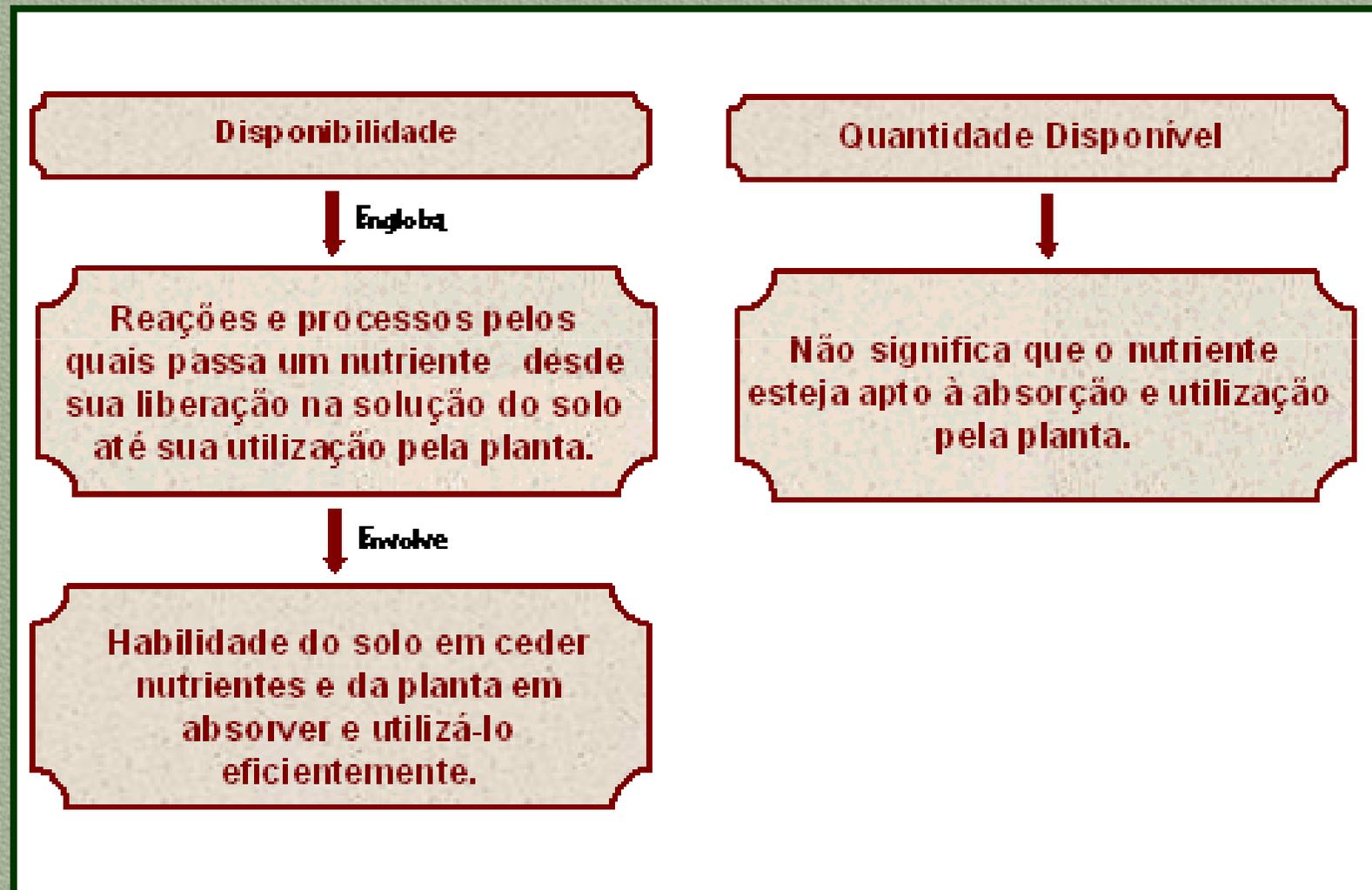


UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO

