

IX Simpósio Regional • IPNI Brasil

## BOAS PRÁTICAS PARA USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES

Paragominas - PA • 30 e 31 DE AGOSTO/2016

# Dinâmica de nutrientes no sistema solo-planta visando BPUFs

*Valter Casarin  
IPNI - Brasil*



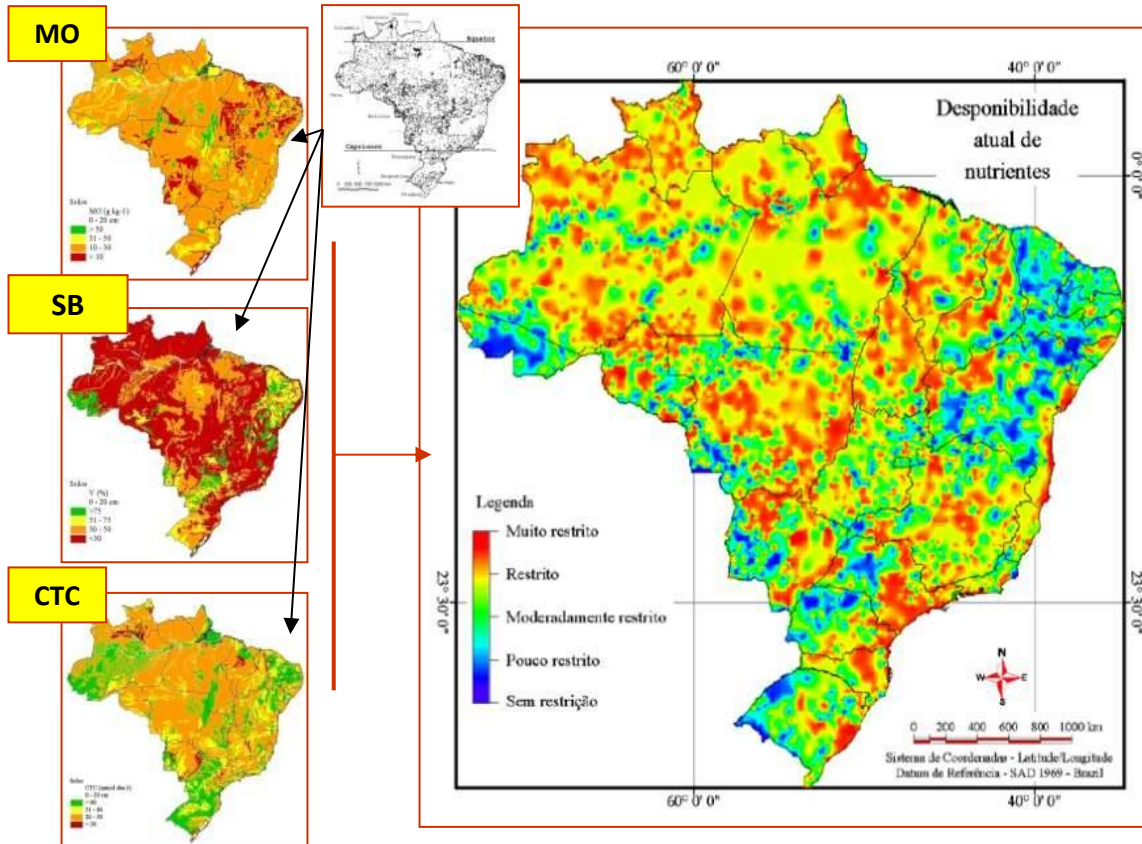
**IPNI**

INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

# INTRODUÇÃO



# Restrição dos solos brasileiros em relação à fertilidade



Lopes & Fox (1977):

- 518 amostras de terra
- Disponibilidade de P: 0,1 e 16,5 ppm P
- **92% das amostras com P < 2 ppm**

Fonte: Sparovek et al.

*"A disponibilidade de P muito baixa é possivelmente a maior limitação para o cultivo de plantas e sua correção pode ser bastante dificultada devido à elevada capacidade de fixação de P destes solos"*

Lopes & Fox (1977)

# CARACTERÍSTICAS SOLOS TROPICAIS

- ✓ Solos divergem quanto às propriedades físicas, químicas e biológicas.
- ✓ Se faz necessário aferir tais propriedades para que se possa manejar visando eficiência.
- ✓ Os solos do Brasil são geralmente de reação ácida, baixa fertilidade e elevada capacidade de fixação de fósforo.

## Resumindo ainda mais:

- ✓ O manejo correto dos solos visando a adequada nutrição das culturas passa necessariamente pela compreensão dos princípios básicos de dinâmica dos nutrientes no solo.

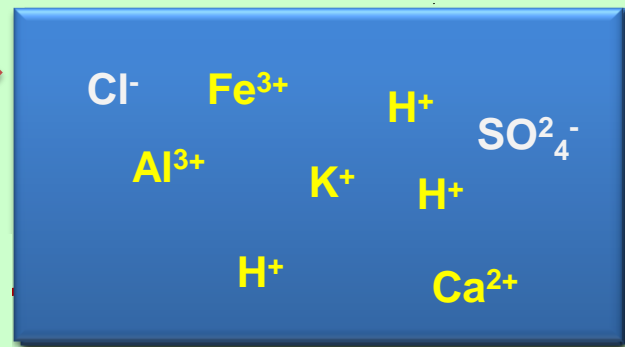
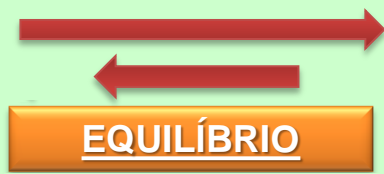
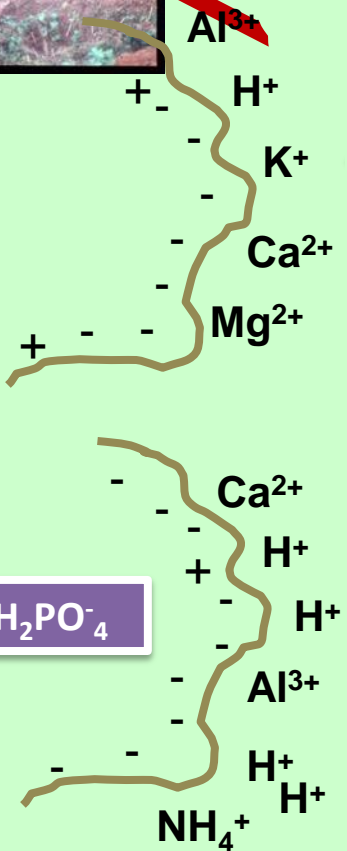
# ASPECTOS BÁSICOS DE QUÍMICA DO SOLO:

Fase Sólida

Fase Solução



Formação de P – Ca, Fe e/ou Al



**CONSEQÜÊNCIAS:**

⇓ [ P ] na solução

Transporte até superfície da raiz por difusão

⇓ Disponibilidade de P às plantas

<b>SOLO</b>	<b>FASE SÓLIDA</b>
De forma simples	ORGÂNICA INORGÂNICA
	<b>POROS</b>
	AR ÁGUA
	<b>ORGANISMOS</b>
	MACRO MICRO

**CARGAS:**  
Constantes  
Variáveis (principalmente pH)

**PCZ ou PESN:**  
pH onde -S = +S  
Efeito de profundidade

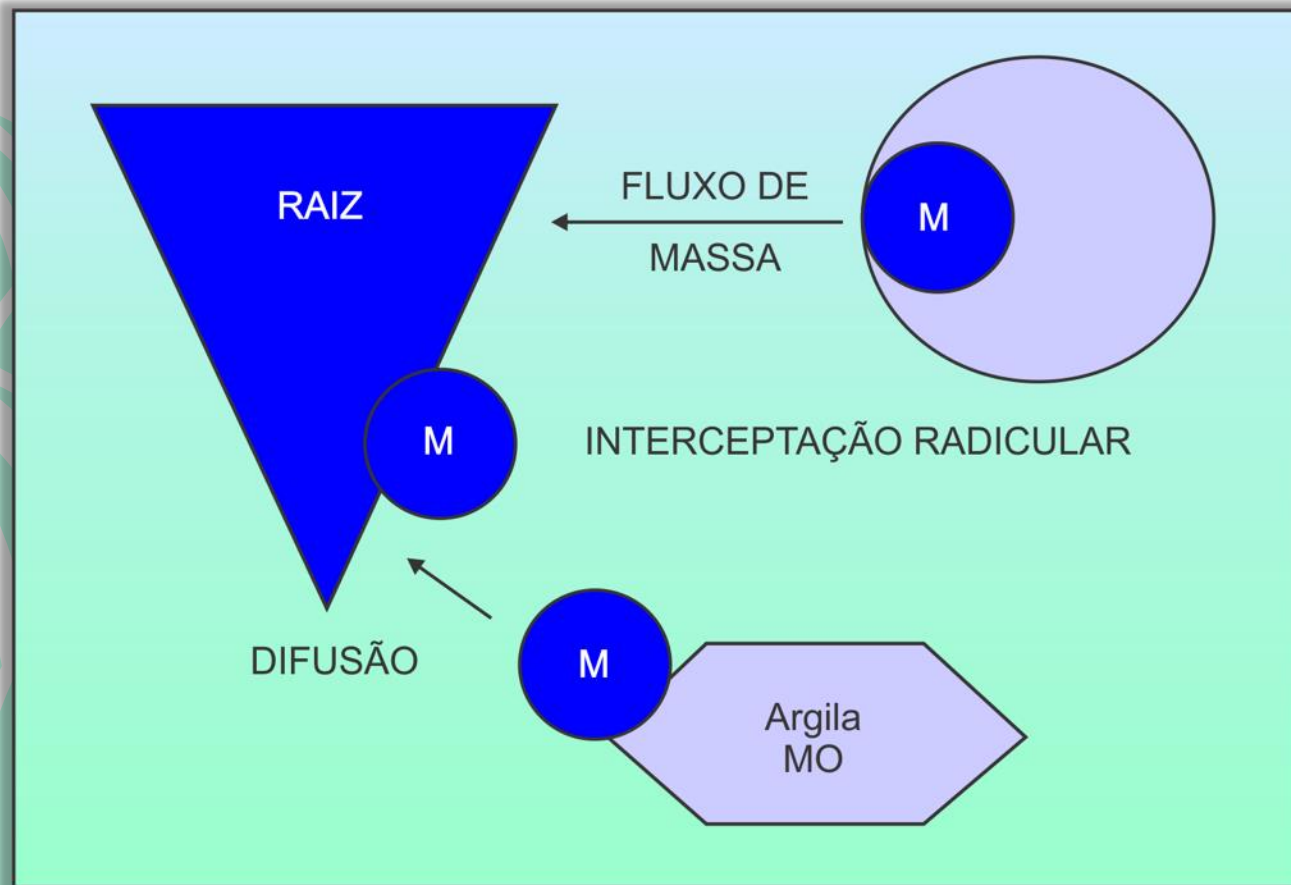
**ADSORÇÃO:**  
Ligação iônica = Pratic/te todos os cátions  
Ligação covalente = H+

**Equação de Kerr**  
( K<sup>+</sup> ) = K<sub>ex</sub> [ K<sup>+</sup> ]  
( Na<sup>+</sup> ) [ Na<sup>+</sup> ]

SB = K + Ca + Mg (+Na)  
CTC pH 7,0 = SB + (H+Al)  
V% =  $\frac{SB \times 100}{CTC \text{ pH } 7,0}$



# Representação esquemática dos mecanismos de contato íon-raiz



## 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 (parte)
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 (parte)
Cobre <sup>1</sup>	15	5	80	Próximo das raízes
Ferro <sup>1</sup>	40	10	50	Próximo das raízes
Manganês <sup>1</sup>	15	5	80	Próximo das raízes
Zinco <sup>1</sup>	20	20	60	Próximo das raízes
Molibdênio <sup>2</sup>	5	95	0	Em cobertura (parte)

(1) Complementação com aplicação foliar.

