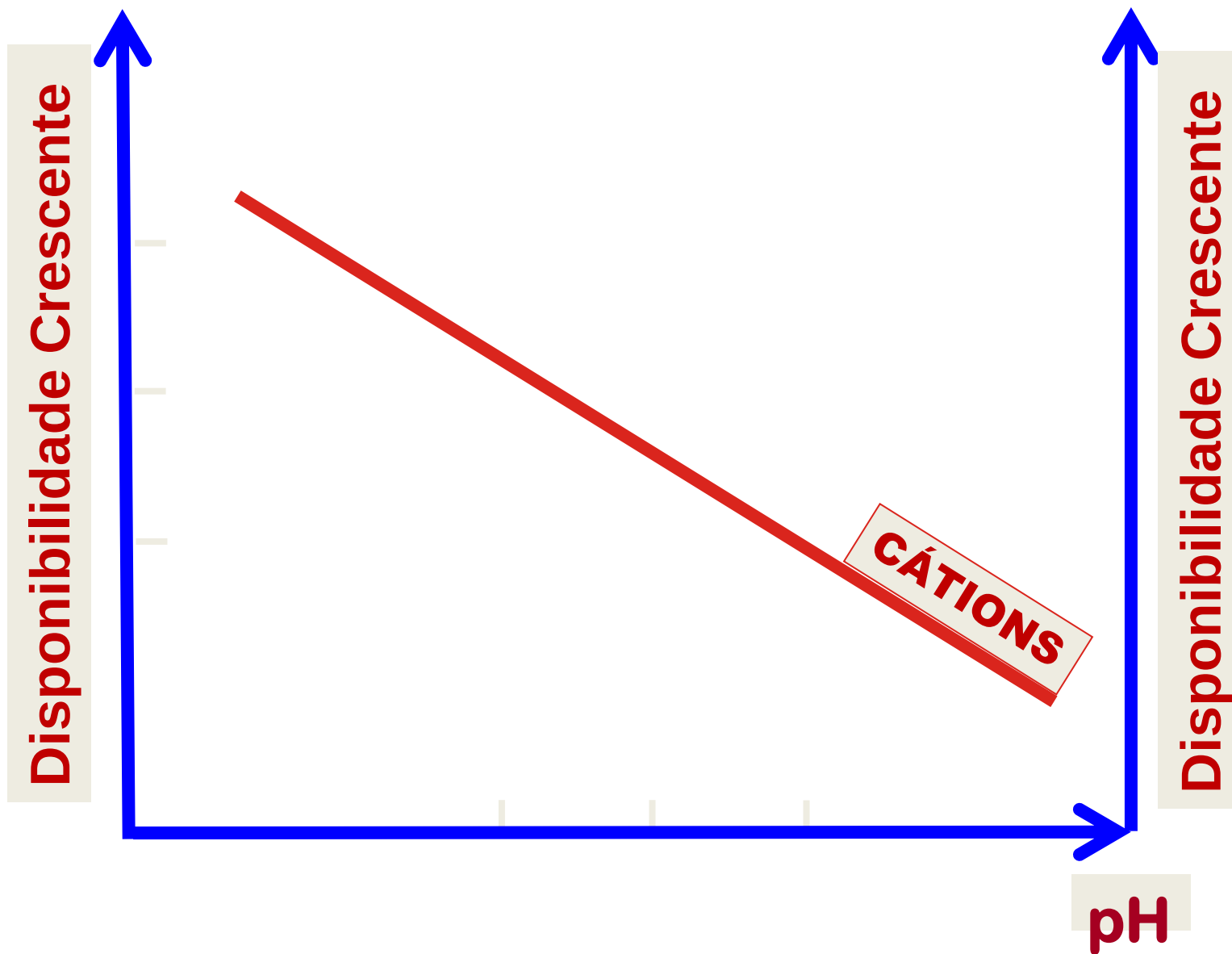
ESPÉCIES IÔNICAS EM EQUILÍBRIO NA SOLUÇÃO DO SOLO EM FUNÇÃO DO PH (LINDSAY, 1972)



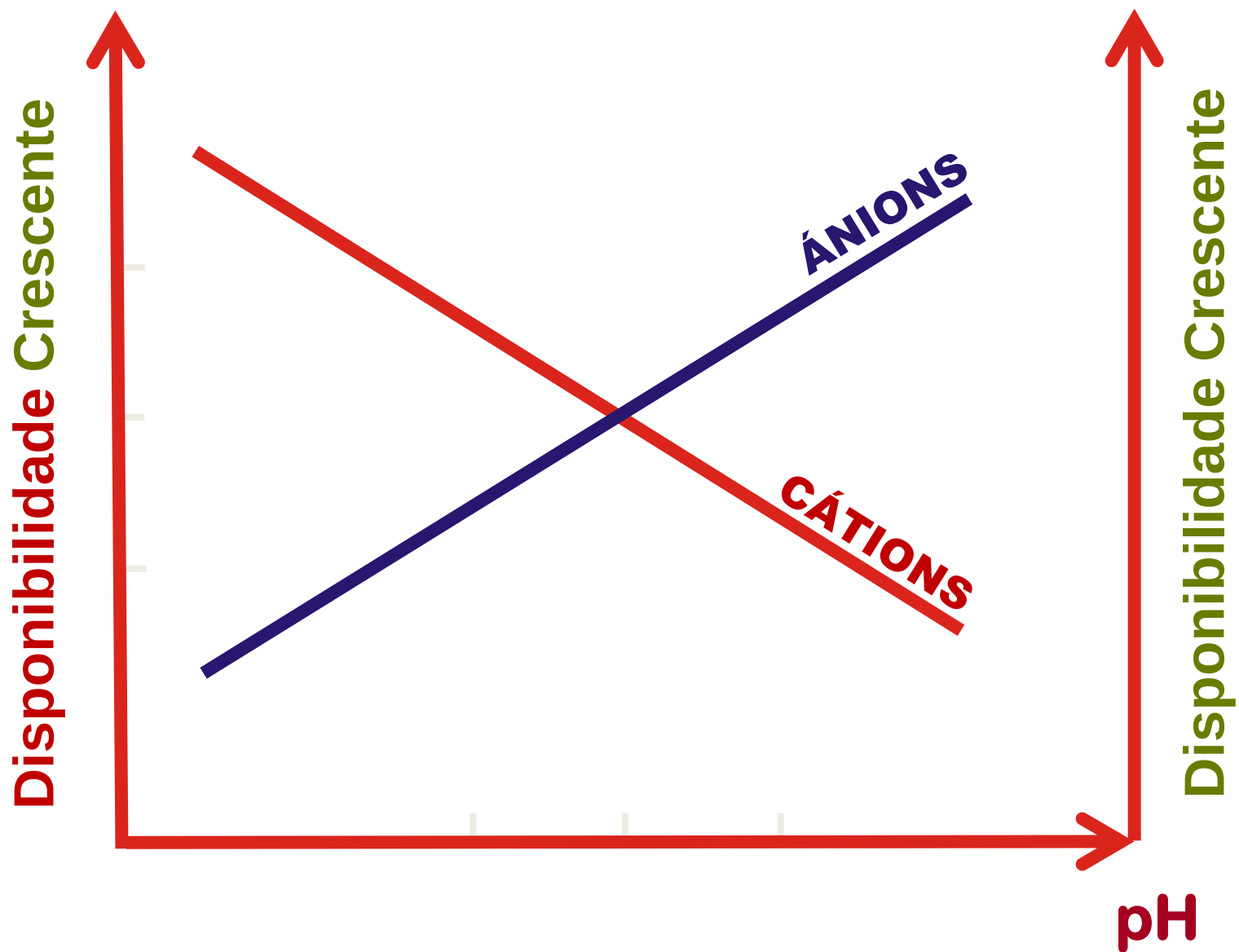
TEORES DE P, Mn, Zn E Mo EM FUNÇÃO DO pH (Quaggio, 1985)



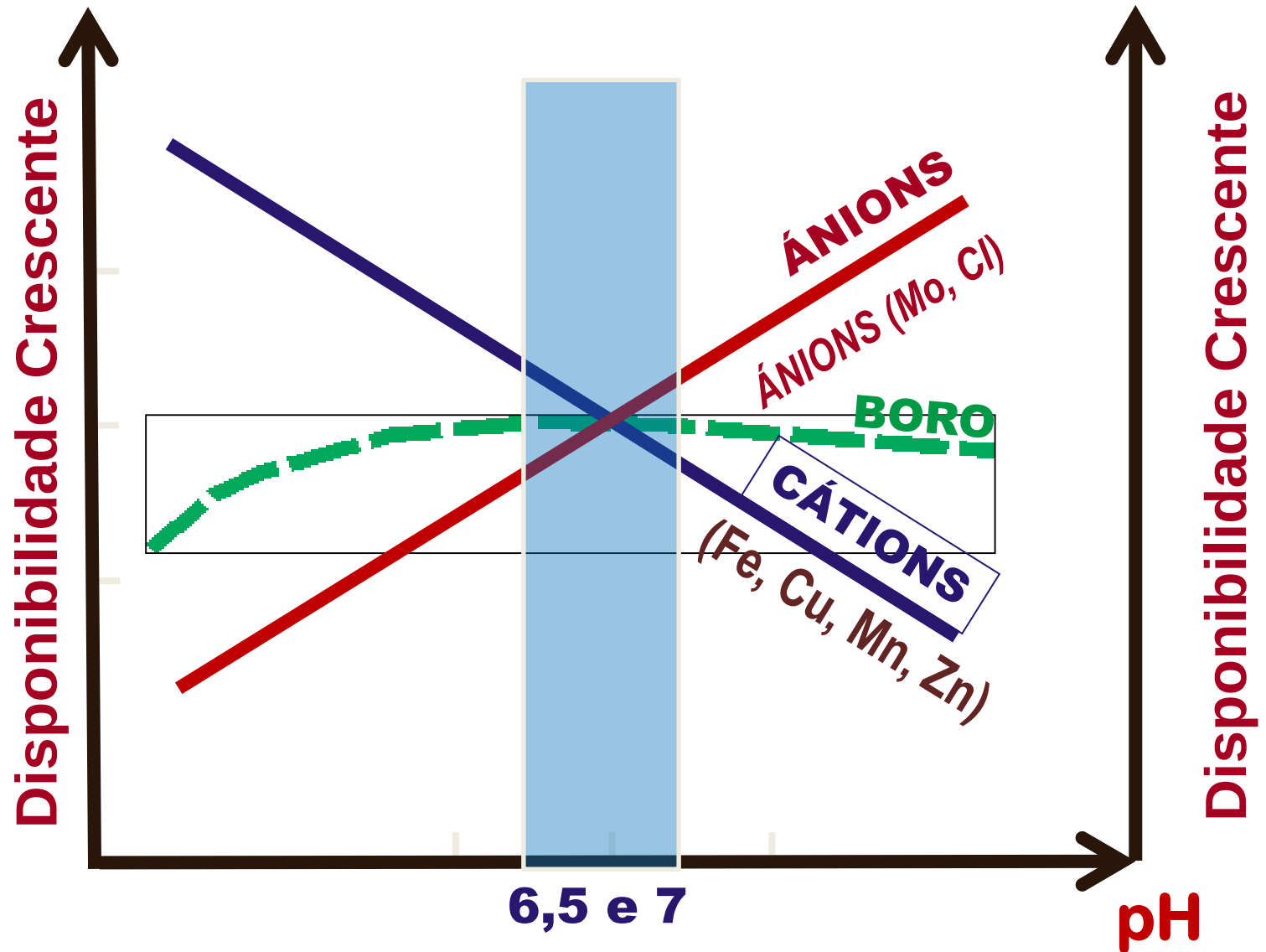
pH E A DISPONIBILIDADE DOS ELEMENTOS DO SOLO



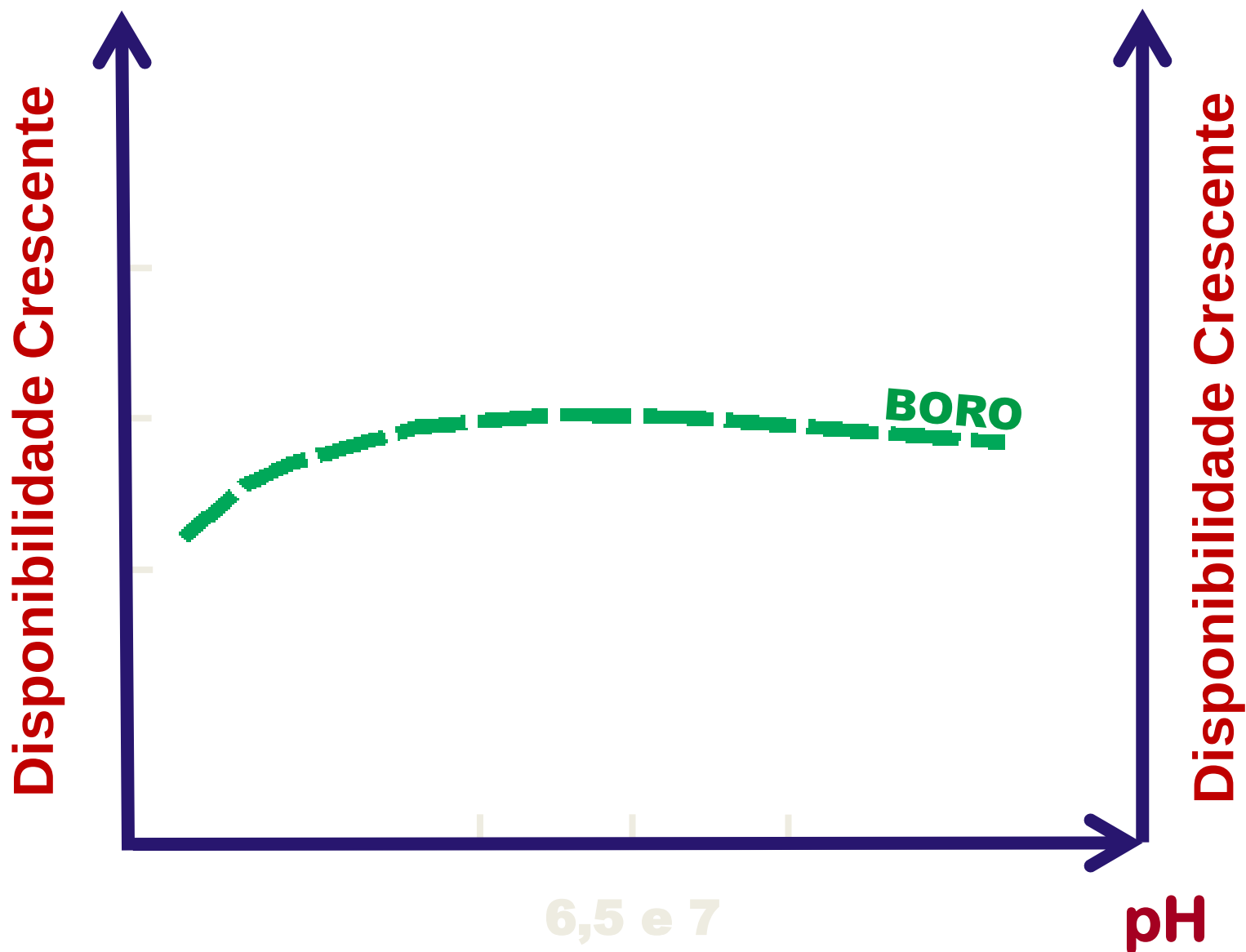
pH E A DISPONIBILIDADE DOS ELEMENTOS DO SOLO