(2) Aplicação via semente e/ou foliar.



**IPNI**

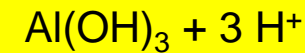
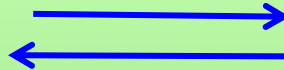
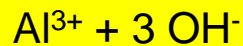
INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

# Cálcio, Magnésio e Acidez do Solo





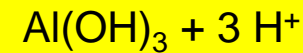
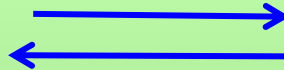
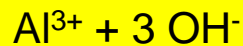
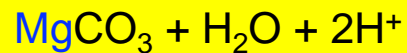
## Reações envolvidas na correção da acidez do solo



- (1) Neutralização da acidez ( $\text{H}^+$ )
- (2) Imobilização do  $\text{Al}^{3+}$
- (3) Necessitamos de uma base forte



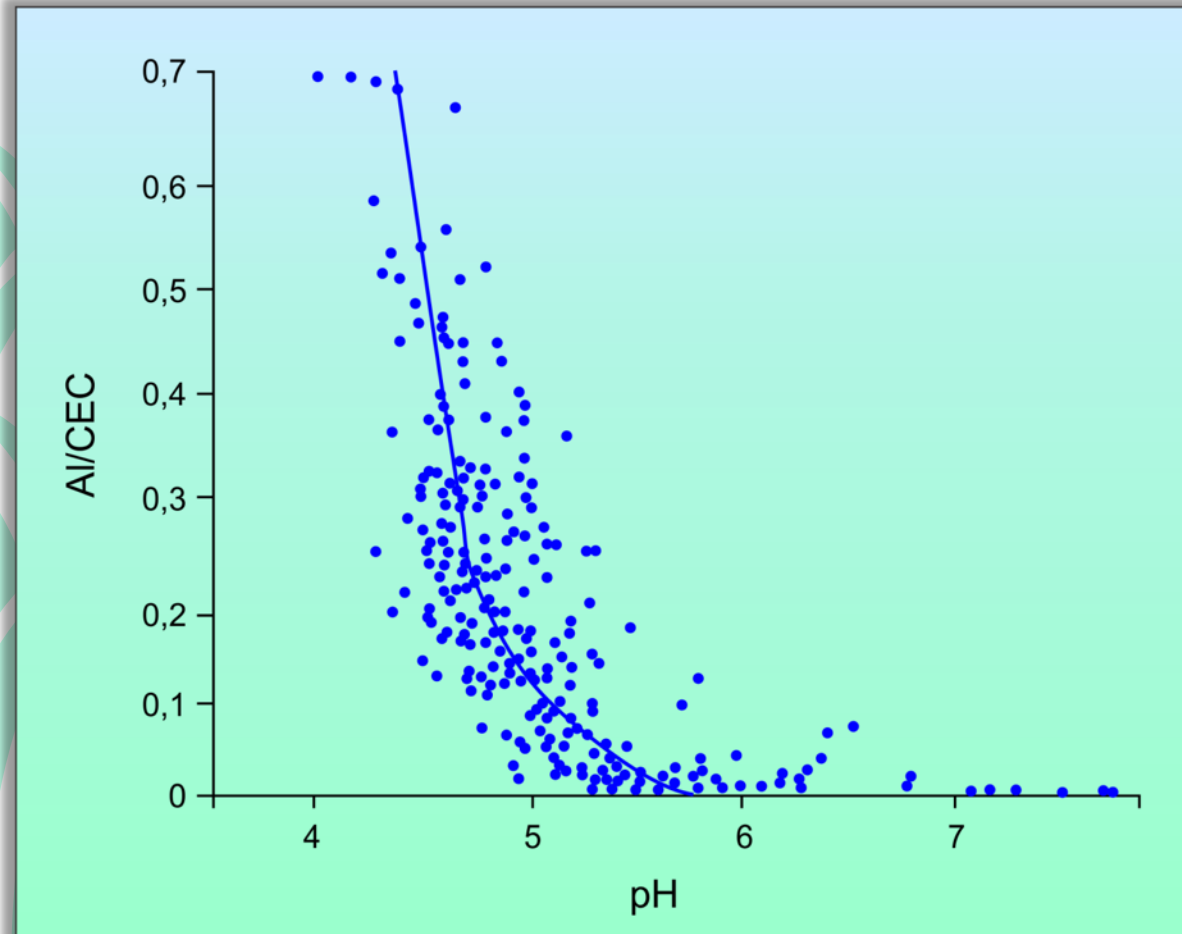
## Reações envolvidas na correção da acidez do solo

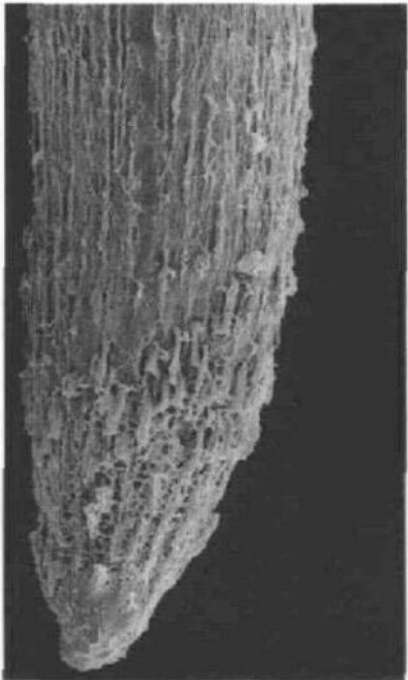


- (1) Neutralização da acidez ( $\text{H}^+$ )
- (2) Imobilização do  $\text{Al}^{3+}$
- (3) Necessitamos de uma base forte



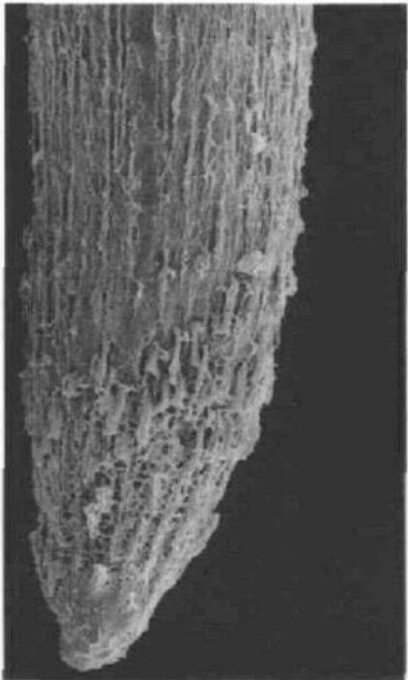
Com o aumento do pH do solo, a saturação por  $\text{Al}^{3+}$  diminui. Na maioria dos solos, pouco ou nenhum efeito de toxicidade de  $\text{Al}^{3+}$  no crescimento das plantas é observado acima de pH 5,0-5,5





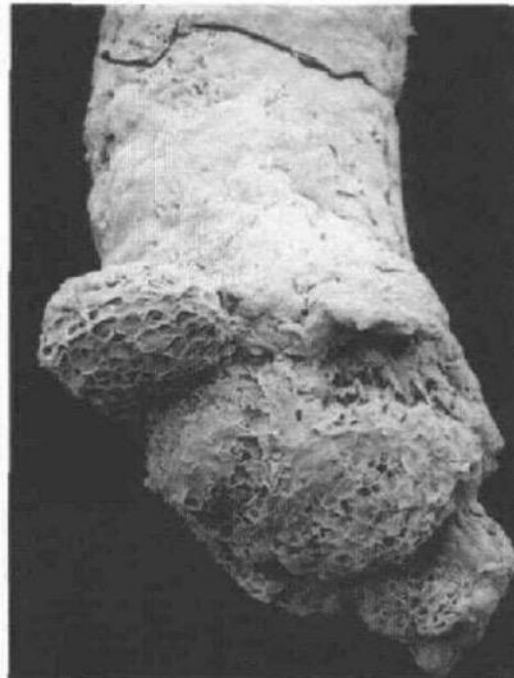
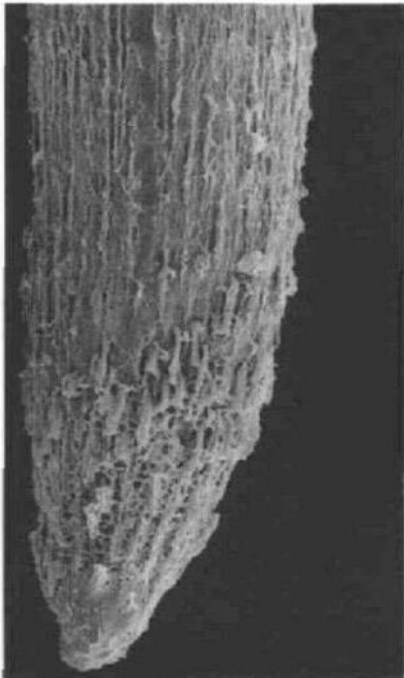


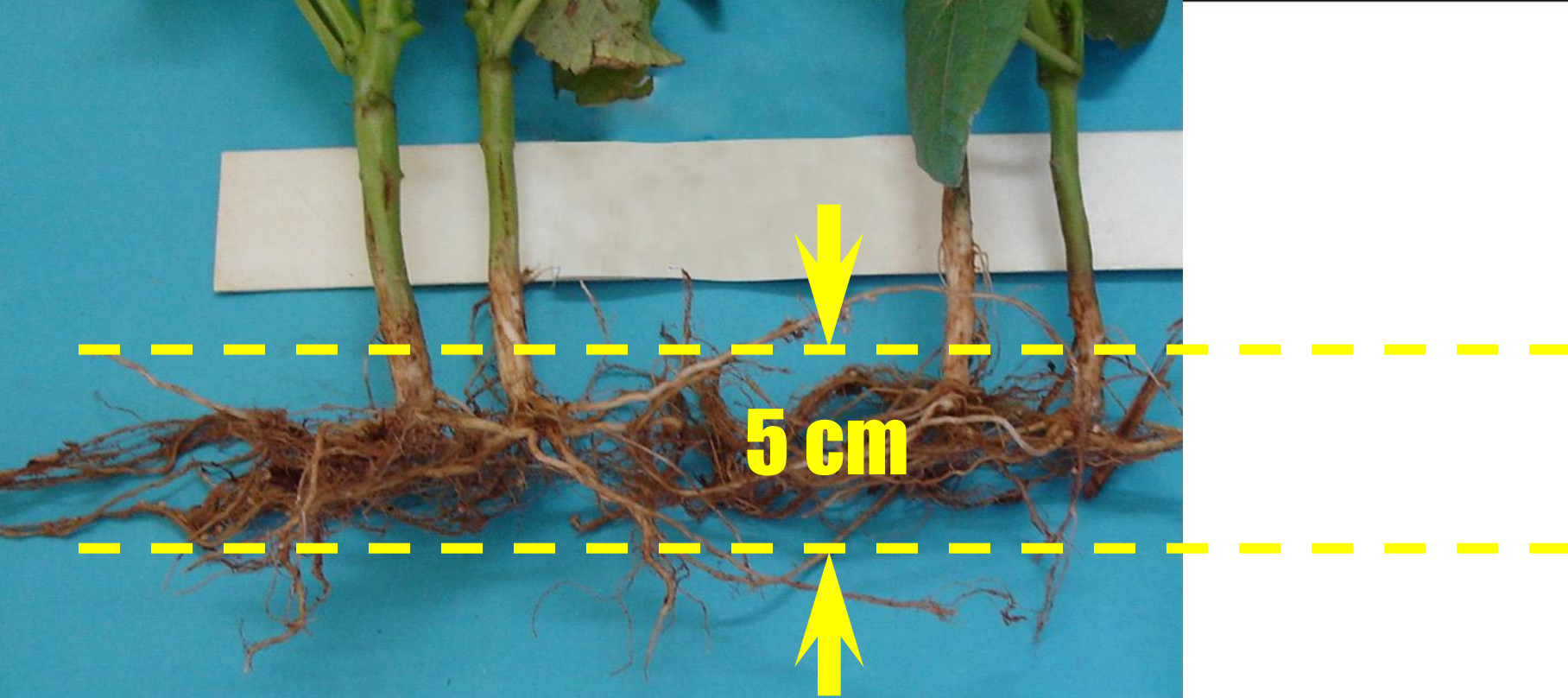
**+ Al<sup>+3</sup> =**





**+ Al<sup>+3</sup> =**

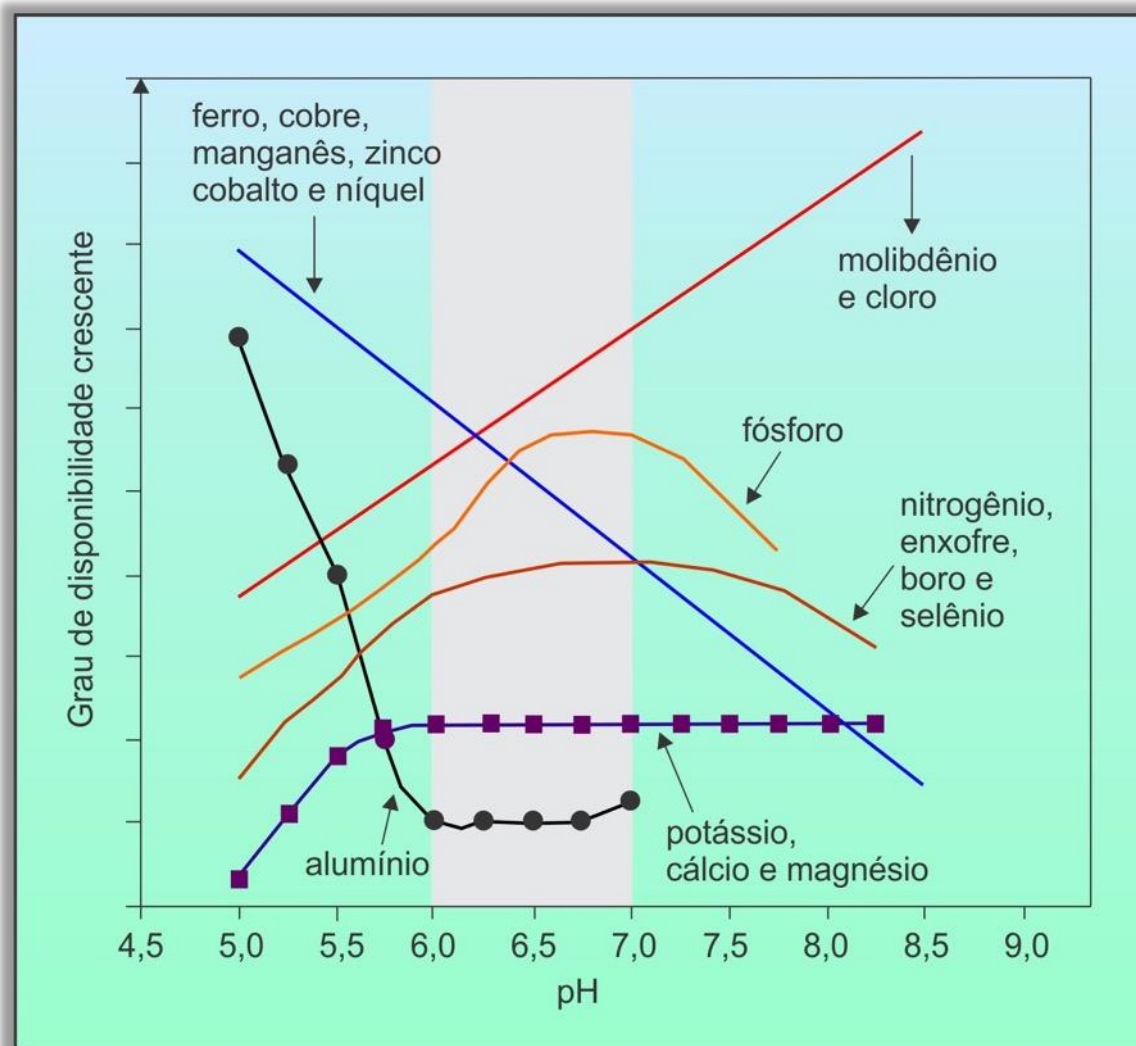




**Possível consequência da calagem  
(e da adubação) superficial ??**

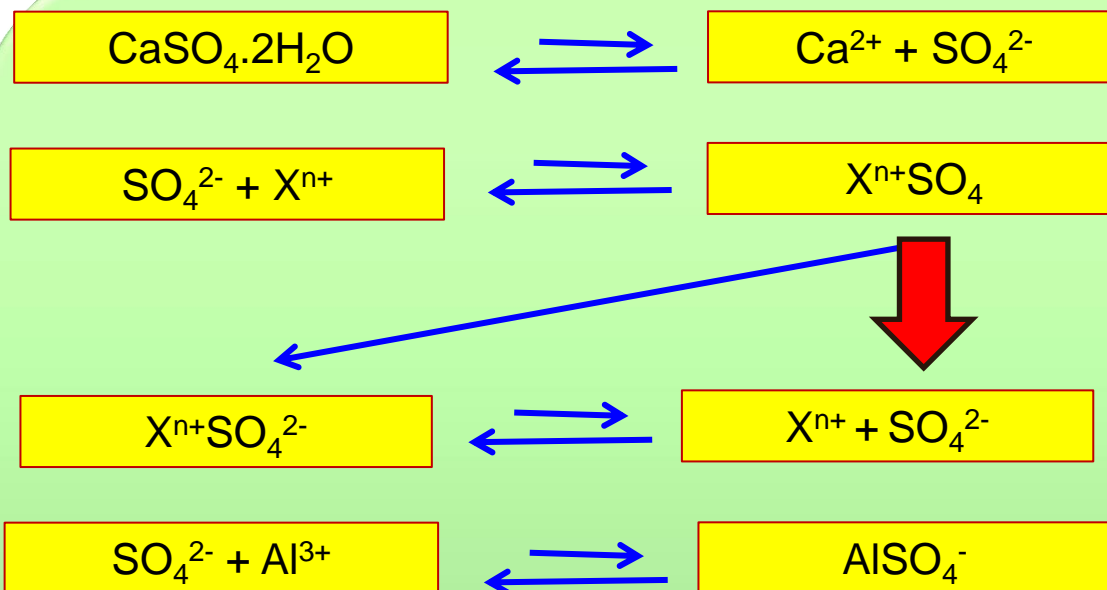
**As plantas vão tender a restringir suas  
raízes nos primeiros centímetros de solo.**

# PH X DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES





## Reações envolvidas na gessagem do solo

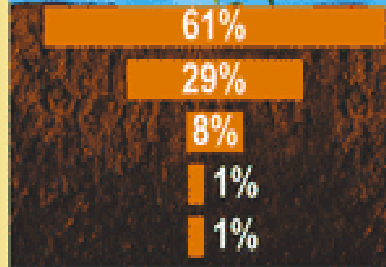


- (1) Aumento de Ca em superfície
- (2) Lixiviação de  $\text{SO}_4^{2-}$  e cátions acompanhantes
- (3) Diminuição da atividade do  $\text{Al}^{3+}$
- (4) Cuidados são necessários
- (5) Gesso é mais solúvel que calcário
- (6) Gesso tem base fraca que leva a formação de ácido forte, não sendo portanto corretivo da acidez



**Desenvolvimento das raízes do algodoeiro em profundidade, em ausência e em presença de gesso (cada quadrícula mede 15 cm x 15 cm), por ocasião da floração plena, em 22 de março de 2006**

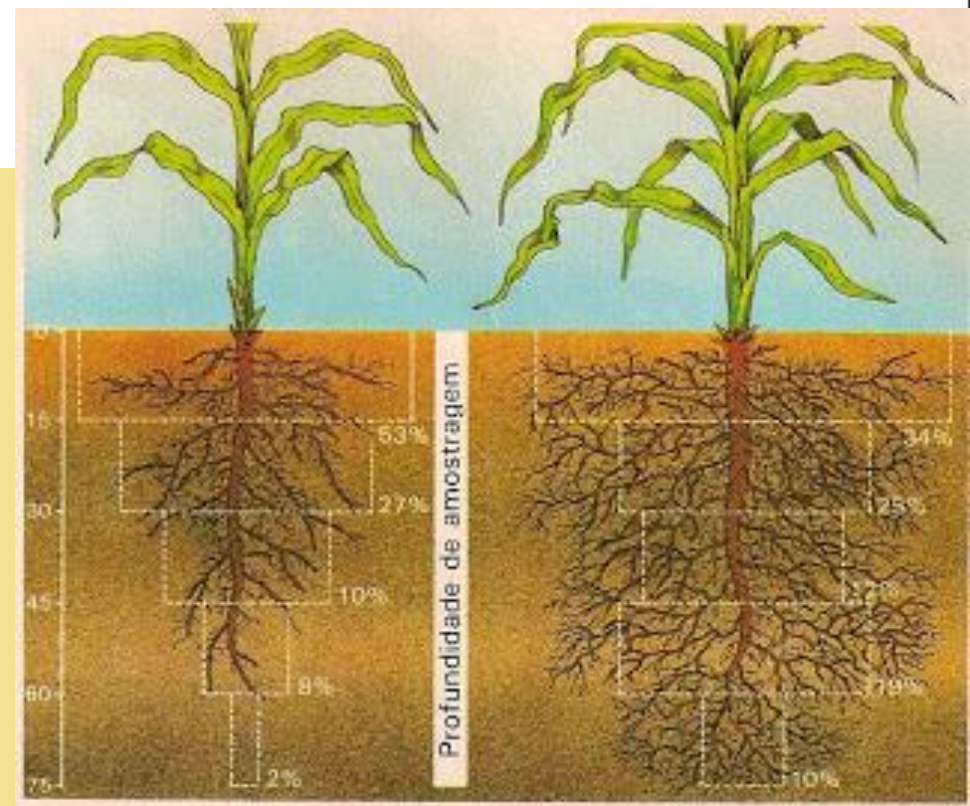
**SEM GESSO**



**Profundidade (cm)**

0 - 15  
15 - 30  
30 - 45  
45 - 60  
60 - 75

**COM GESSO**



# Algumas características relacionadas ao Ca e Mg

## Saturação do complexo coloidal

Quanto > a saturação > o fornecimento às plantas

## Natureza de outros íons adsorvidos

Série Liotrópica:  $\text{Al} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}$