pH E A DISPONIBILIDADE DOS ELEMENTOS DO SOLO



pH E A DISPONIBILIDADE DOS ELEMENTOS DO SOLO



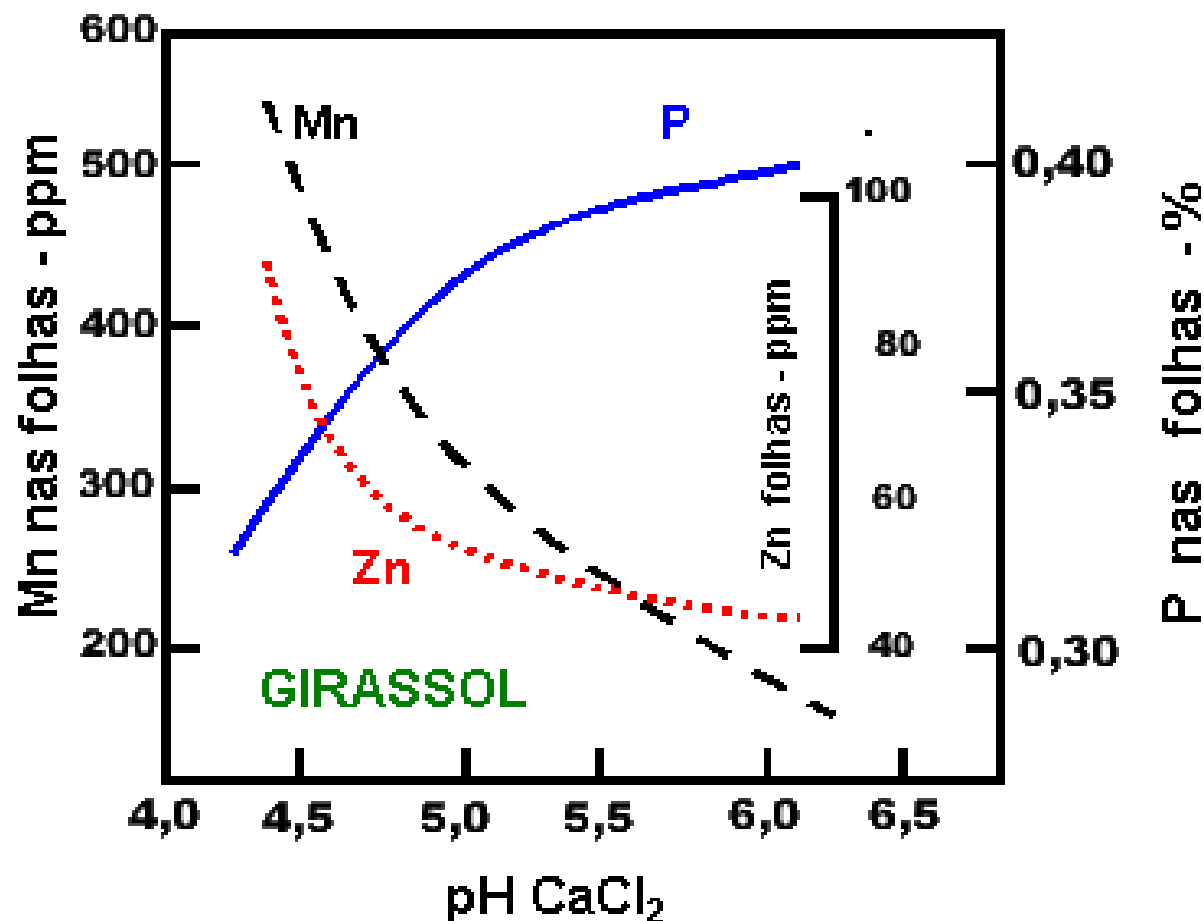
pH E A DISPONIBILIDADE DOS ELEMENTOS DO SOLO



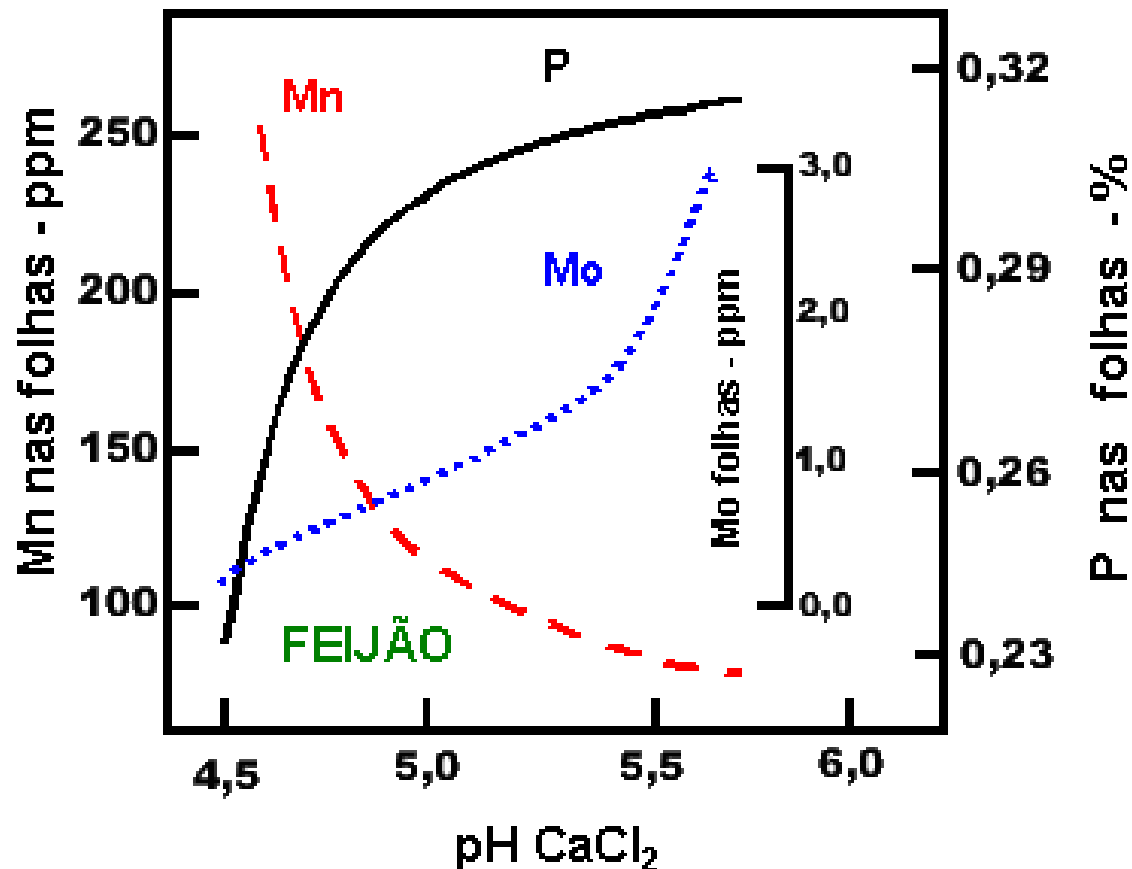
Antagonismo (Ex. Folhas de Café)

	FOLHAS SUP. (Ca g kg⁻¹)	FOLHAS INF.(Ca g kg⁻¹)
COMPLETO	1,00	0,92
Omissão de Ca	0,35	0,80
+ K (1000 mg kg⁻¹)	0,55	0,90
Omissão de K	1,22	1,67
	FOLHAS SUP. (Mg g kg⁻¹)	INF.(Mg g kg⁻¹ FOLHAS)
COMPLETO	0,25	0,24
Omissão de Mg	0,05	0,06
+ K	0,16	0,13
Omissão de K	0,43	0,45
	FOLHAS SUP. (K g kg⁻¹)	FOLHAS INF. (Kg kg⁻¹)
COMPLETO	1,90	1,73
Omissão de Ca	1,83	2,07
+ Ca (280 mg kg⁻¹)	1,92	1,82
+ Mg (240 mg kg⁻¹)	1,56	1,61
+ K (1000 mg kg⁻¹)	2,67	2,67

Variação nos Teores de Fósforo, Manganês, Zinco e Molibdênio em Função do pH



Variação nos Teores de Fósforo, Manganês, Zinco e Molibdênio em Função do pH



Funções do Cálcio

- **COMPONENTE DA PAREDE CELULAR**
- **ESTABILIZAÇÃO DAS MEMBRANAS CELULARES**
- **ATIVAÇÃO ENZIMÁTICA E DISTRIBUIÇÃO INTRACELULAR**

- Definição de pH

- $\text{pH} = -\log (\text{H}^+)$

Exemplos:

- $\text{pH} = 4 \longrightarrow (\text{H}^+) = 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$

- $\text{pH} = 6 \longrightarrow (\text{H}^+) = 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$

pH 4 $\longrightarrow$ **pH 6** $\longrightarrow$ Atividade do H^+ diminui **100** vezes

2. CAUSAS DA ACIDEZ

a. Regime pluvial: é o principal fator

• clima úmido + drenagem = lixiviação das “bases” →
muito H e Al nos colóides → pH baixo

• clima seco = acúmulo de “bases” →
pouco H e Al nos colóides → pH alto

Importância da drenagem → solos de várzea

b. Material de origem

- Rochas ácidas (granitos/arenitos):



tendem a originar solos mais ácidos

- Rochas básicas (calcário/basalto):



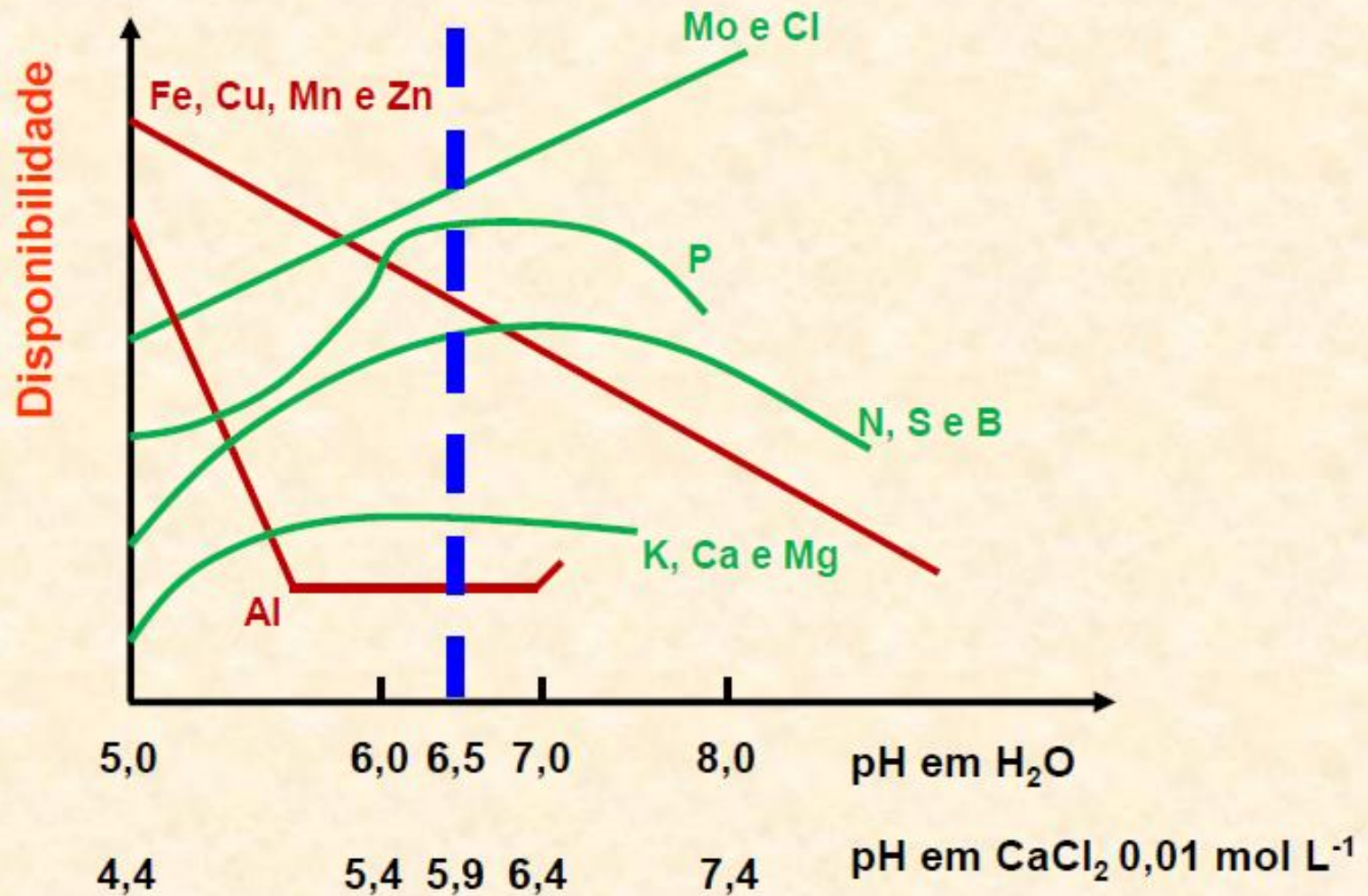
tendem a originar solos menos ácidos

c. Alguns fertilizantes

ex: sulfato de amônio: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$



Disponibilidade dos elementos em função do pH



COMPONENTES DA ACIDEZ DO SOLO

- Acidez ativa

- Acidez trocável

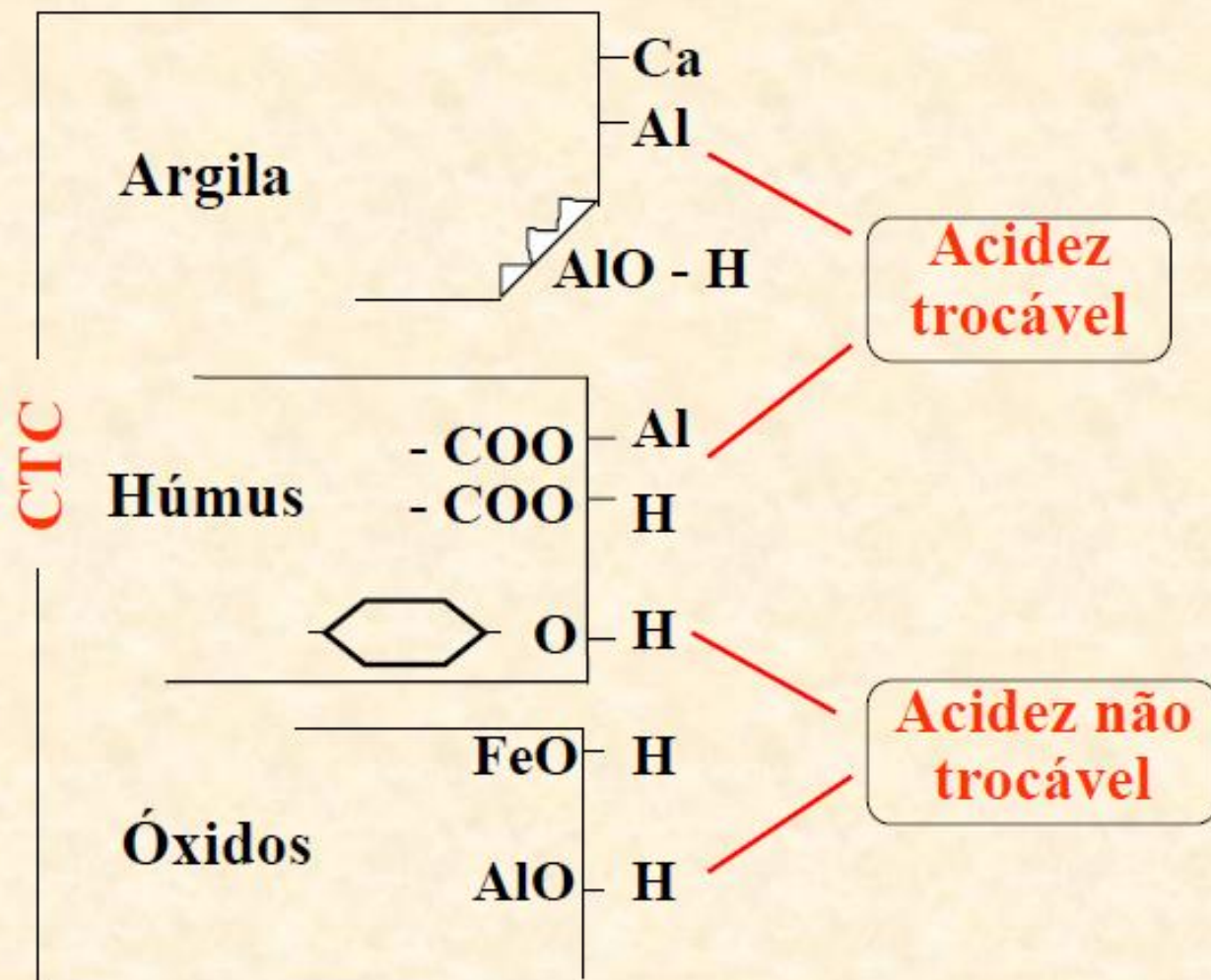
- Acidez não trocável



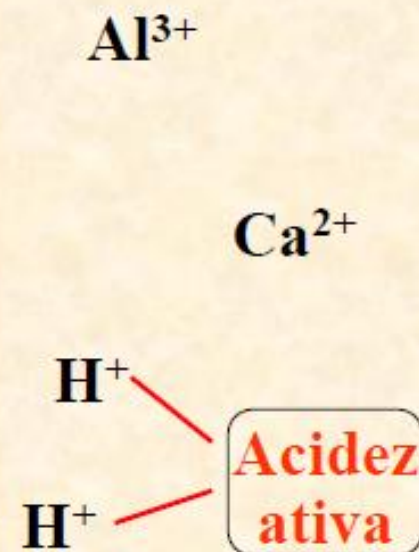
acidez
potencial

COMPONENTES DA ACIDEZ DO SOLO

Fase sólida “Reativa”



Fase líquida



Acidez ativa = pH

Acidez trocável = Al^{3+} trocável

Acidez não trocável = H covalente

Acidez trocável + não trocável

Acidez potencial

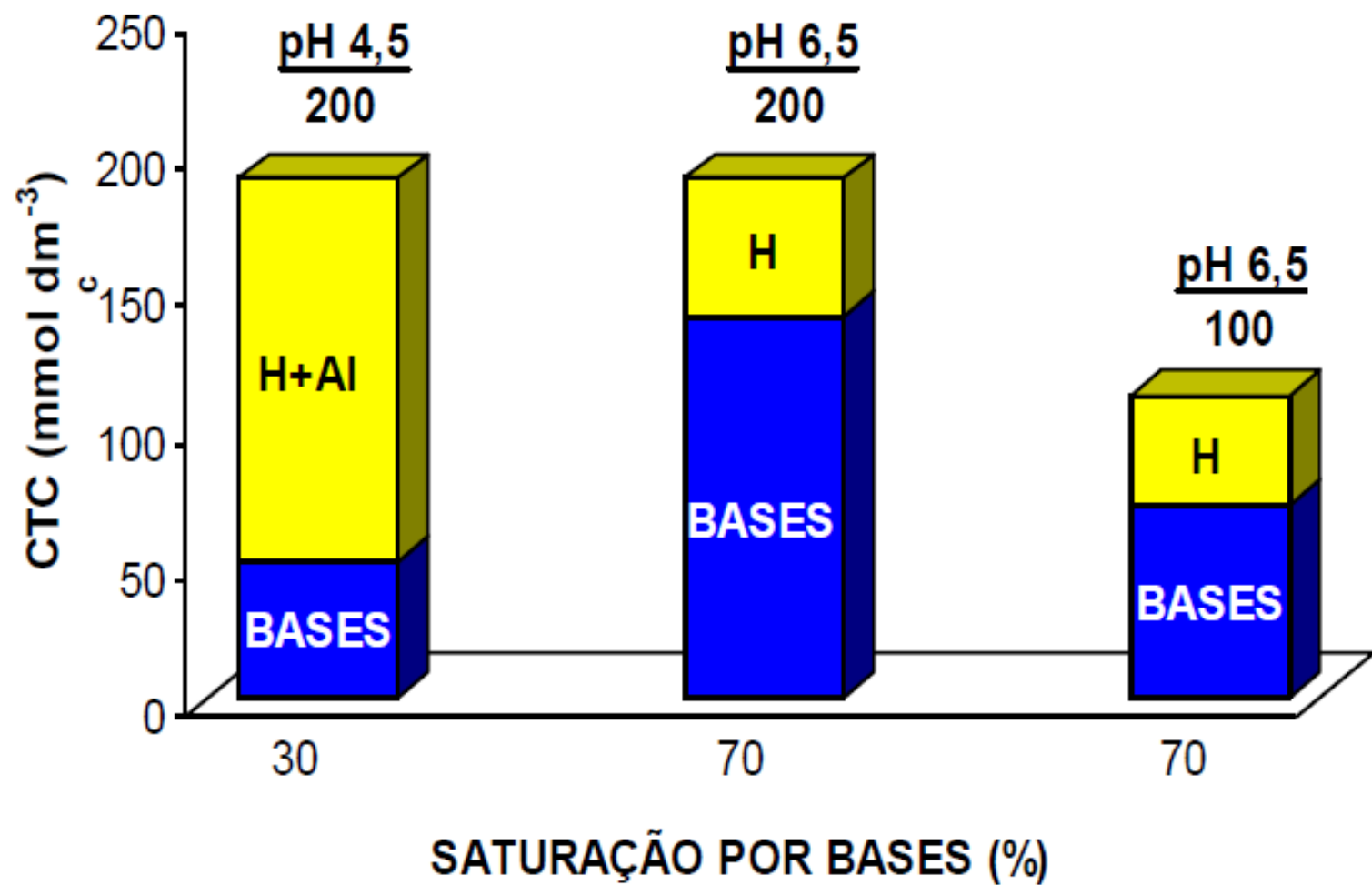
- Aparece como (H + Al) na CTC
- Ligada ao poder tampão

Poder tampão do solo

Resistência que o solo oferece às mudanças de pH, e está intimamente ligado ao teor de matéria orgânica e à textura do solo.

Algumas definições importantes

- a) Soma de bases (SB ou S): **$SB = K + Ca + Mg (+ Na)$**
- b) CTC efetiva (ao pH atual do solo): **$CTC \text{ efetiva} = SB + Al$**
- c) CTC total (a pH 7,0): **$CTC = SB + (H+Al)$**
- d) Porcentagem de saturação por bases (V%):
 $V\% = SB \times 100 / CTC \text{ (pH 7,0)}$
- e) Porcentagem de saturação por Alumínio (m%):
 $m\% = Al \times 100 / CTC \text{ efetiva}$



✓ Nutrientes essenciais

Critérios de essencialidade:

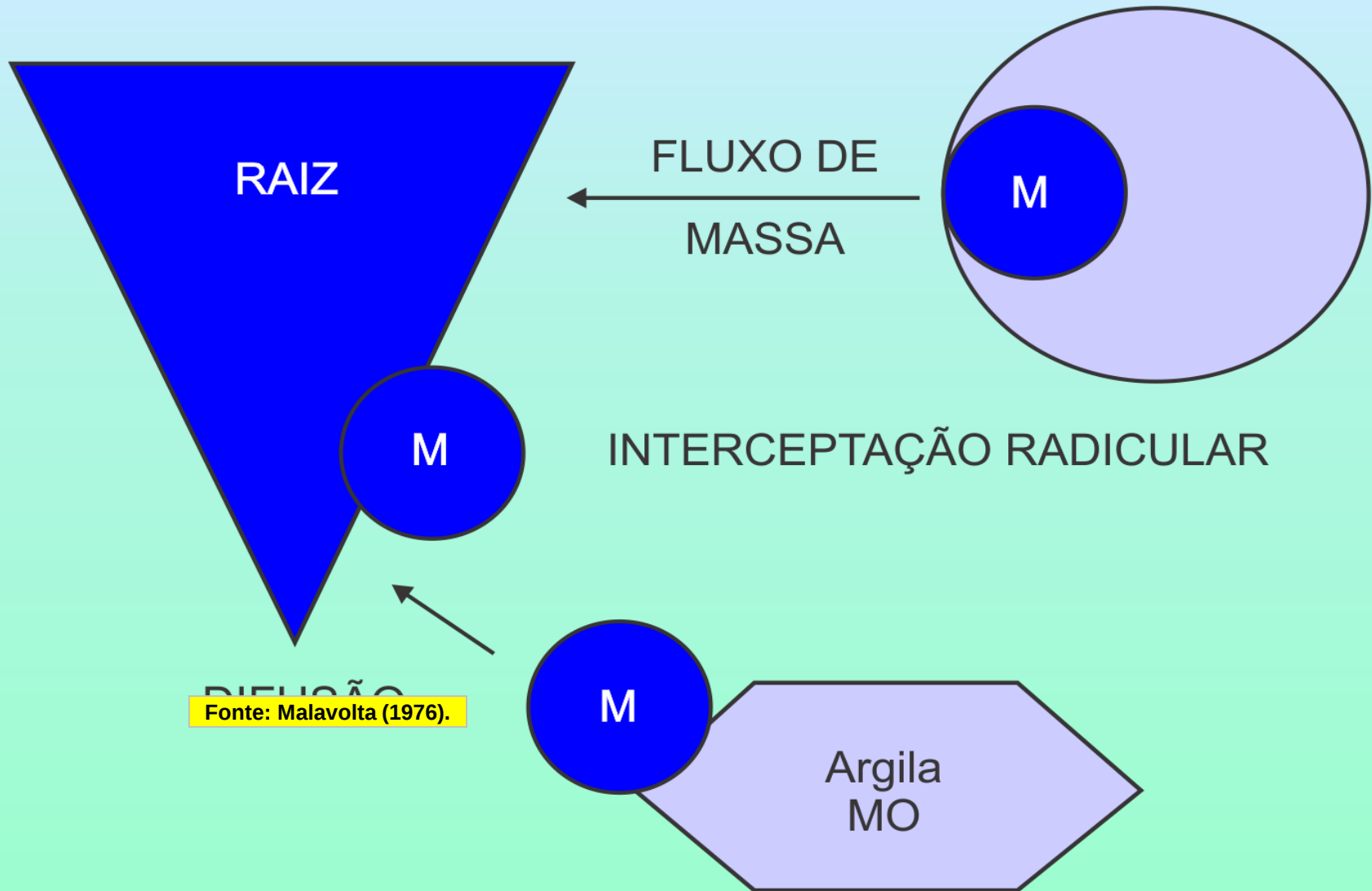
- direto
- indireto

Elemento	Símbolo	Forma absorvida
Carbono	C	CO ₂
Oxigênio	O	H ₂ O
Hidrogênio	H	
Nitrogênio	N	NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺
Fósforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻
Potássio	K	K ⁺
Cálcio	Ca	Ca ²⁺
Magnésio	Mg	Mg ²⁺
Enxofre	S	SO ₄ ²⁻
Ferro	Fe	Fe ²⁺
Manganês	Mn	Mn ²⁺
Zinco	Zn	Zn ²⁺
Cobre	Cu	Cu ²⁺
Boro	B	H ₃ BO ₃
Cloro	Cl	Cl ⁻
Molibdênio	Mo	HMoO ₄ ⁻

➡ Nutrientes benéficos ou acessórios: cobalto (Co), silício (Si), sódio (Na)

➡ Elementos tóxicos: alumínio (Al), manganês (Mn), ferro (Fe)

Representação esquemática dos mecanismos de contato íon-raiz



Fonte: Malavolta (1976).

Relação entre o processo de contato e a localização dos fertilizantes

Elemento	Processo de contato (% do total)			Aplicação do fertilizante
	Interceptação radicular	Fluxo de massa	Difusão	
Nitrogênio	1	99	0	Distante, em cobertura
Fósforo	2	4	94	Próximo das raízes
Potássio	3	25	72	Próximo das raízes, em cobertura
Cálcio	27	73	0	A lanço
Magnésio	13	87	0	A lanço
Enxofre	5	95	0	Distante, em cobertura (parte)
Boro	3	97	0	Distante, em cobertura
Cobre ¹	15	5	80	Próximo das raízes
Ferro ¹	40	10	50	Próximo das raízes
Manganês ¹	15	5	80	Próximo das raízes
Zinco ¹	20	20	60	Próximo das raízes
Molibdênio ²	5	95	0	Em cobertura (parte)

(1) Complementação com aplicação foliar. (2) Aplicação via semente e/ou foliar.

Fonte: Modificada de Malavolta (1976).