## Textura e pH do solo

Quanto mais ácido e arenoso menor a disponibilidade

## Desbalanço entre os cátions

Excesso de Ca prejudica a absorção de Mg e vice-versa

Excesso de K prejudica a absorção de Mg



# Equilíbrio iônico no complexo de troca

Ca	Mg	K
9	3	1
	a	
25	5	1

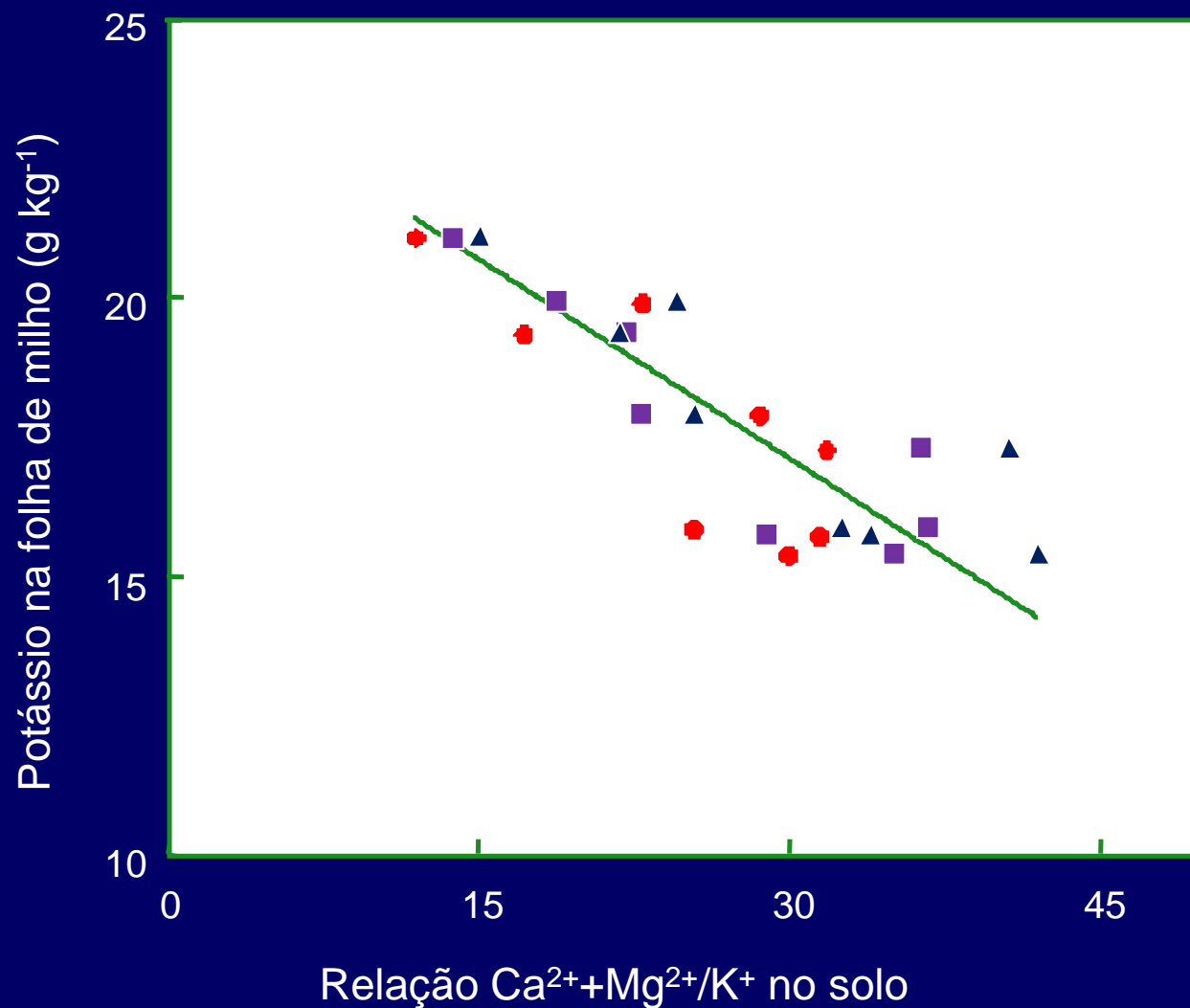
**K%T = 3 a 5**

**Mg%T = 10 a 15**

**Ca%T = 40 a 45**

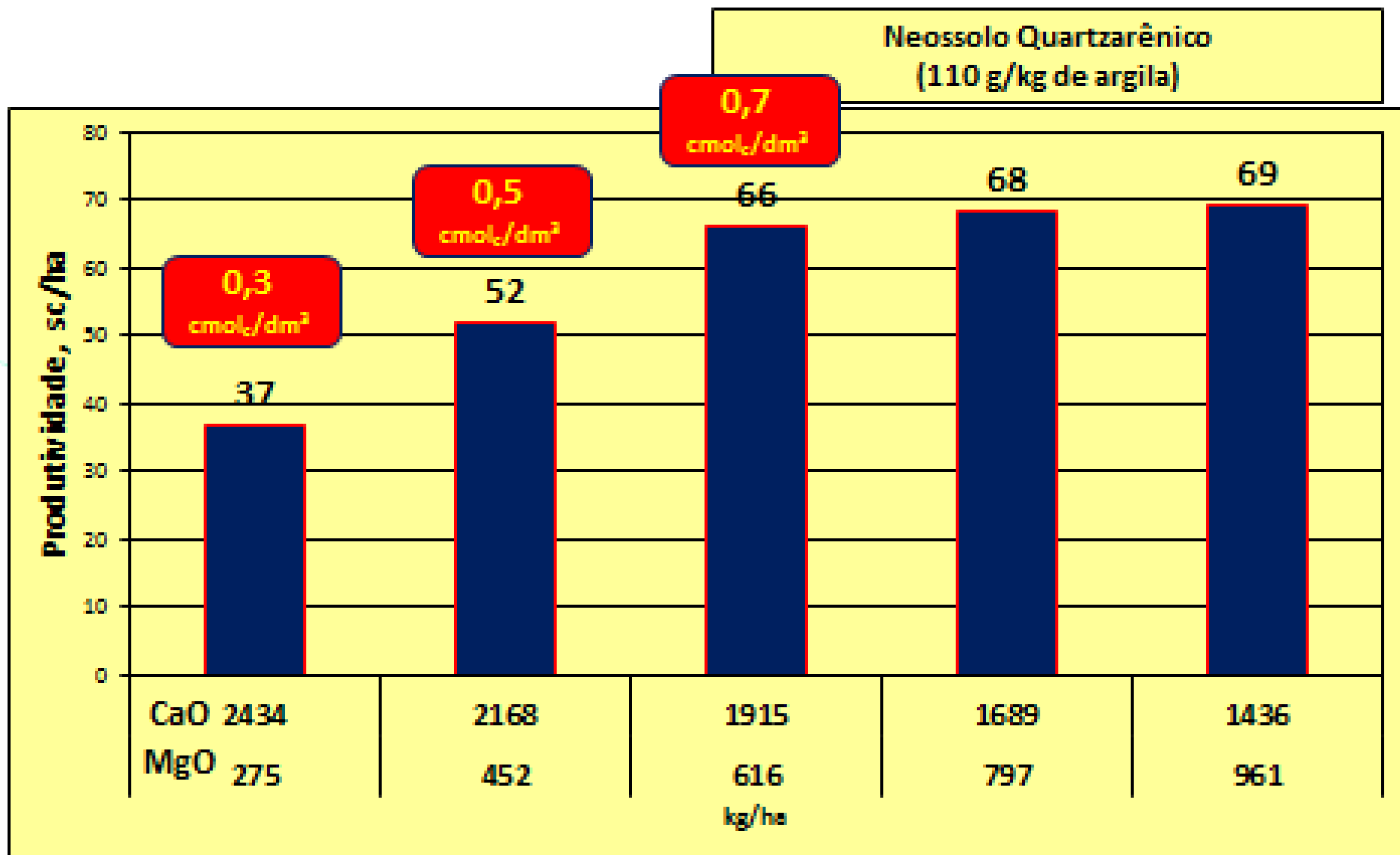


K



Concentração de potássio no tecido foliar de milho em função da relação  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{K}^{+}$  no solo, na profundidade de 0-20 cm (● = 0-5 cm, ▲ = 5-10 cm e ■ = 10-20 cm), em sistema plantio direto. \*:  $P < 0,05$  e \*\*:  $P < 0,01$ .

# Efeito de Mg na produtividade de soja



Fonte: Fundação MT/PMA – Safra 2009/2010



IPNI INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE



**IPNI**

INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

# Nitrogênio no Solo



## Critérios para recomendar N

- Nenhum método que mede N no solo é utilizado em larga escala no mundo
- Teor de matéria orgânica é utilizado em alguns Estados
- Principais parâmetros:
  - Rendimento esperado
  - Histórico/manejo/cultura anterior
  - Análise foliar



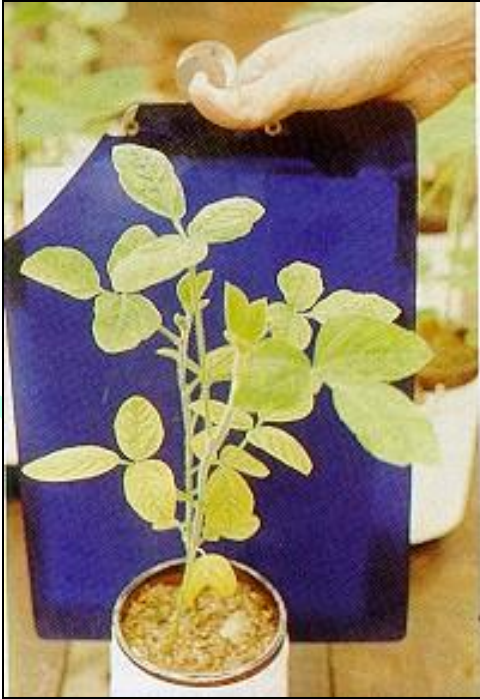
# Entradas de Nitrogênio no Sistema

- 1. Precipitações Atmosféricas: Descargas Elétricas e Poluição**
- 2. Fixação Biológica: Fixação Assimbiótica e Fixação Simbiótica**
- 3. Fertilizantes Orgânicos ou Minerais**



# SOJA – Deficiência visual

## NITROGÊNIO



Perda da cor verde-escuro, passando a verde-pálido com um leve amarelado e, dias mais tarde, todas as folhas tornam-se amarelas. O sintoma aparece primeiro nas folhas inferiores mas espalha-se rapidamente pelas folhas superiores.