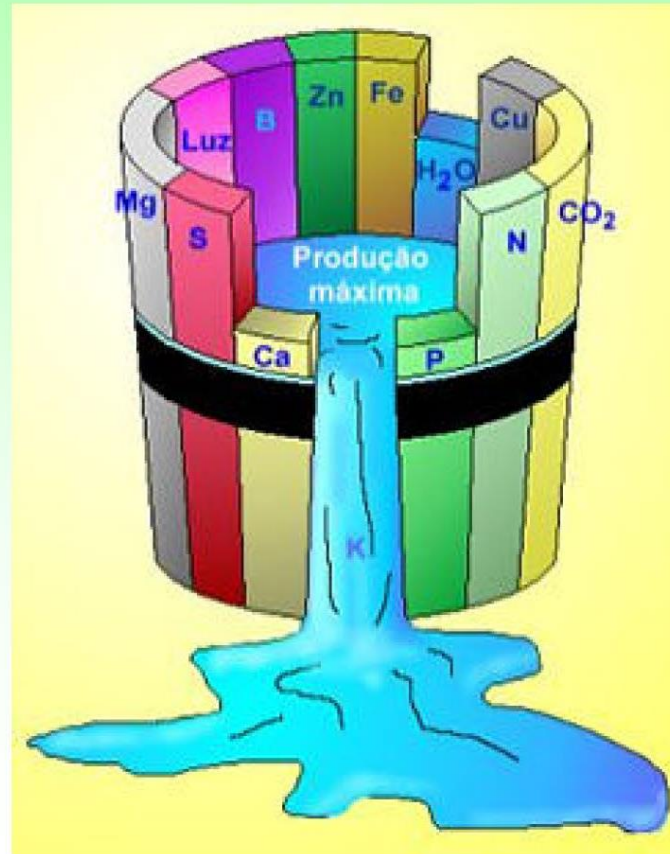
Leis importante da fertilidade do solo

1. Lei do Mínimo

**2. Lei dos Incrementos Decrescentes
(Mitscherlich)**

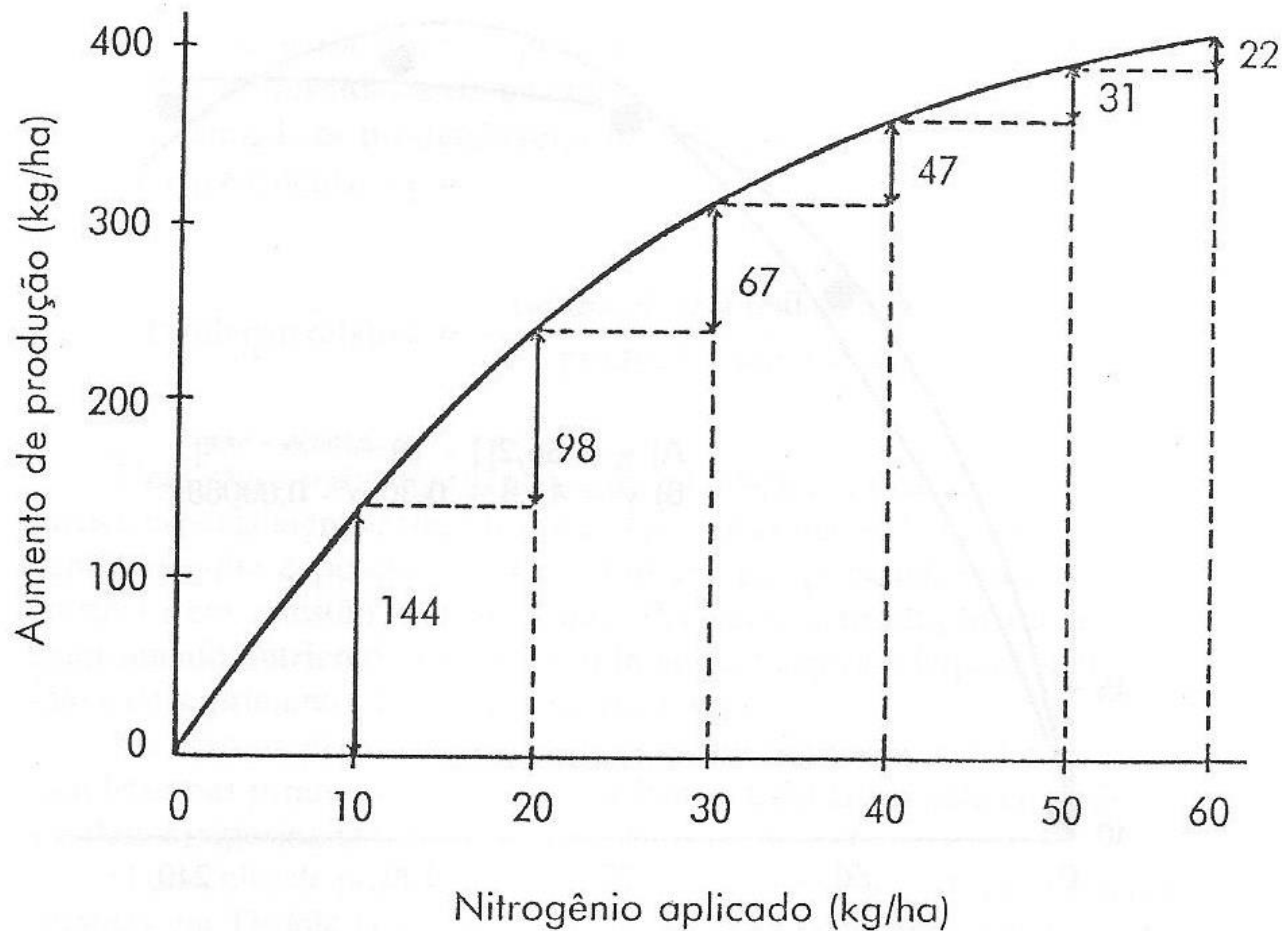
✓ Lei do mínimo (Justos Von Liebig):

O desenvolvimento da planta é limitado pelo nutriente que se encontra em mínimo em relação a sua necessidade, na presença de quantidades adequadas dos demais nutrientes.



Fonte: Lepch (1976).

Lei dos Incrementos Decrescentes (Mitscherlich)



Curva de resposta de algodão a nitrogênio (média de 15 ensaios) mostrando os incrementos de produção para aumentos sucessivos de 10 kg/ha na dose aplicada do nutriente.

O conceito de disponibilidade de nutrientes

P total no solo: 500 a 800 kg ha⁻¹ (forma não disponível)

P exigido pela planta: 10 - 15 kg ha⁻¹

P aplicado fertilizante: 40 a 50 kg ha⁻¹

Característica do solo e as exigências nutricionais das culturas

Solo x Cultura



Solos tropicais



**Calagem
Gessagem
Adubação**

Avaliação da Fertilidade do Solo

Avaliação da fertilidade do solo

Análise de solo

Princípio

**Correlação entre a quantidade do elemento extraído
revelado pela análise do solo e a produtividade**

Etapas de um programa de calagem, gessagem e adubação

Área de cultivo



Plano de amostragem



Coleta



Análise laboratorial



Interpretação



Recomendação



Aplicação

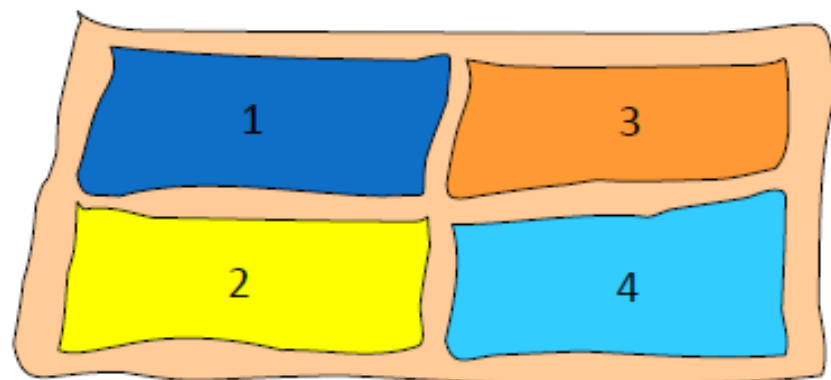


Análise foliar



Produtividade

Amostragem Tradicional



Calagem:

Talhão 1 = 1,0 t/ha

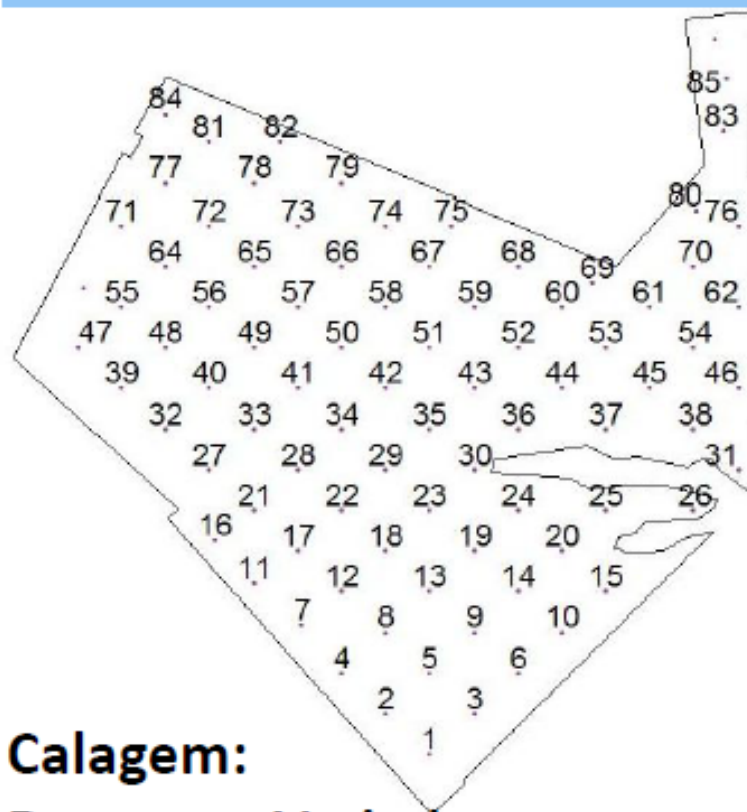
Talhão 2 = 1,5 t/ha

Talhão 3 = 2,5 t/ha

Talhão 4 = 3,0 t/ha

"AGRICULTURA PELA MÉDIA"

Amostragem Georeferenciada (em "grid")

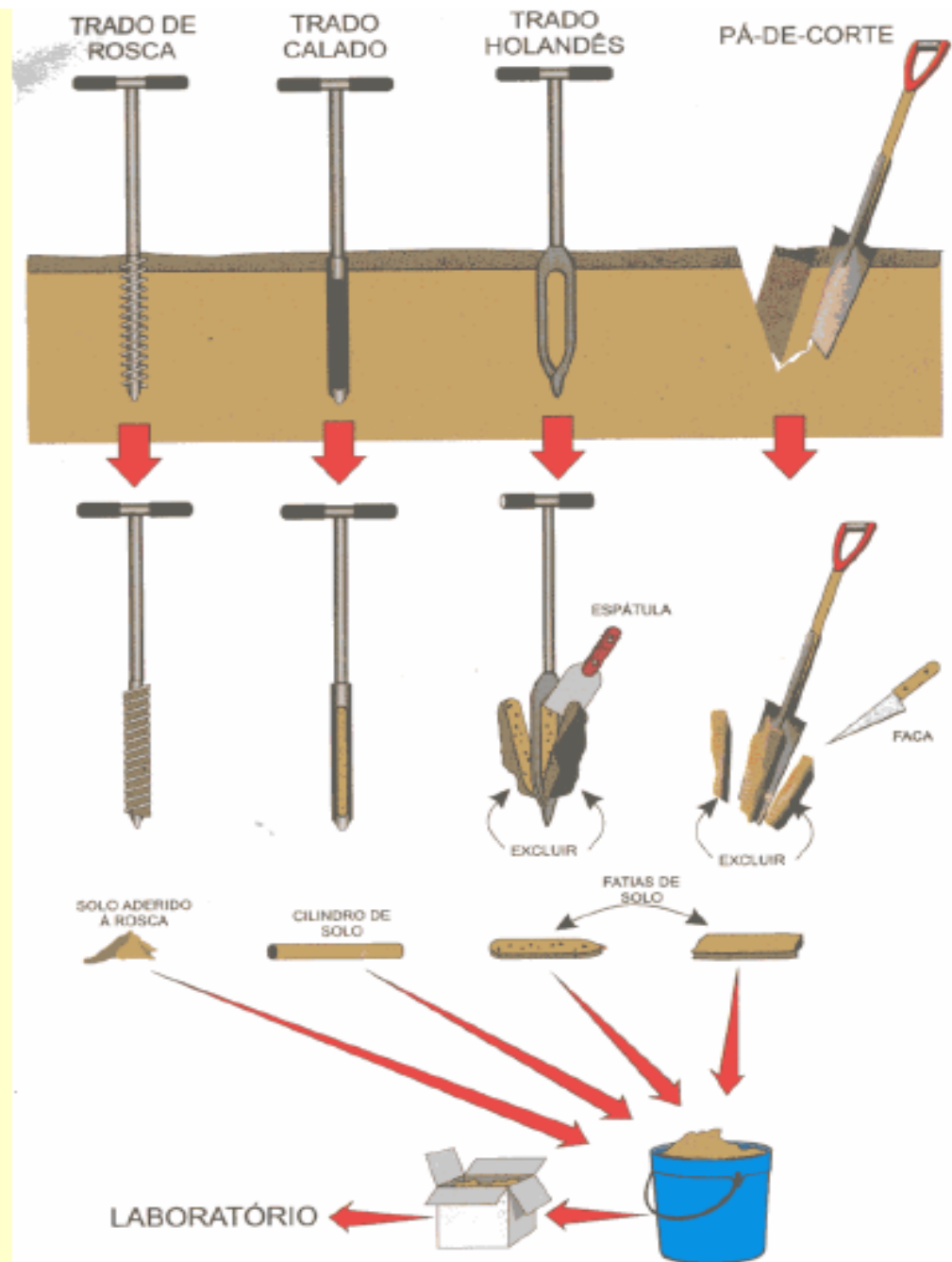


Calagem:

Dosagens Variadas

"AGRICULTURA DE PRECISÃO"

Ferramentas utilizadas para amostragem



ÁREA HOMOGÊNEA E Nº DE AMOSTRAS

**SP: área homogênea de 10 a 20 ha,
1 am. composta: am. simples: >12 e <20**

Profundidade de amostragem

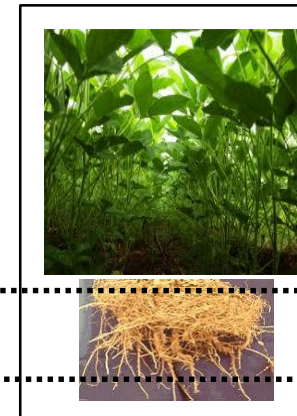
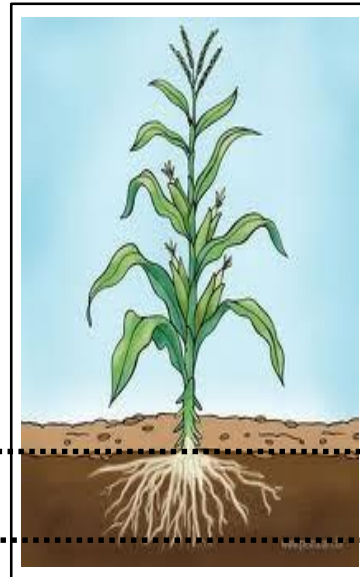
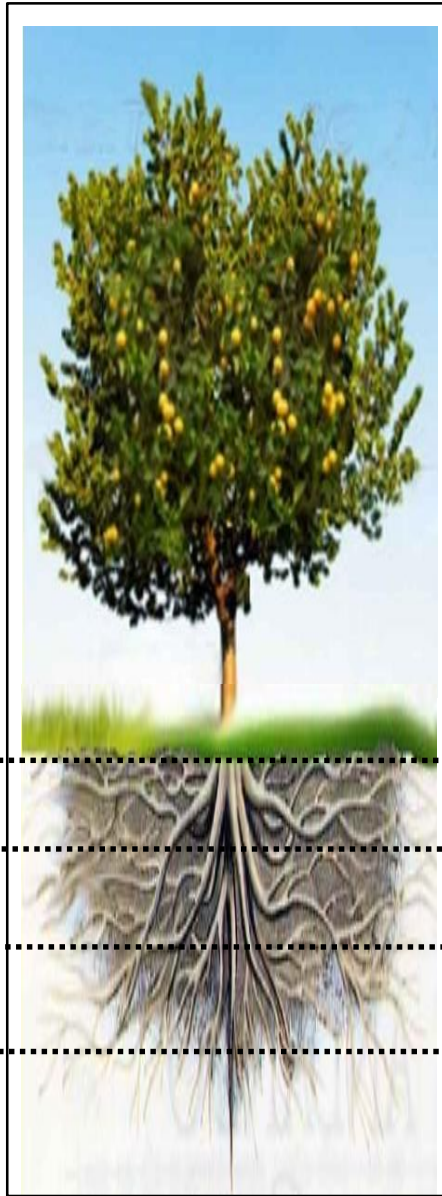
Recomendações oficiais

**SP - Culturas anuais e perenes (plantio):
0-20 cm de profundidade**

**PR - Pastagens: 0-10 cm
Culturas perenes: 0-20 e 20-40 cm**

Profundidade de amostragem: Bom senso!