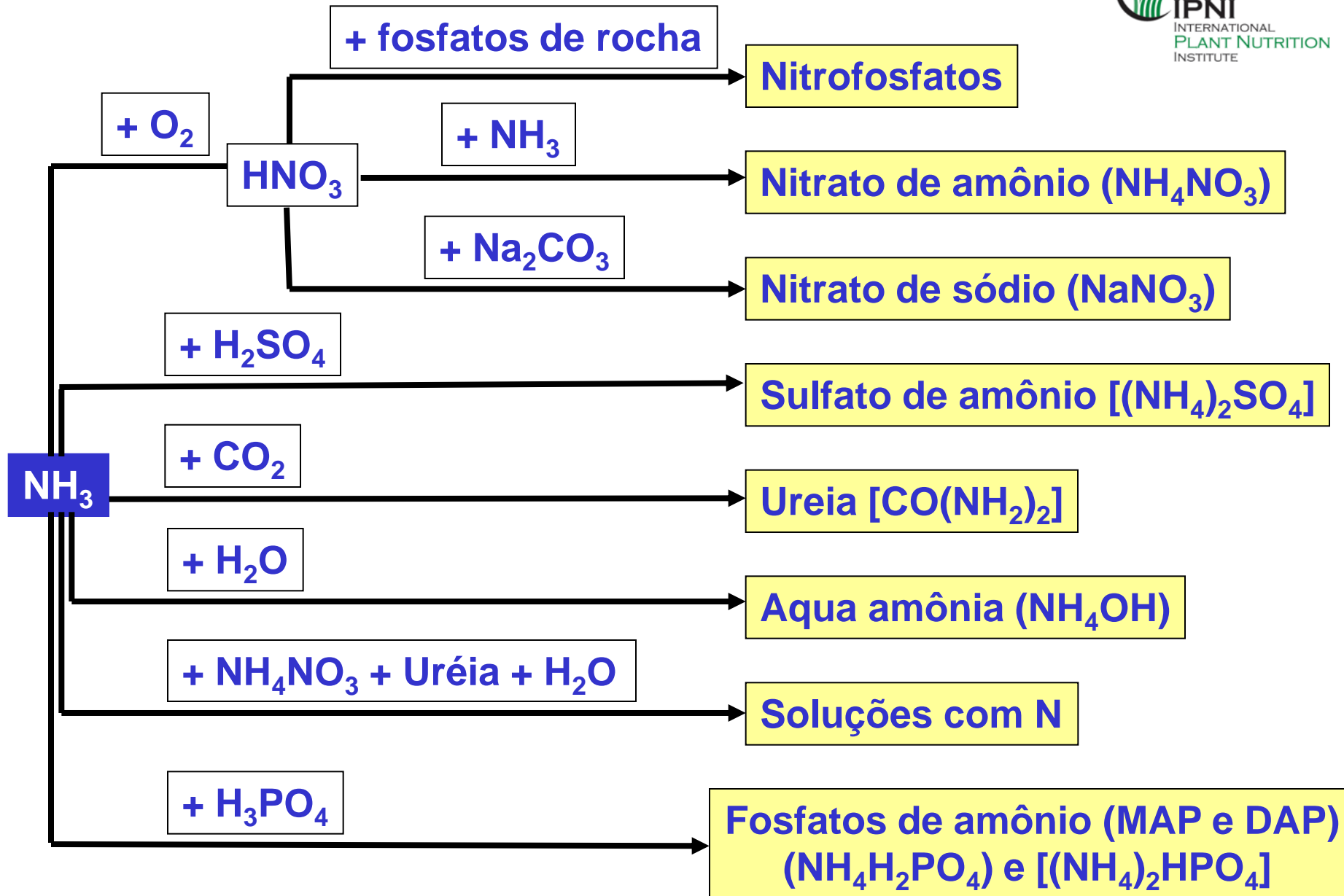


# Condições favoráveis para a máxima fixação de N<sub>2</sub>

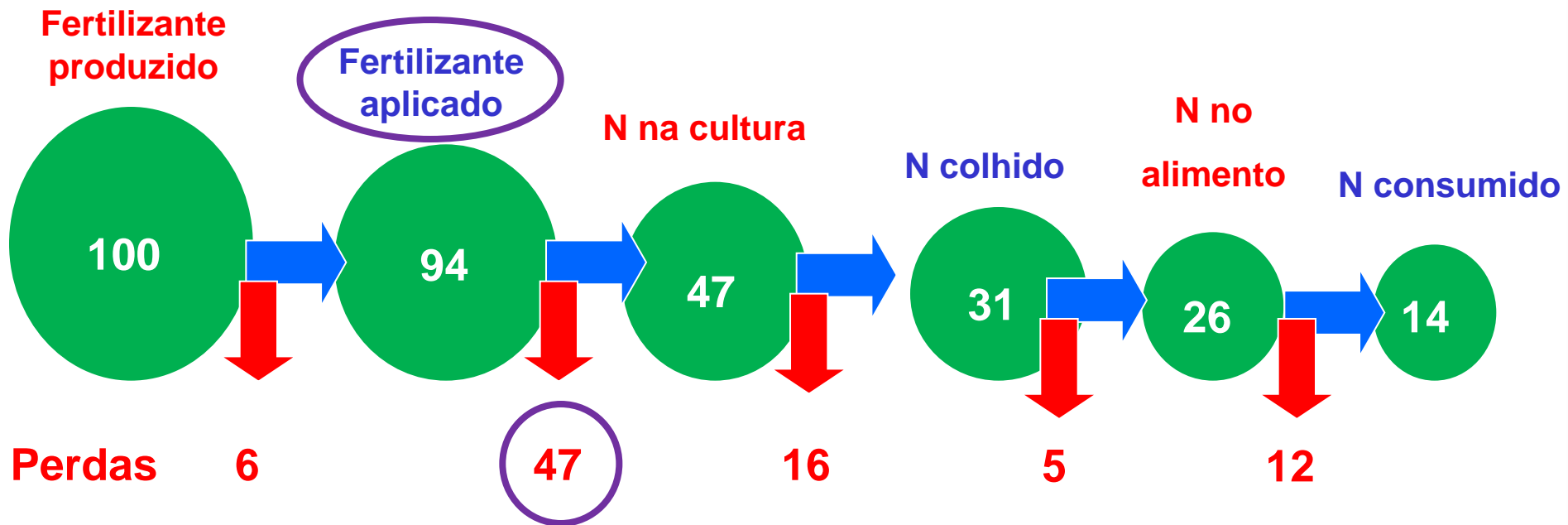
- Inoculação eficiente
- Fornecimento de Mo e Co
- Nutrição balanceada em P e S
- Fornecimento de Ca e Mg
- Sanidade da cultura
- Dose e época de aplicação de N mineral (Feijão)
- Acidez do solo
- Cobertura do solo (T °C)



# Fontes Tradicionais



# Perdas de nitrogênio na aplicação da ureia cadeia de produção vegetal



Fonte: Martinelli, 2007



IPNI INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE

# CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS ADUBOS NITROGENADOS

- **Aumentam a acidez do solo**
- **Índice salino relativamente elevado**
- **Solubilidade alta em água**
- **Isento de macronutriente 2<sup>ários</sup>**  
(Exceção: Sulfato de Amônio: 24% S)



# Como aumentar a eficiência dos ADUBOS NITROGENADOS

## Parcelamento da adubação de N

- A dose recomendada de N é alta ( $> 80 \text{ kg N.ha}^{-1}$ )
- Solos arenosos
- Solos argilosos com baixa CTC
- Áreas sujeitas a chuvas com altas intensidades
- Culturas de ciclo longo (Ex: café)
- Áreas de irrigação (pivô, aspersão, etc)

## Reduzir as perdas por volatilização

- Incorporação do adubo

## Correção dos solos

- $>$  CTC efetiva
- $>$  crescimento radicular

## Espaçamento e potencial de produção

- $>$  espaçamento  $<$  eficiência
- $>$  potencial de produção  $>$  eficiência

## Uso de fertilizante de solubilidade controlada (+ lenta)

- Ureia revestida (S)
- Inibidores da urease
- Inibidores da nitrificação





**IPNI**

INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

# Fósforo no Solo





# Características Gerais do Fósforo

a) O fósforo é um macronutriente primário ou nobre



b) Menos extraído e o mais aplicado nas lavouras

- Baixo teor no solo
- Dinâmica no solo

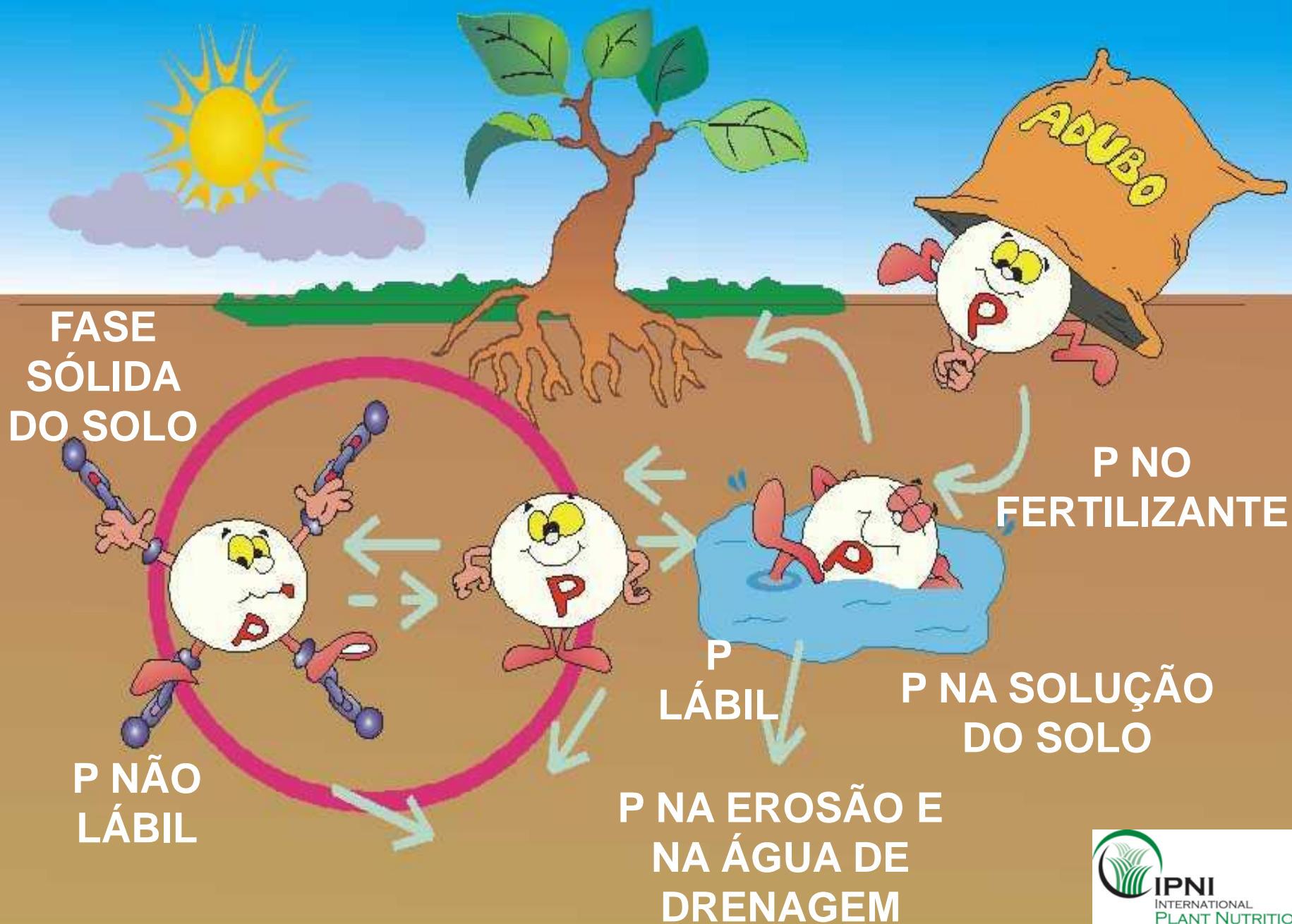
c) Função: Energia (ATP)

Estrutural (RNA e DNA)

d) Nutriente que mais limita a produção



# Adubação Fosfatada



# Fixação de Fósforo

- Elemento é encontrado em grandes quantidades no solo - 100 a 2000ppm;
- Em compensação, a quantidade disponível às plantas é extremamente baixa;

Solo Cerrado  $\xrightarrow{\text{comum}}$  1ppm de P disponível = 3kg/ha de P

- Macronutriente menos exigido pelas plantas ( 20 a 30 kg/ha  $P_2O_5$ ), mas aplicado em maior quantidade nas adubações (60 a 120 kg/ha  $P_2O_5$ );

# FIXAÇÃO

## Nortelândia (MT) – 76% de argila

56 mg/dm<sup>3</sup> (soja normal)

5 mg/dm<sup>3</sup> Soja Deficiente



Honeywell



# Reações do P no solo

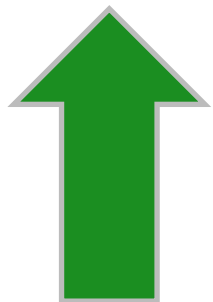
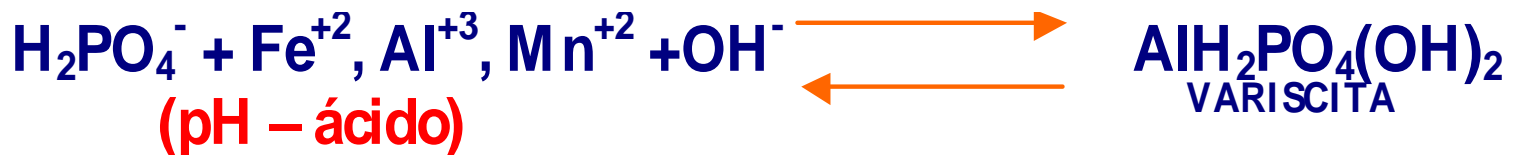
- a) Precipitação/dissolução
- b) Adsorção/dessorção
- c) Mineralização/imobilização



# Reações do P no solo

## a) Precipitação/dissolução

O fósforo da solução do solo precipita com o Al, o Fe e o Mn (pH baixo). Quando o pH é corrigido, esses elementos se precipitam e o fósforo fica disponível.



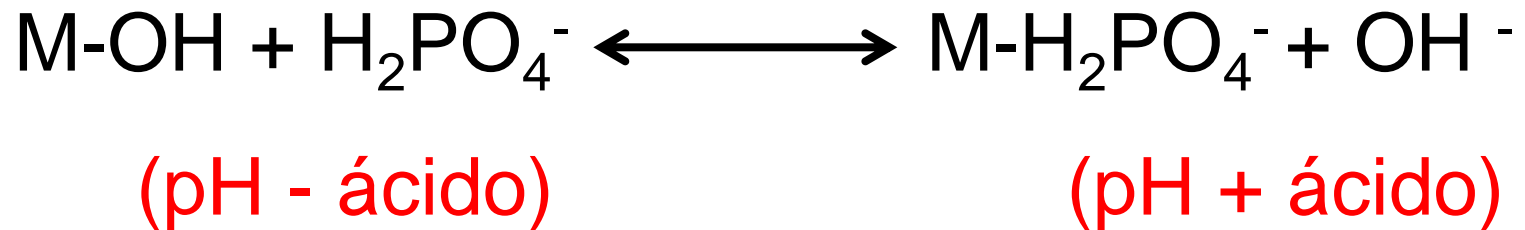
(pH + ácido)



# Reações do P no solo

## b) Adsorção/dessorção

**Adsorção Específica:** O fósforo sofre adsorção específica com os óxidos de Ferro, Alumínio e com as Argilas silicatadas, que também se encontram em menor quantidade em solos ácidos.



Onde, M = Si, Fe ou Al



# Fatores que interferem na adsorção

## a) Reação do solo

A adsorção aumenta abaixo de pH 6,5 e acima de pH 7,5

## b) Concentração de P na solução

A adsorção aumenta com a concentração de P na solução



# Fatores que interagem na adsorção

c) Teor e natureza da argila

Maior teor de argila → Maior adsorção

Óxidos de Fe e Al > Minerais argila

**Matéria Orgânica não adsorve P**

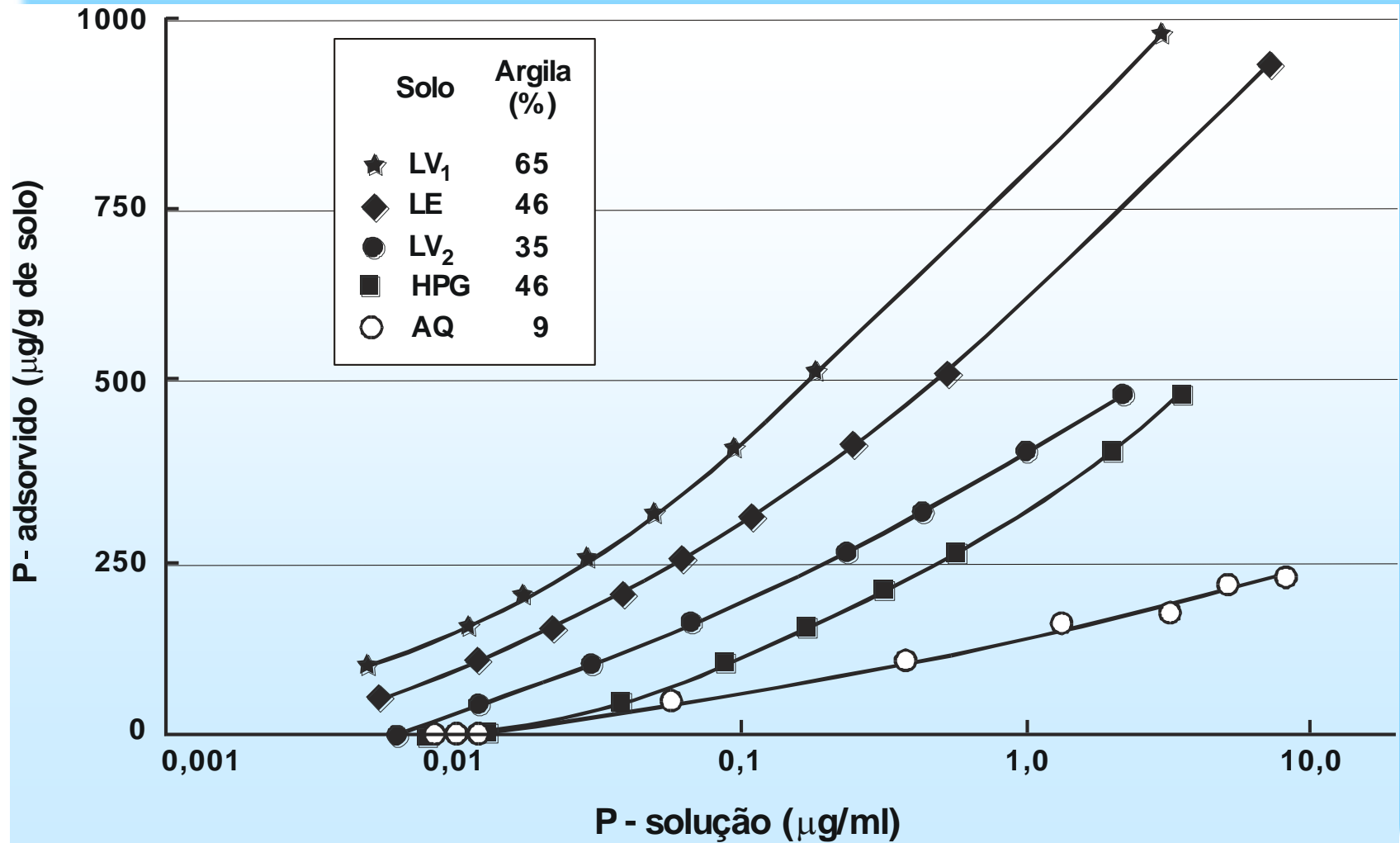
d) Saturação de P do solo

Maior saturação → menor adsorção

e) Tempo de contato com o solo

Maior tempo → maior adsorção

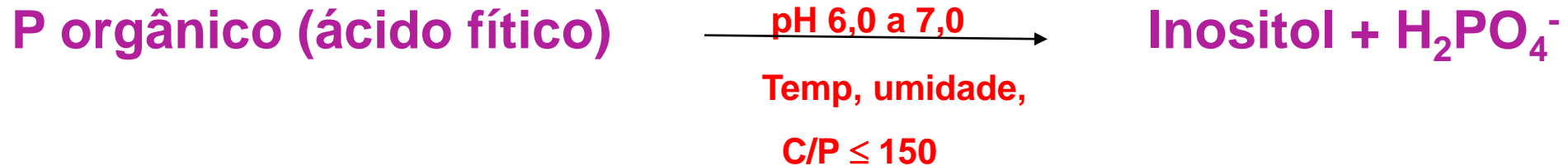
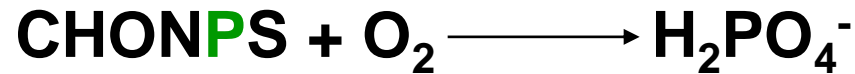
# Retenção de P no solo



# Matéria Orgânica

A M.O. melhora a disponibilidade de P por uma série de motivos:

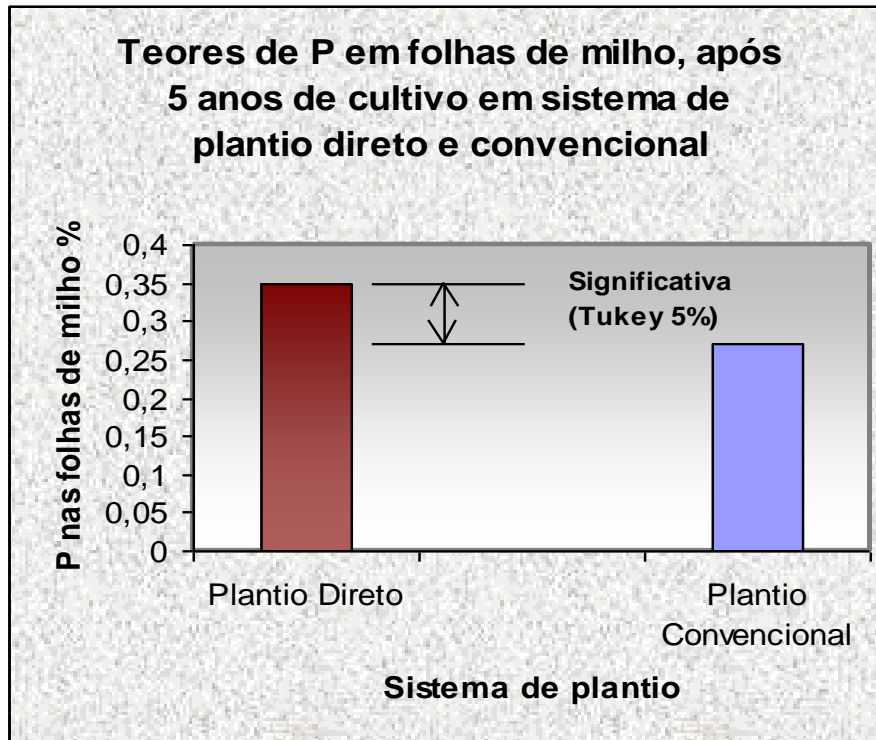
## a) Fonte de P (20 a 60% P total)



**b) Formação de complexos fosfo-húmicos facilmente assimiláveis**

**c) Fosfatos orgânicos são mais fracamente retidos**

**d) Diminuição do contato fosfato/argila**



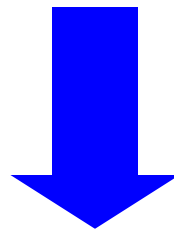
Fonte: Muzilli, 1983

## **Fósforo no Solo**

**Solos com alta capacidade de reter P em formas indisponíveis**

**MO afeta reações do P no solo:**

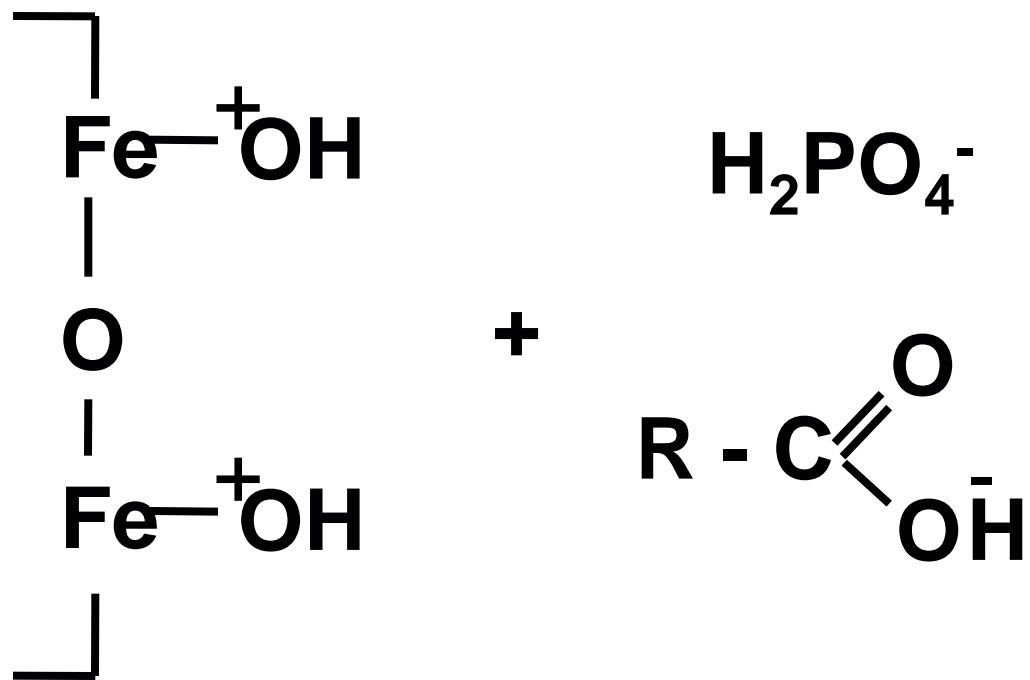
- **Saturação e Bloqueio de sítios reativos**
- **Ciclagem de P e ↑ Formas orgânicas**