Amostrar pelo menos:
0-20 cm
20-40 cm



0

0,2 m

0,4 m

0,6 m



**Amostra composta (500 g)
Identificada**

**Secagem ao Ar
Destorroamento
Peneiramento 2mm
TFSA**

10 ml

**pH em água
25 ml**

10 ml

**P e K
Extrator:**

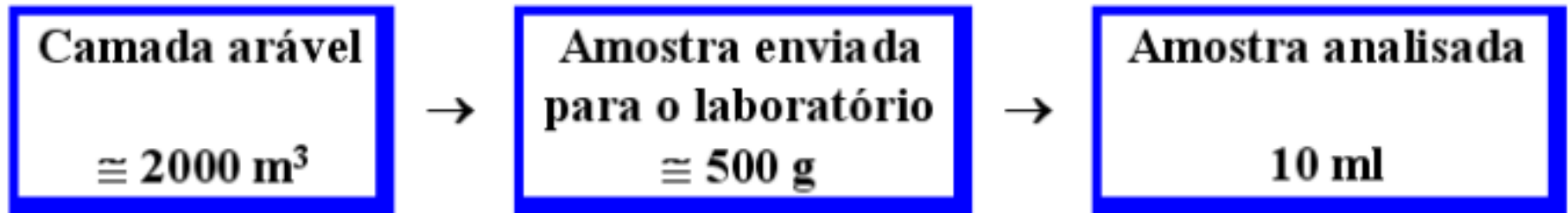
Mehlich ou Resina ou H_2SO_4

10 ml

**Ca, Mg e Al
Extrator: KCl**

Amostragem

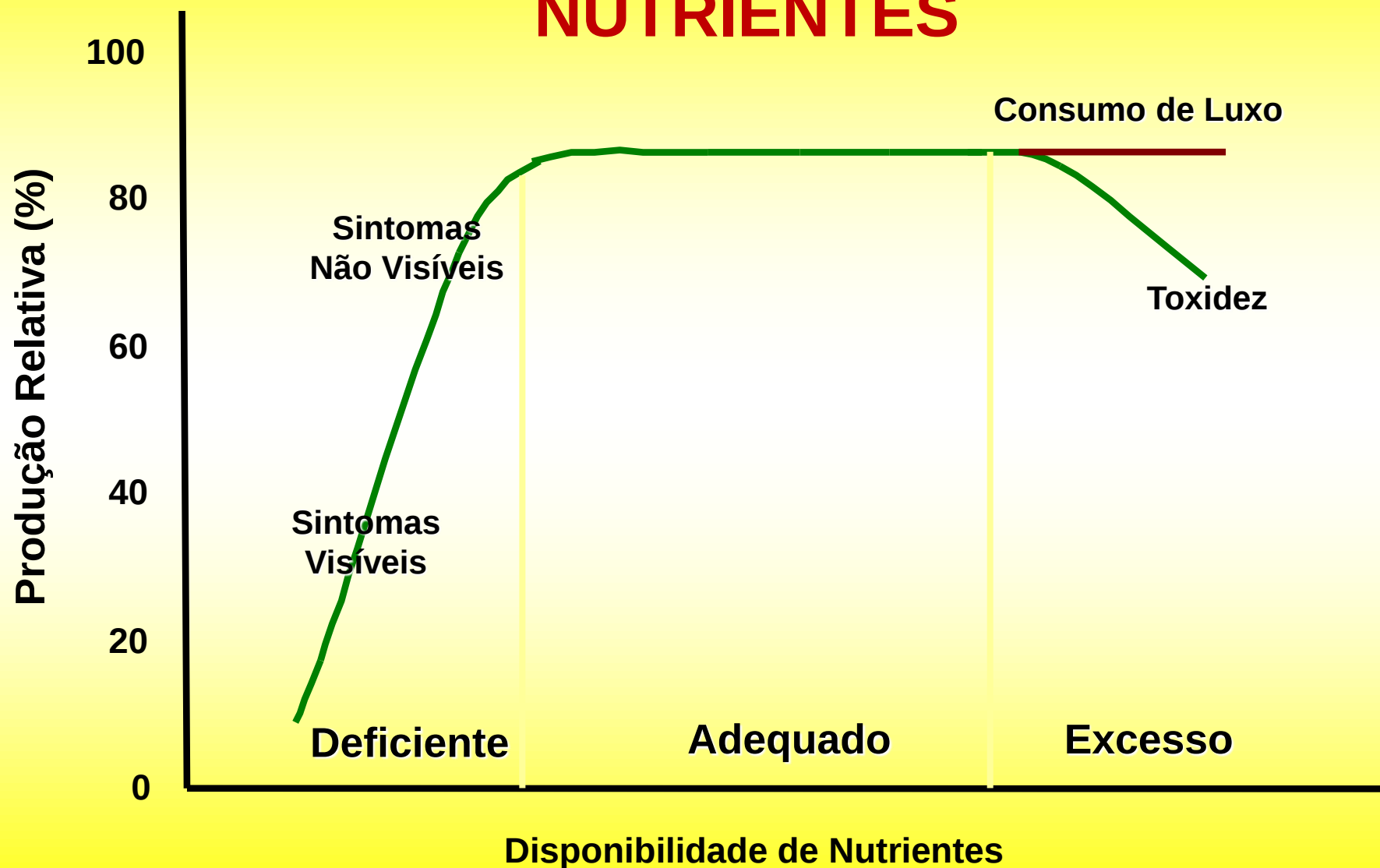
Importância





DINÂMICA DO NITROGÊNIO

NUTRIENTES



DINÂMICA DO NITROGÊNIO NO AMBIENTE

- **Compõe 78% da atmosfera terrestre**
- **usado pra produção de fertilizantes**
- **Faz parte de proteínas, aminoácidos, DNA, RNA**
- **É exigido em maior quantidade pelas culturas**

a). N Input in Cropland

b). N Output in Cropland

Input or Output
(kg ha⁻¹ year⁻¹)



c). Soil N Balance in Cropland

d). Surface N Balance in Cropland

N Balance
(kg ha⁻¹ year⁻¹)

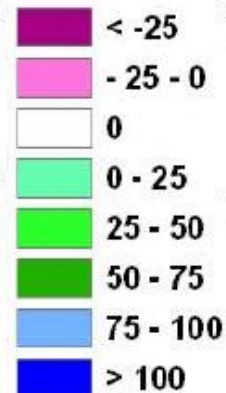
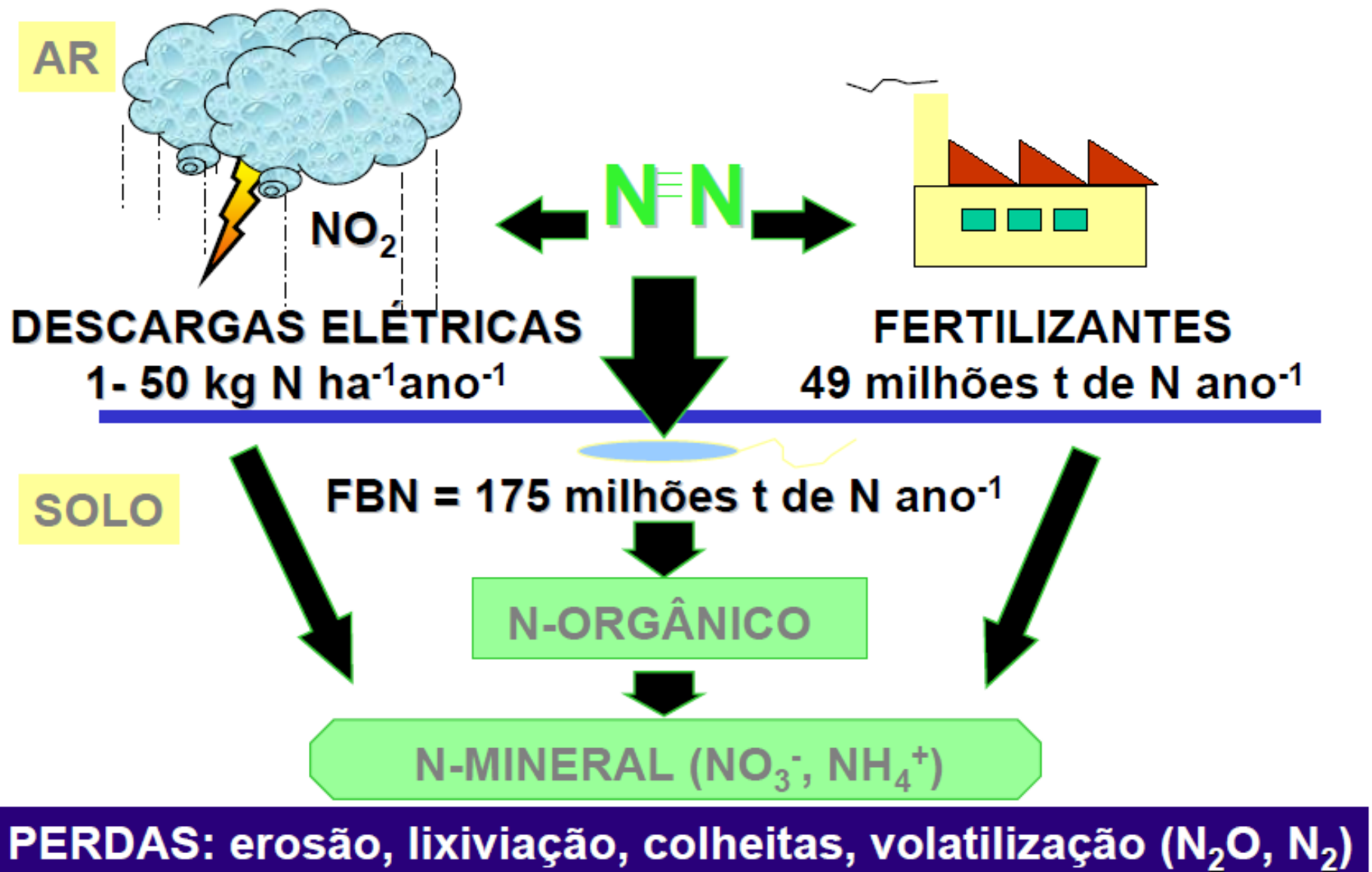
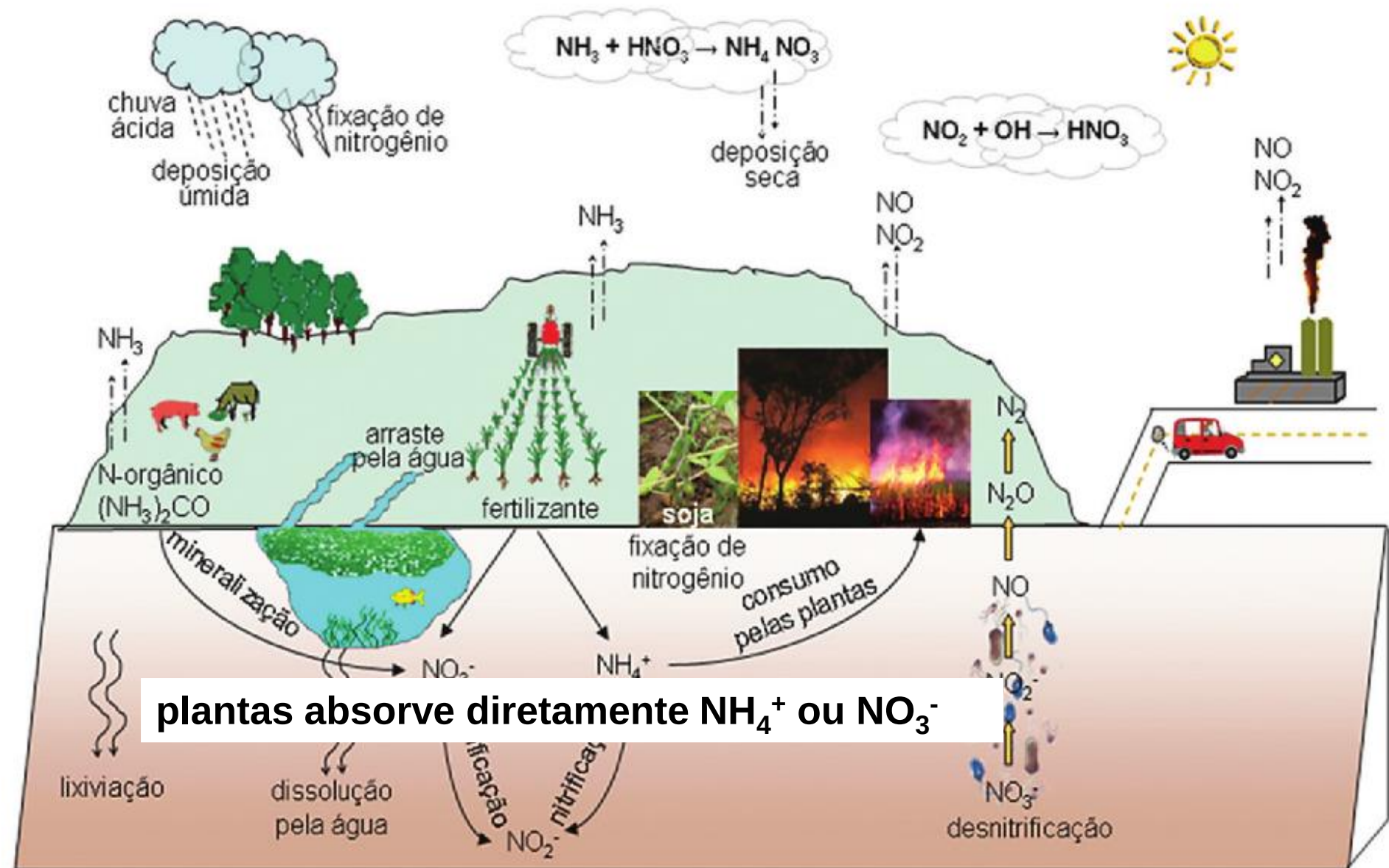


Figure: Maps of global nitrogen input, output, soil nitrogen balance, and surface nitrogen balance

Source: [GEO-BENE](#) partners: [Eawag](#) (leader), [IIASA](#), IFPRI, [SSCRI](#)

NITROGÊNIO DO SOLO





plantas absorve diretamente NH_4^+ ou NO_3^-

Dinâmica do N no solo

- Mineralização
- Imobilização (decomposição resíduos)
- Nitrificação
- Fixação biológica