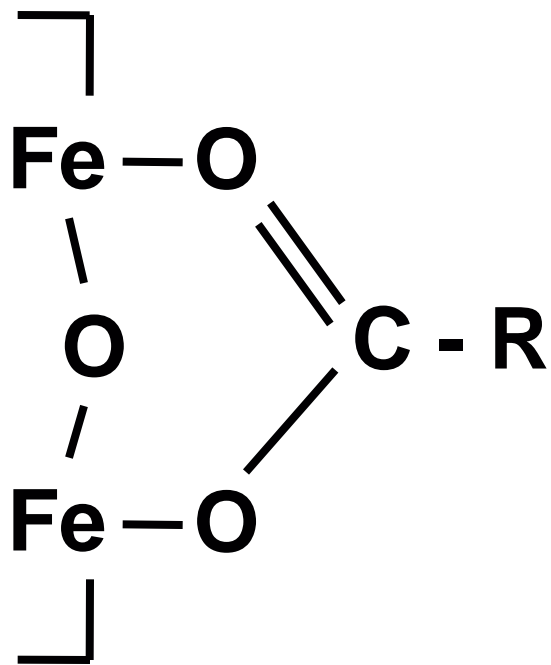
**↑ Disponibilidade de P às culturas**



# Bloqueio de sítios na superfície de óxidos de Fe



# Bloqueio de sítios na superfície de óxidos de Fe



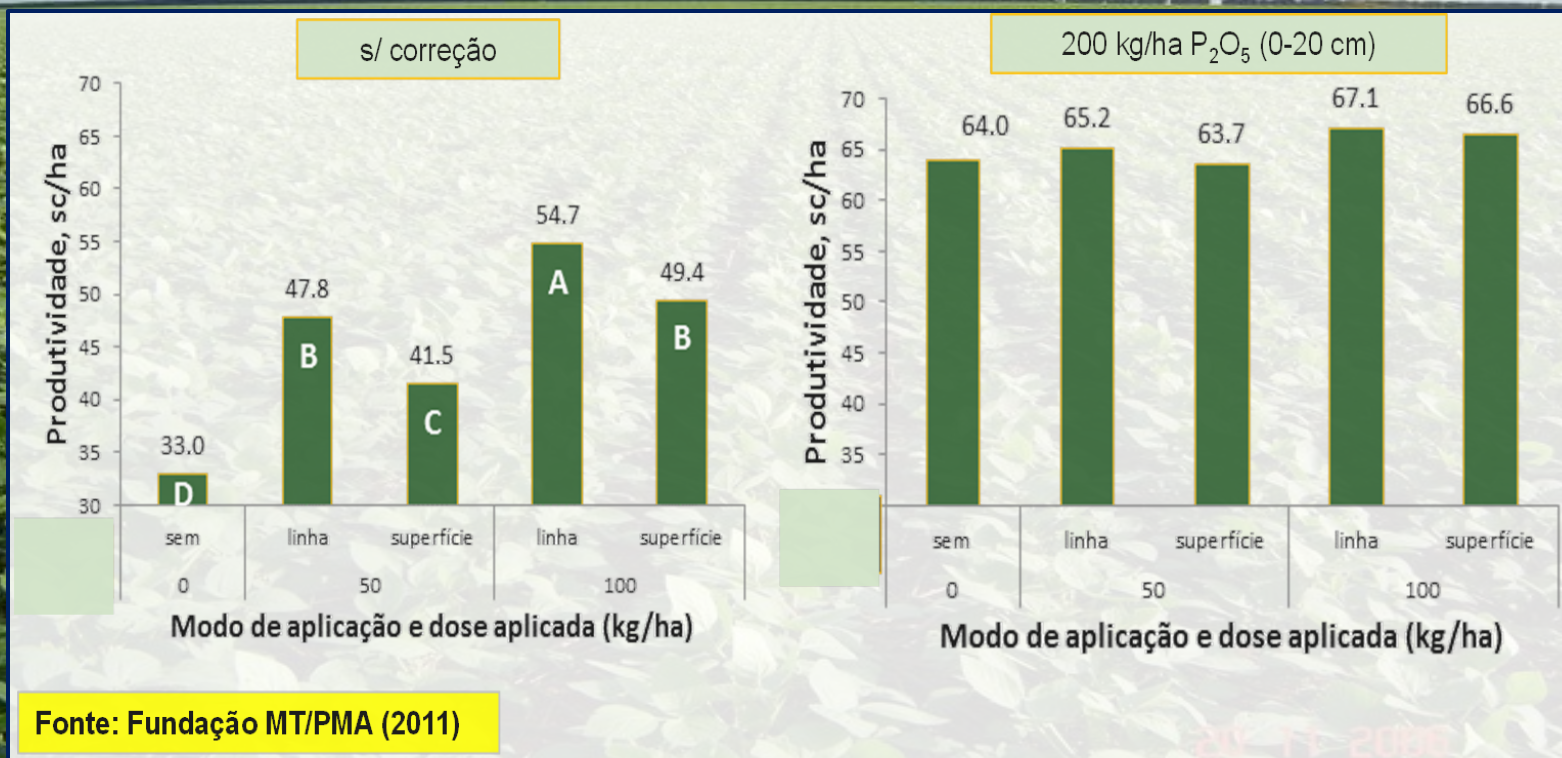
## Experimento com 20 anos em PD (Guarapuava, PR)

Prof (cm)	P Mehlich		P solução	
	PC	PD	PC	PD
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----		-----µg dm <sup>-3</sup> -----	
0-2	4,2	14,5	6,0	27,0
2-4	3,9	14,5	8,0	25,0
4-6	3,8	16,6	5,0	23,0
6-8	4,0	19,1	7,0	24,0
8-10	4,0	14,6	15	28,0
10-15	4,4	7,3	8,0	16,0
15-20	3,8	4,4	7,0	24,0
20-30	4,4	1,2	11,0	17,0



# Razões para o bom desempenho da adubação P a lanço

1. Nível de fertilidade atual (P médio a alto) dos solos cultivados
2. Clima tropical favorável com elevada precipitação





**IPNI**

INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

# Potássio no Solo



# Formas de ocorrência de K no solo

## Proporções entre as diversas formas de K do solo

- Rede cristalina de minerais primários e minerais de argila – 90 a 98%
- Fixado nos minerais de argila – 0 a 10%
- Trocável e solúvel – 1 a 2%
- Matéria Orgânica – 0,5 a 2%

# Fatores que influem na disponibilidade de potássio para as plantas

## (1) Textura do solo

Solos mais ricos em M.O. e argila → maior CTC → maior adsorção → mais K-trocável → menor perda por lixiviação

## (2) Reação do solo (pH)

Em solos ácidos a CTC está preenchida principalmente com H → menos K-trocável → maior perda por lixiviação



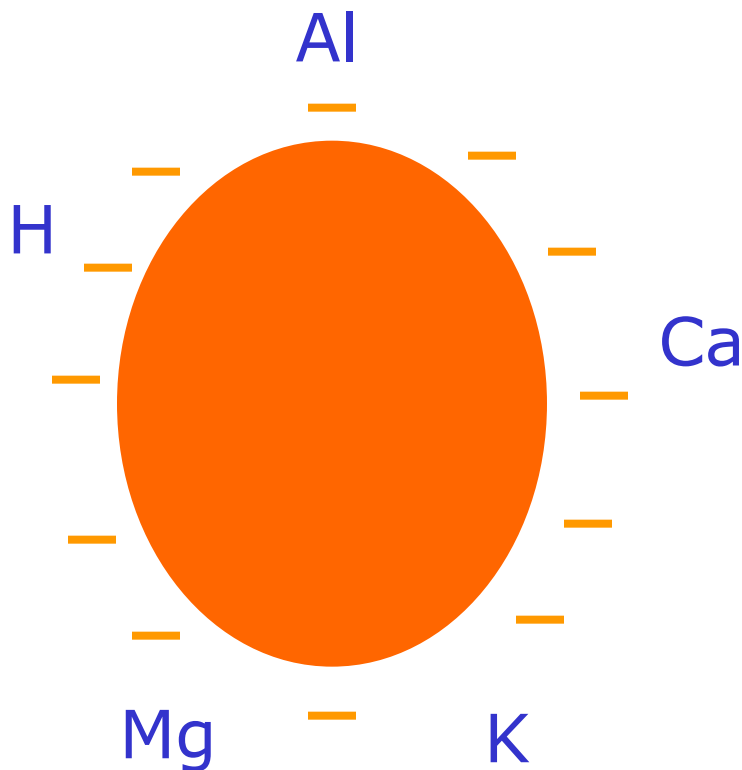
# Fatores que influem na disponibilidade de potássio para as plantas

(3) Equilíbrio iônico → excesso de  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Mg}^{++}$  desloca o  $\text{K}^+$  adsorvido para a solução do solo → maiores perdas por lixiviação

> lixiviação



> adsorção



# Fatores que influem na disponibilidade de potássio para as plantas

## (4) Natureza da Planta

As gramíneas absorvem mais facilmente potássio do que as leguminosas.



Werle R, Garcia RA, Rosolem CA. Lixiviação de K em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **RBCS**, v.32, 2008.

### Estudo realizado:

- ✓ 2 solos: 21% argila (1,5% MO) e 48% argila (2,5% MO)
- ✓ 6 anos de soja c/ 0, 60, 120 e 180 kg/ha K<sub>2</sub>O
- ✓ Colunas de 40 cm: 80 kg/ha K<sub>2</sub>O
- ✓ 100 mm por 16 semanas: 1600 mm

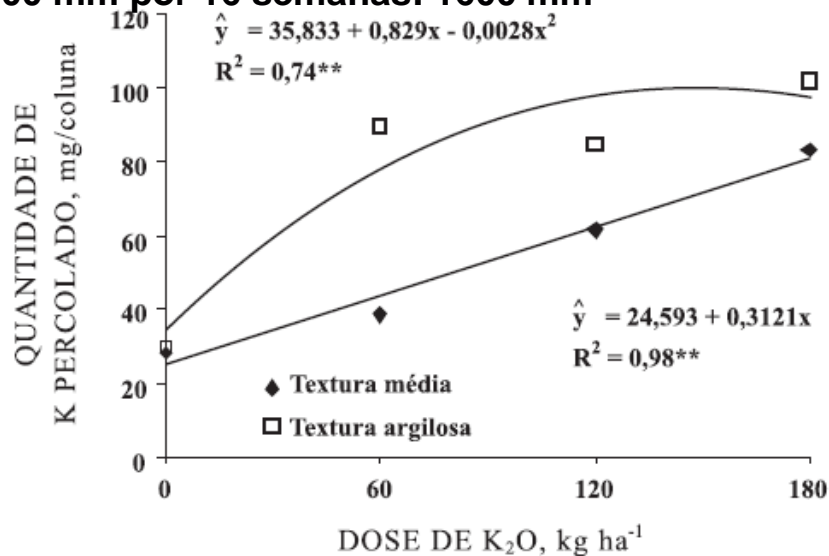
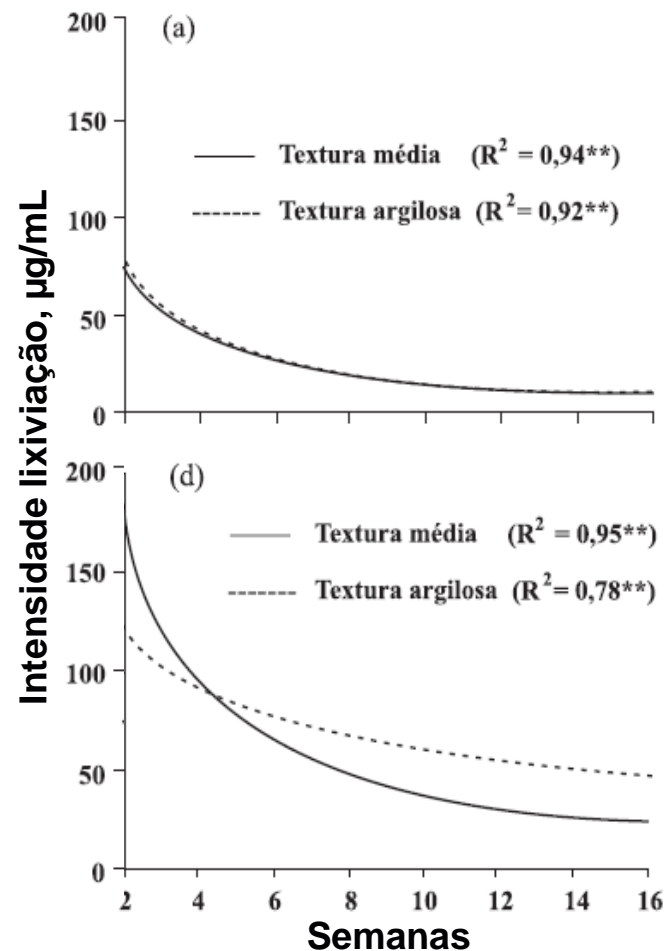


Figura 1. Quantidade total de potássio percolado após a aplicação de 1.600 mm de água, em função da adubação potássica residual e adicionado nas duas classes de solo. \*\*: significativo a 1 %.

Figura 2. Intensidade de K percolado nas doses 0 (a) e 180 (b) kg/ha K<sub>2</sub>O (+80 kg/ha) em função da aplicação de água.





**IPNI**

INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

# Enxofre no Solo





# Introdução

## ENXOFRE

- Exigido em quantidades às vezes superiores as de Fósforo.
- Elemento deficiente em muitos solos tropicais
- É um dos macronutrientes menos utilizados nas adubações

## Deficiência de S nas culturas nos últimos anos:

- Emprego de fertilizantes concentrados (sem enxofre) tem aumentado
- Emprego de S nos defensivos tem diminuído
- Emprego de combustíveis fósseis tem diminuído
- Reservas de enxofre dos solos estão se esgotando

# Formas de ocorrência

## Enxofre na solução

### Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

- É a forma disponível mais importante para as plantas
- É a espécie mais estável em solos arejados

### $\text{H}_2\text{S}$

- Aparece em solos muito reduzidos (encharcados)
- Pode ser tóxico em certas concentrações

## Gases

### $\text{SO}_2$ e $\text{H}_2\text{S}$

- $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  podem ocorrer no solo em pequenas quantidades
- $\text{SO}_2$  atmosférico penetra na planta pelos estômatos sendo metabolizado

# Formas de ocorrência

## Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Adsorção pode ser

- Não específica: depende de cargas positivas nos colóides
- Específica: não depende de cargas positivas

Natureza do complexo coloidal

- Óxidos de Al > Óxidos de Fe > Caulinita > Minerais de argila 2:1

pH do solo

- A adsorção diminui com o aumento do pH, tornando-se muito baixa acima de pH 6,5

Presença de outros ânions

- Ânions como fosfato e molibdato diminuem adsorção (competição)



# Efeito do fosfato na absorção do sulfato

Fosfato Adicionado	<u>meq/100g</u>	S-SO <sub>4</sub> Adsorvido
0		2,9
0,12		1,7
0,24		0,6
0,36		0,0



# Formas de ocorrência

## Enxofre orgânico

- Representa de 80 a 95% do total de enxofre do solo
- É uma forma de reserva de S do solo
- Principais compostos orgânicos sulfurados de origem vegetal são: aminoácidos, as proteínas e os ésteres de sulfato

# Transformações no solo

## MINERALIZAÇÃO

- Fenômeno realizado por microorganismos heterotróficos não especializados



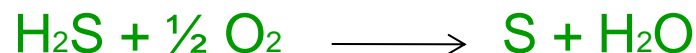
Outros produtos finais: S elementar, SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

# Transformações no solo

## TRANSFORMAÇÃO DO S MINERAL

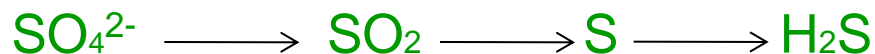
### OXIDAÇÃO:

- A oxidação do enxofre no solo é feita por bactérias do gênero *Thiobacillus*



### REDUÇÃO:

- Ação de bactérias anaeróbias



Município do Rio Grande

Testemunha	2941
90 – 60 – 90 (uréia)	3741
90 – 60 – 90 (sulfato)	2295





**IPNI**

INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

# Micronutrientes no Solo

**Curso de Especialização em Manejo do Solo  
ESALQ/USP**

**Dr. Valter Casarin  
IPNI Brasil - Diretor Adjunto**





# Micronutrientes de Plantas

Legislação Brasileira (Decreto 4.954/14-01-04)

Instrução Normativa n.º 5 / 23/02/07

Boro	B	Manganês	Mn
Cloro	Cl	Molibdênio	Mo
Cobre	Cu	Zinco	Zn
Ferro	Fe	Cobalto	Co
		Silício	Si
		Níquel	Ni



## Conteúdo: f (rocha e solo)

Micronutrientes	Teor no solo	(ppm)
Fe	10.000	100.000
Mn	20	3.000
Zn	10	300
Cu	10	80
B	7	80
Mo	0,2	10

$Fe > Mn > Zn \geq Cu > B > Mo$

Ordem encontrada no solo

# Origem dos micronutrientes do solo

Rocha matriz (material de origem)

Resíduos animais e vegetais

Corretivos e fertilizantes

Defensivos agrícolas

Precipitação Cl e B



# Equilíbrio dos micronutrientes no solo

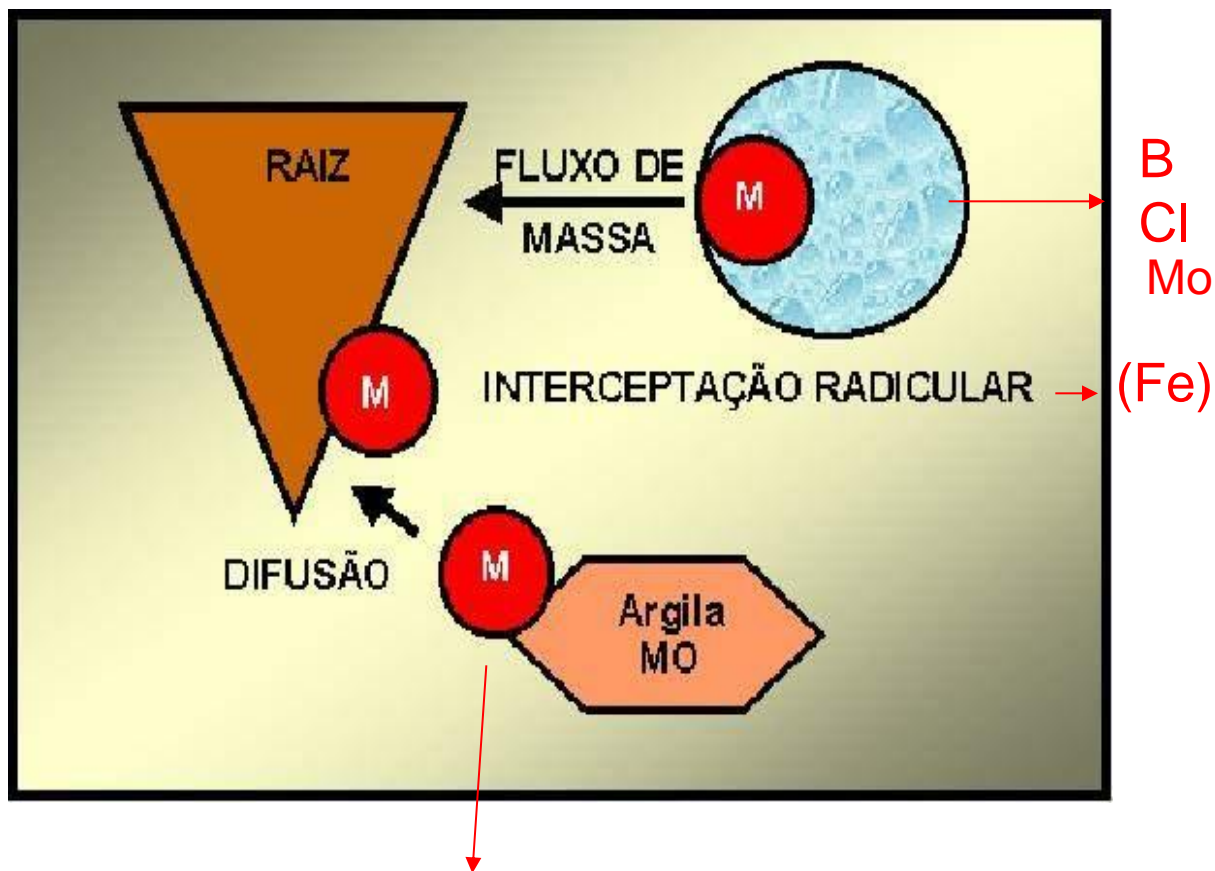


# Formas de absorção pelas raízes das plantas

NUTRIENTE	FORMAS
Boro (B)	$H_3BO_3$ , $H_2BO_3^-$
Cloro (Cl)	$Cl^-$
Cobre (Cu)	$Cu^{++}$
Ferro (Fe)	$Fe^{++}$
Manganês (Mn)	$Mn^{++}$
Molibdênio (Mo)	$MoO_4^{2-}$
Zinco (Zn)	$Zn^{++}$
Cobalto (Co)	$Co^{++}$
Silício (Si)	$H_4SiO_4$



# Absorção: contato íon - raiz



Micro Metálico



# Absorção: contato íon - raiz

## 1) Fluxo de massa (Lixiviação)



## 2) Difusão (Fixação no solo)



# Relação entre o processo de contato e a localização dos fertilizantes

Elem.	Processo de contato			Aplicação de adubos
	Interceptação -----	Fluxo de massa (% do total)	Difusão -----	
B	3	97	0	Distante, em cobertura (parte)
Mo	5	95	0	Cobertura
Cu*	15	5	80	Próximos das raízes
Fe*	40	10	50	Próximos das raízes
Mn*	15	5	80	Próximos das raízes
Zn*	20	20	60	Próximos das raízes

\* Aplicação Foliar/Aplicação em Mudras

Fonte: Malavolta et al, 1997.



**IPNI** INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE



# Fatores associados a deficiência e a disponibilidade

- a) Material de origem do solo
- b) Textura do solo
- c) Aeração do solo
  - . Ferro
  - . Manganês
  - . Cobre
  
- d) Práticas culturais
  - . Calagem (reação do solo)
  - . Adubação fosfatada
  - . Plantio direto
- e) Características genéticas da planta (Ex: soja RR)
- f) Desbalanceamento entre nutrientes
- g) Altas produtividades (Lei do mínimo)
- h) Queima de restos culturais (Boro: Cana-de-açúcar e algodão)





**IPNI**

INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

**OBRIGADO**