Perdas:

- Volatilização
- Lixiviação
- Denitrificação

N no solo

- Formas orgânicas
 - Proveniente de raios e chuvas
 - Ou fixação biológica (bactérias, fungos)
 - *Rhizobium* (simbiose)
- Adubação mineral
- Solução do solo - pequena quantidade NH_4^+ e NO_3^-

Fixação

Nitrogênio na atmosfera
(N_2)

Plantas

Assimilação

Bactérias
desnitrifi-
cantes

Bactérias fixa-
doras de N_2 nos
nódulos de raízes
de leguminosas

Decompositores
(fungos e bactérias
aeróbicas e anaeróbicas)

Nitratos
(NO_3^-)

Amonificação

Nitrificação

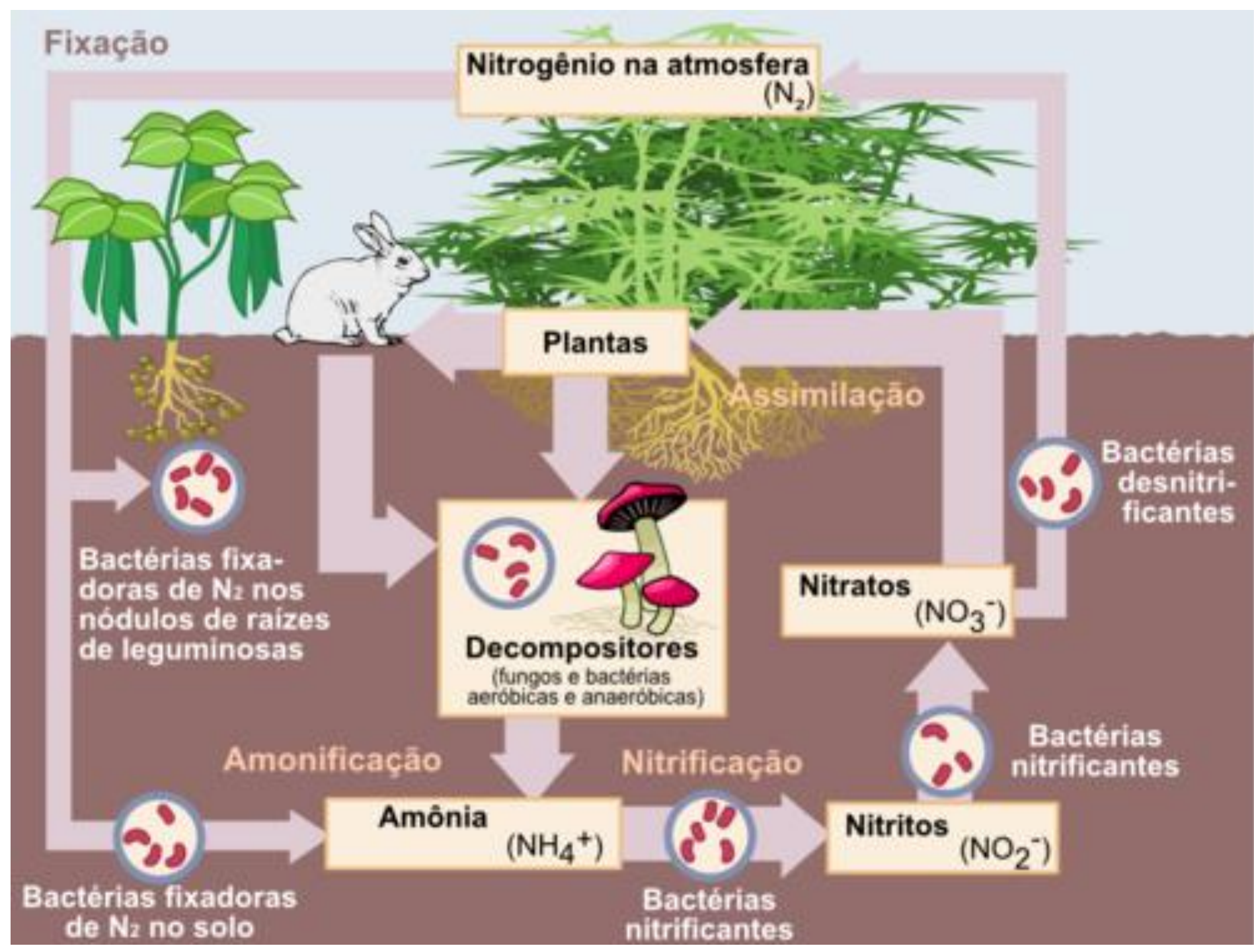
Bactérias
nitrificantes

Amônia
(NH_4^+)

Nitritos
(NO_2^-)

Bactérias fixadoras
de N_2 no solo

Bactérias
nitrificantes

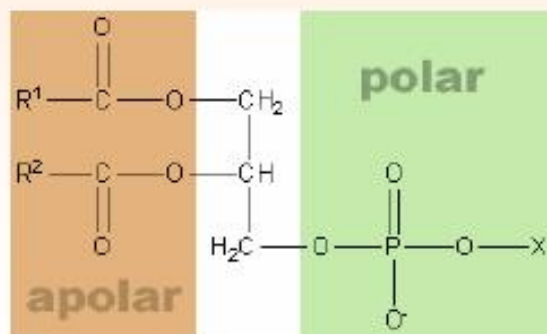
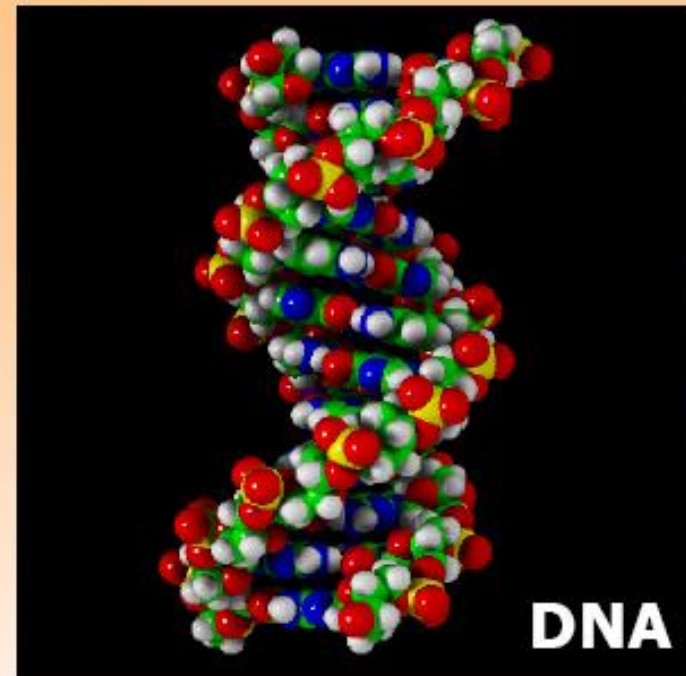
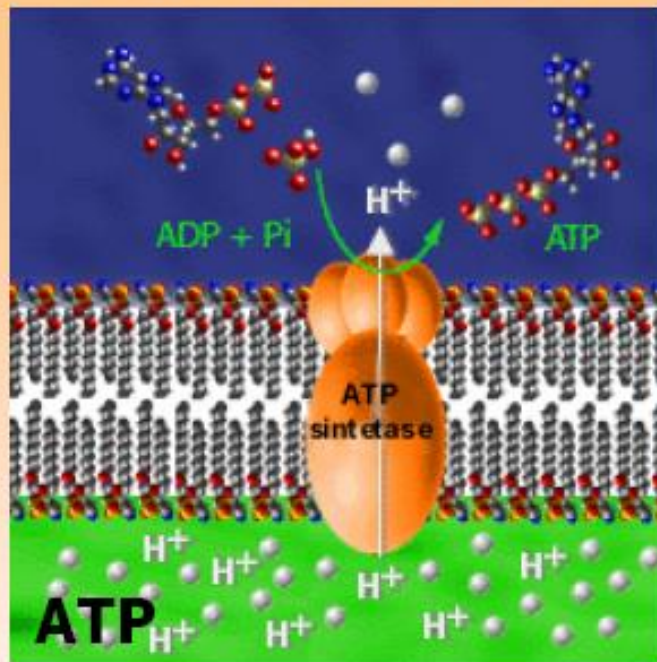


Dinâmica do Fósforo

Absorção pelas plantas

- solução do solo (ideal $0,2 \text{ mg L}^{-1}$)
- dependente da difusão
- sistema radicular - explorar maior área
- incorporado nos compostos orgânicos
 - primórdios radiculares e apicais
 - fonte de energia
- deficiência - folhas velhas, avermelhadas

✓ Algumas formas de P na planta



FOSFOLIPÍDIOS

Os fosfolípidos são os constituintes principais das membranas celulares. Cada membrana é constituída por uma dupla camada fosfolipídica organizada de modo a que as cabeças hidrofílicas fiquem viradas para o lado exterior da membrana e as caudas hidrofóbicas para o interior.

Formas:

- **Orgânicas: formando complexos com a MO**
- **Inorgânicas: disponível em solução**

adsorvido aos argilominerais

pH ácido: Al - P Fe - P

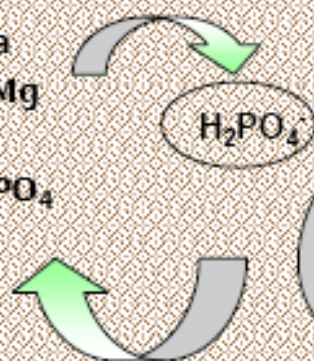
pH alcalino: Ca - P

Conteúdo no solo: 0,01 até 0,5% de P_2O_5

90 - 95% formas não disponíveis

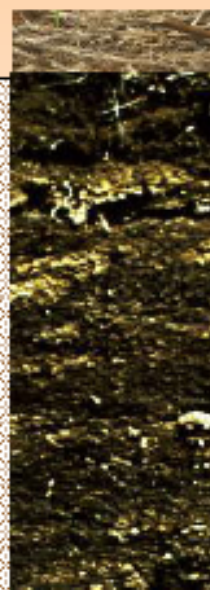


**Fase
sólida
mineral**



**Fase
líquida
(solução)**

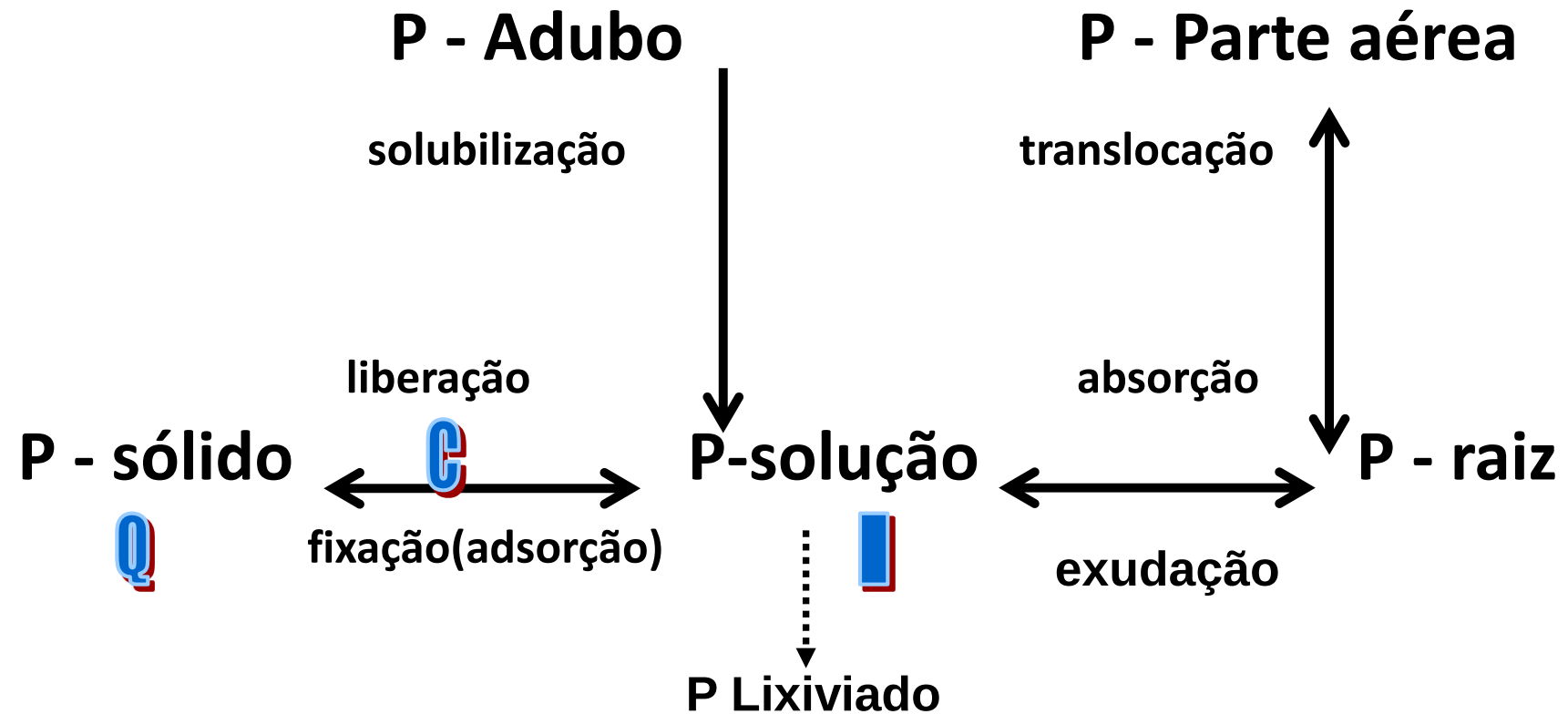
**N, S,
B e P**



**Resíduos
orgânicos**

**Fase
sólida
orgânica**

CICLO NO SOLO



$$PTP \equiv \frac{Q}{I}$$

ONDE:

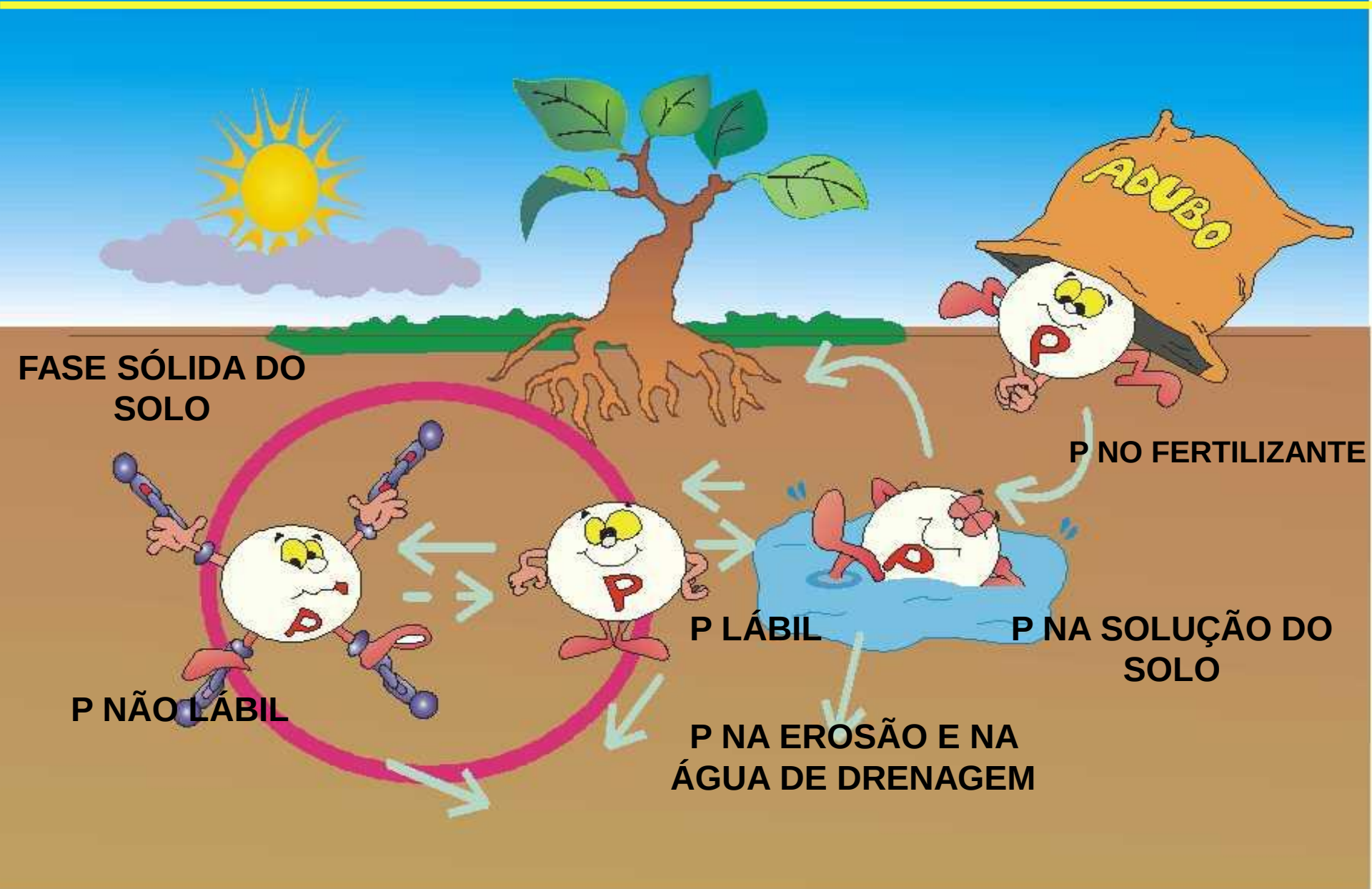
PTP = PODER TAMPÃO EM FÓSFORO

I = INTENSIDADE

C = CAPACIDADE

Q = QUANTIDADE

Caminhos do P-fertilizante



DINÂMICA DO POTÁSSIO

- Exigido em grande quantidade pelas plantas
 - teor adequado entre 2 e 5%
- Faz parte da estrutura dos minerais
 - feldspatos e micas (primários)
 - illita e vermiculita (2:1)
- É facilmente lixiviado no perfil

- Difusão é o processo mais importante de transporte (80%)

- É absorvido com íon K^+

Formas:

- **trocável** - ligado às cargas de superfície

- compostos da MO

- **não trocável**

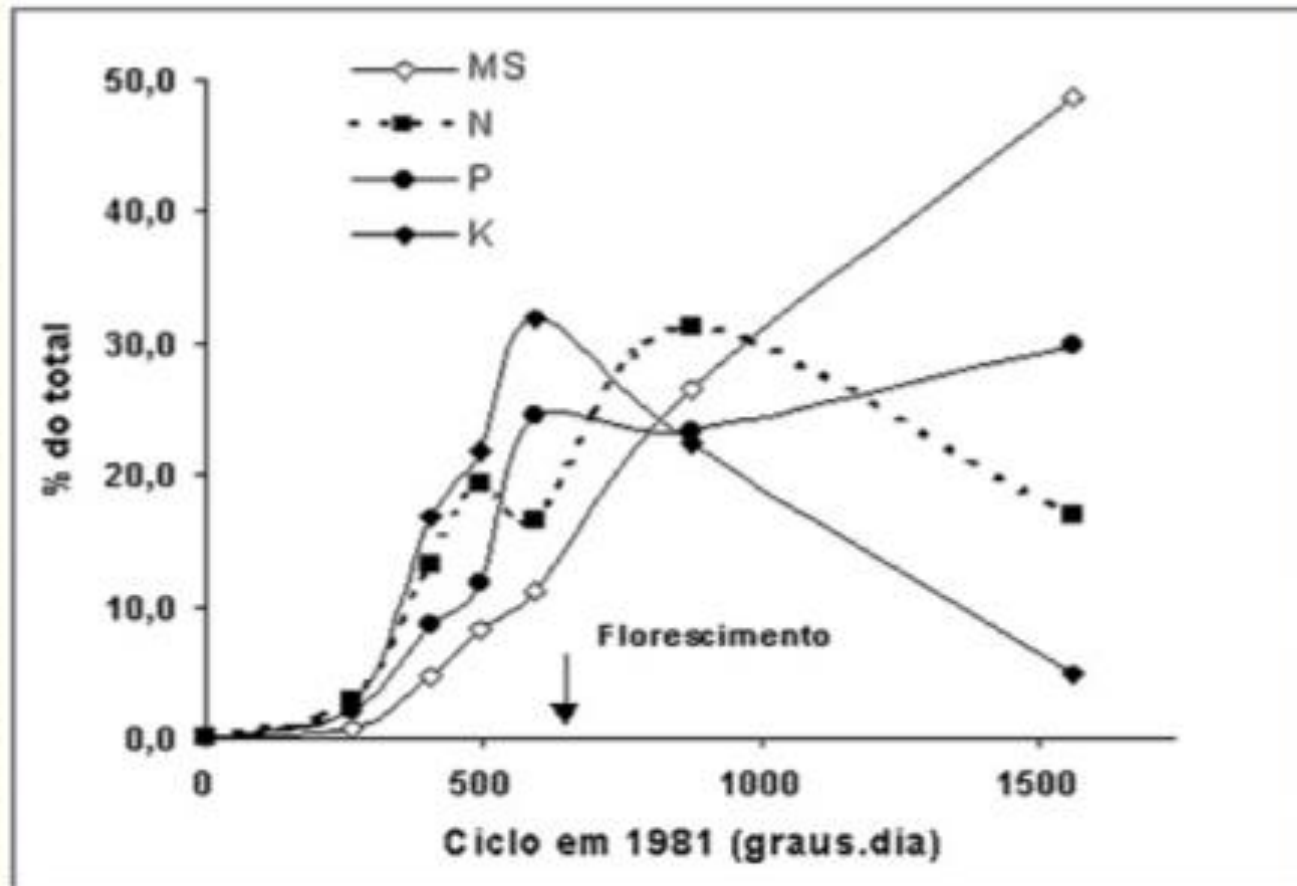
- internamente nos argilominerais
ou entre camadas

Potássio na planta

- Na planta, permanece na forma iônica
 - ativador enzimático
 - síntese protéica
 - resistência ao acamamento
 - turgescência - abertura estômatos
- Deficiência:
 - fome oculta
 - menor resistência a seca
 - folhas velhas (pontas e margens)

Acumulo de nutrientes pelas culturas

Padrão de extração de nutrientes variam c/ as culturas

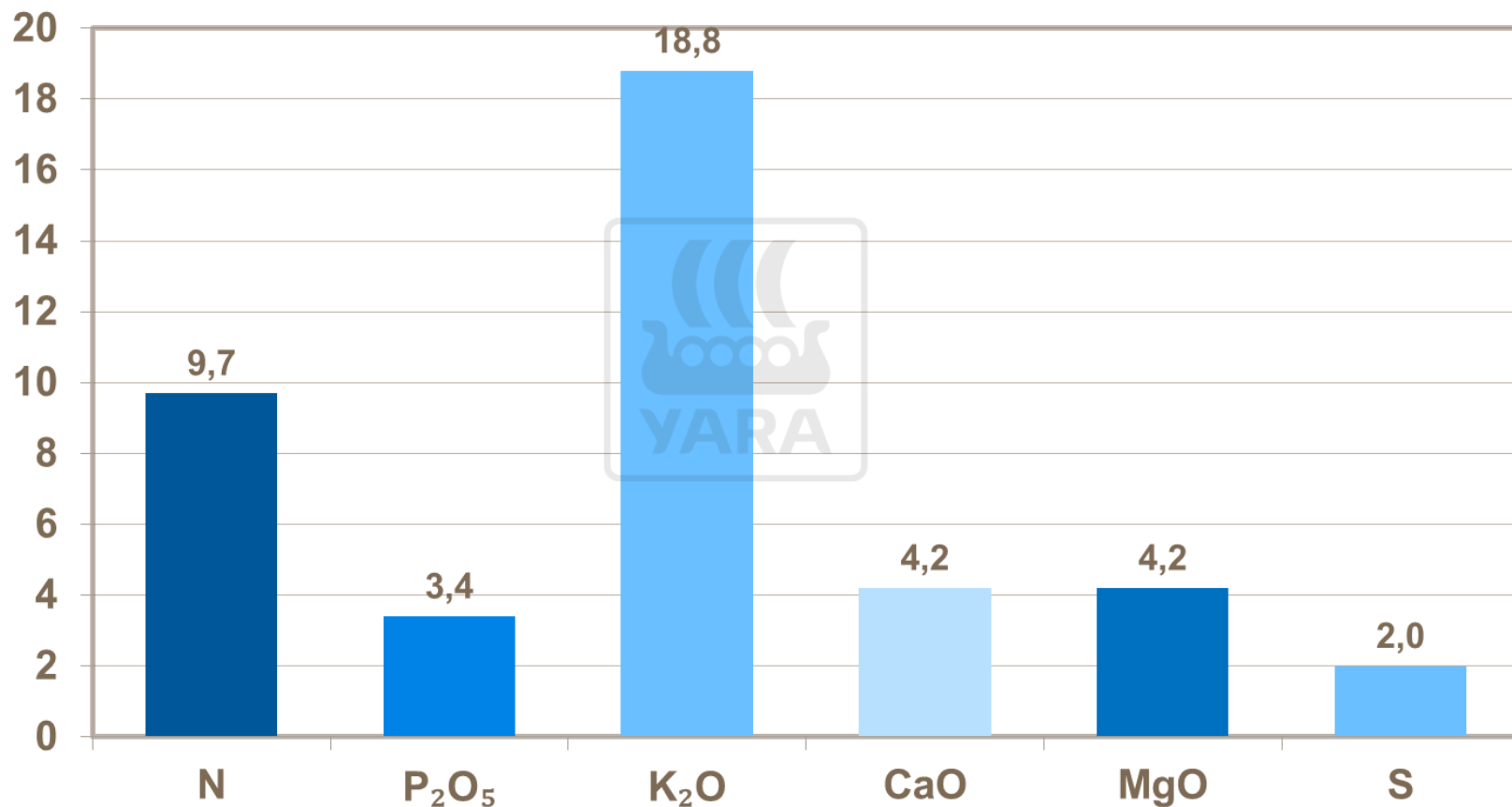


Marcha de absorção de N, P e K pelo milho.

Remoção de Macronutrientes

Palha de Milho – Média de Fontes

kg/t de palha



Fonte: McKenzie R. H. 2001; YARA and KTBL. 2005; Dale, 2007; Deanna L. O. and Jihoon K., 2008; Mitchell C. C. 2011

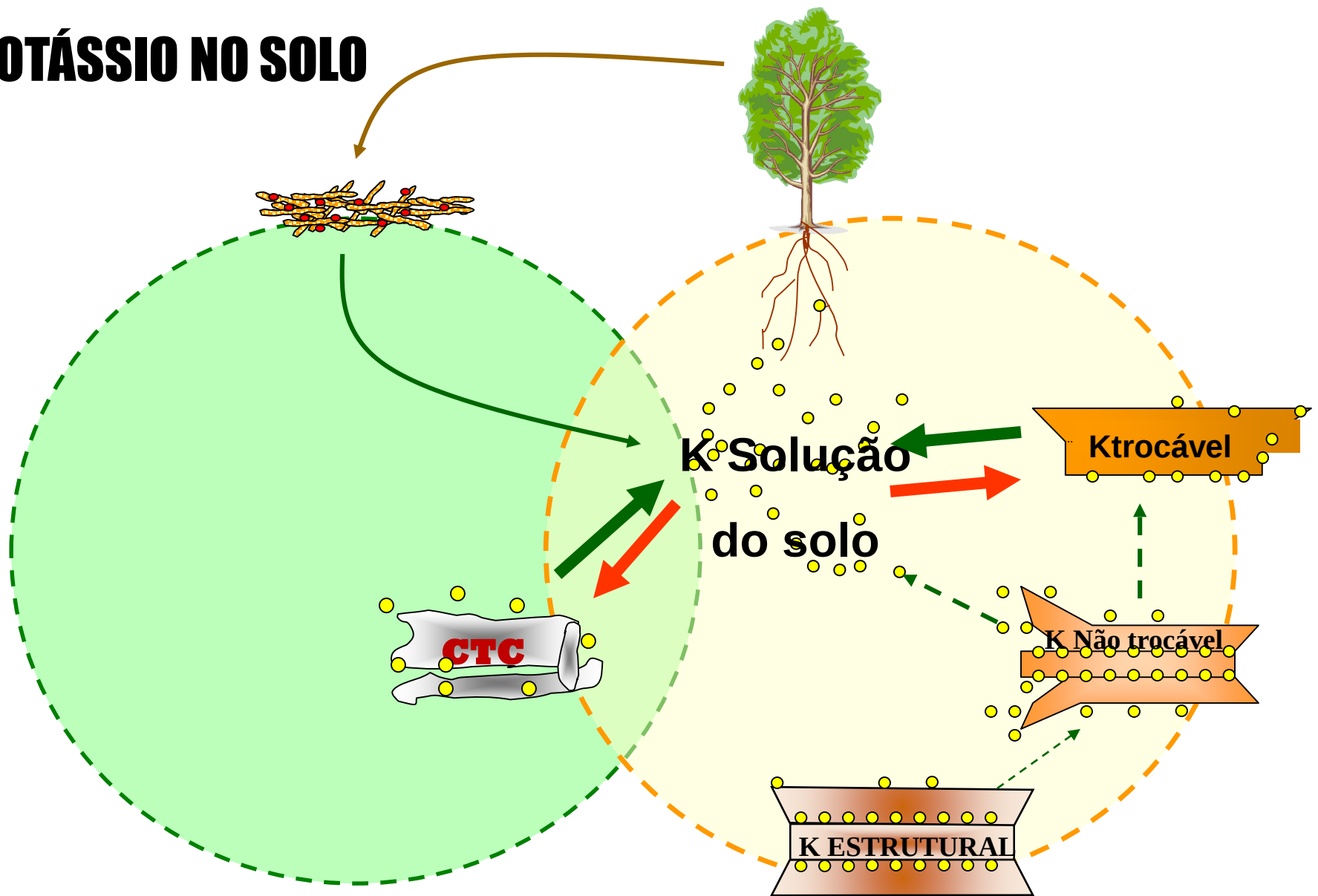
Potássio na solução

- De onde a planta absorve o K^+
- Concentração pode variar de 1 até 50 mg L⁻¹
- Representa parte do K trocável

Poder tampão de potássio

K trocável/ K solução

POTÁSSIO NO SOLO



PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES

PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES



PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES



PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES



PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES



PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES



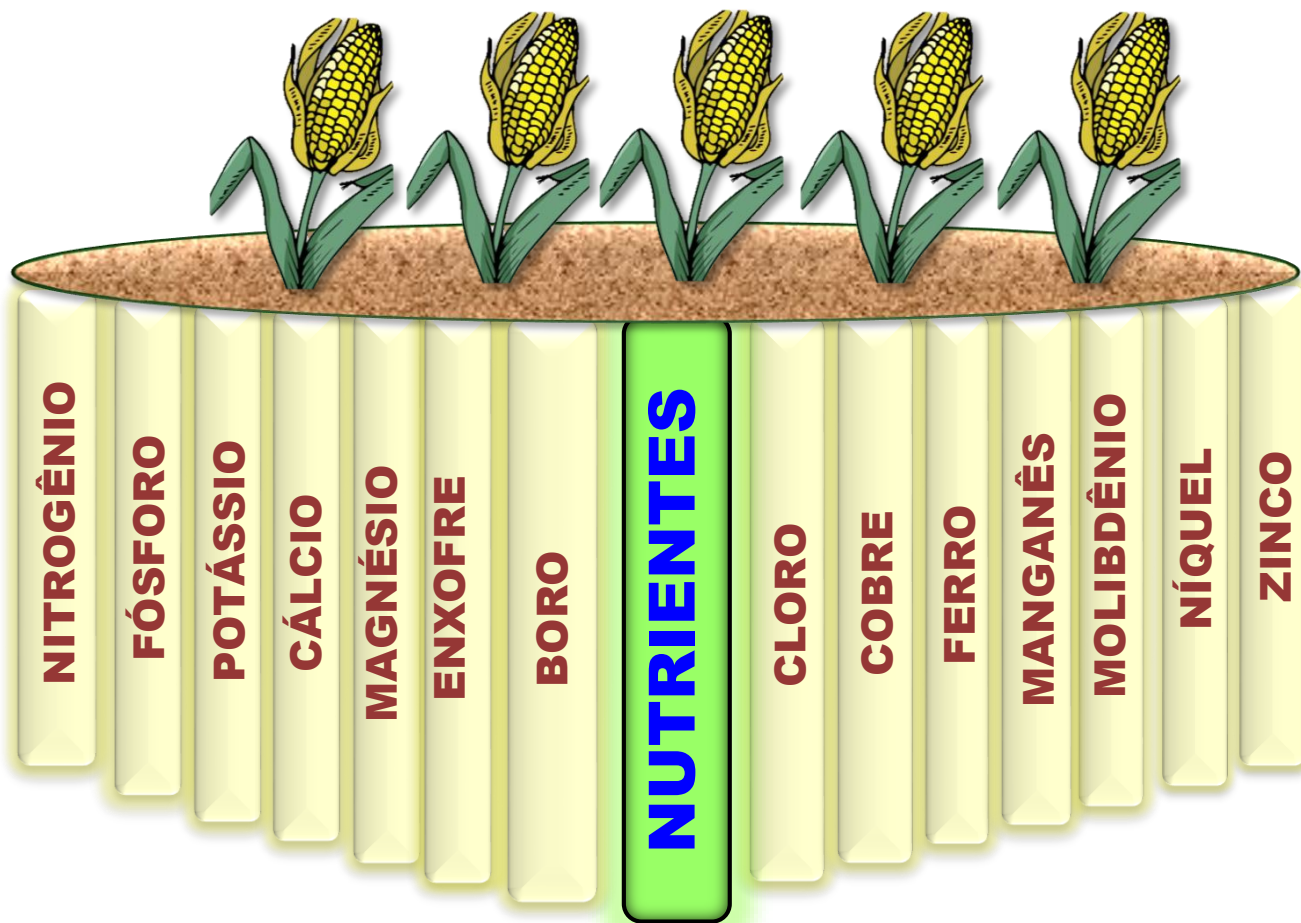
PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES



PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES



PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES



**Produção de Tubérculos de Batatinha (kg/ha),
Ensaio de Aplicação de Micronutrientes,
Pindamonhangaba, SP (Gangantini et al.,1970).**

TRATAMENTO	kg/ha
TESTEMUNHA	9.150
NPK	12.968
NPK + Mo	15.458
NPK + B	
NPK + B + Mo	
NPK = 60 – 180 - 30 kg/ha	
B = 20 kg/ha	
Mo = 0,5 kg DE Mo DE SÓDIO	

**Produção de Tubérculos de Batatinha (kg/ha),
Ensaio de Aplicação de Micronutrientes,
Pindamonhangaba, SP (Gangantini et al., 1970).**

TRATAMENTO	kg/ha
TESTEMUNHA	9.150
NPK	12.968
NPK + Mo	15.458
NPK + B	20.019
NPK + B + Mo	20.161
NPK = 60 – 180 - 30 kg/ha	
B = 20 kg/ha	
Mo = 0,5 kg DE Mo DE SÓDIO	

Relação entre Teores de B e Triptofano em Tremoço.

B (ppm) SOLUÇÃO	TRIPTOFANO (ppm)
0,00	1,27
0,22	1,36
0,44	2,17
1,08	2,55

Produção de Grãos de Arroz (IAC 25), Zinco no Solo e na Folha, em Função da Aplicação de Cobalto e Micronutrientes num Latossolo Vermelho-Escuro Argiloso de Planaltina, (Galvão, 1984)

TRATAMENTOS	GRÃOS (kg ha ⁻¹)	SOLO ⁽¹⁾ (mg kg ⁻¹)	FOLHAS (mg kg ⁻¹)
"Completo"	1.170 A	2,1 A	20,7 AB
Omissão de B	1.191 A	2,5 A	18,4 B
Omissão de Co	1.179 A	2,2 A	20,1 AB
Omissão de Cu	1.156 A	2,2 A	20,0 AB
Omissão de Fe	1.210 A	2,1 A	17,8 B
Omissão de Mn	1.196 A	2,3 A	23,0 A
Omissão de Mo	1.188 A	2,4 A	21,0 AB
Omissão de Zn			
Cv(%)	22,7	16,0	12,3

(1) Extrator de Mehlich 1 (HCl 0,05 N + H₂SO₄ 0,025 N)

Produção de Grãos de Arroz (IAC 25), Zinco no Solo e na Folha, em Função da Aplicação de Cobalto e Micronutrientes num Latossolo Vermelho-Escuro Argiloso de Planaltina, (Galvão, 1984)

TRATAMENTOS	GRÃOS (kg ha ⁻¹)	SOLO ⁽¹⁾ (mg kg ⁻¹)	FOLHAS (mg kg ⁻¹)
"Completo"	1.170 A	2,1 A	20,7 AB
Omissão de B	1.191 A	2,5 A	18,4 B
Omissão de Co	1.179 A	2,2 A	20,1 AB
Omissão de Cu	1.156 A	2,2 A	20,0 AB
Omissão de Fe	1.210 A	2,1 A	17,8 B
Omissão de Mn	1.196 A	2,3 A	23,0 A
Omissão de Mo	1.188 A	2,4 A	21,0 AB
Omissão de Zn	118 B	0,4 B	7,6 C
Cv(%)	22,7	16,0	12,3

(1) Extrator de Mehlich 1 (HCl 0,05 N + H₂SO₄ 0,025 N)











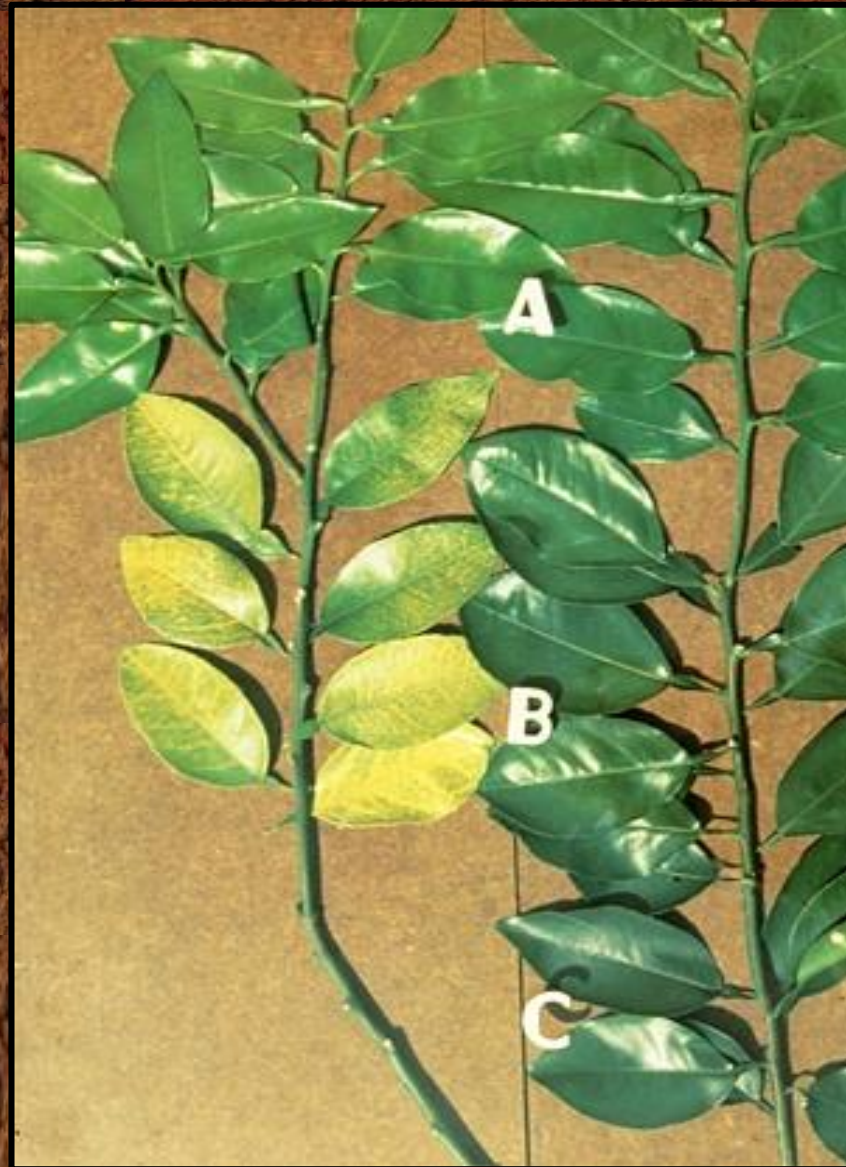












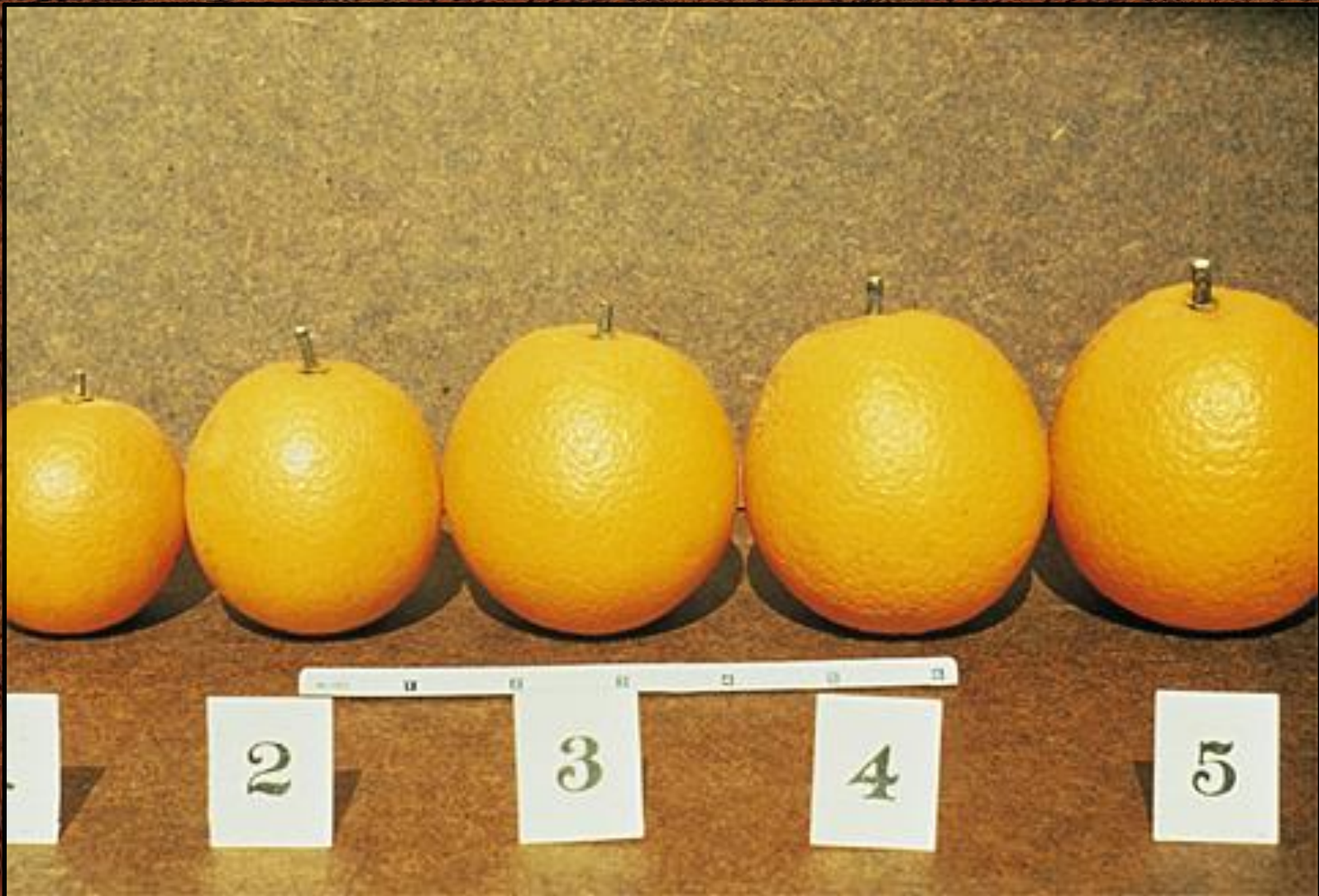
Nitrogênio em Citros



Fósforo em Citros



Potássio



Potássio em Citros



Potássio em Citros





Cálcio em Maçã



Cálcio em Mangueira



Cálcio em Mangueira



Cálcio





Magnésio em Palmáceas



Magnésio em Palmáceas



Magnésio em Citros







Boro



Boro



Boro



Boro



Boro



Boro



Ferro em Citros



Manganês em Citros



Fe



Mn



A semente da vida está em nosso



IAC - 128 anos de ciência e tecnologia que preservam
os recursos hídricos e beneficiam as lavouras

2015 Ano Internacional dos Solos



PRODUTIVIDADE SUSTENTÁVEL DE CULTURAS E OTIMIZAÇÃO DO USO EFICIENTE DE NUTRIENTES