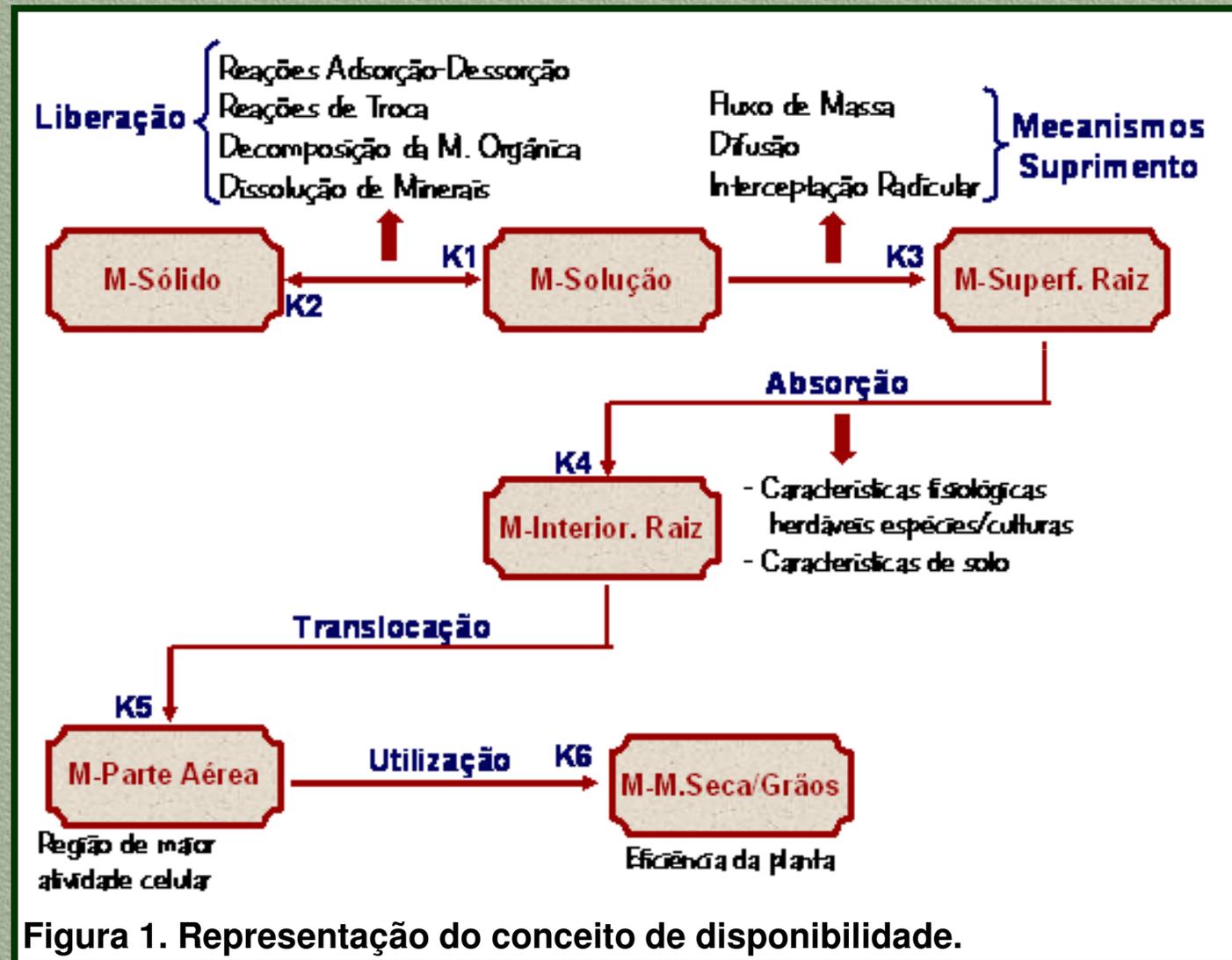
DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES

DOCENTE: Dr. Ribamar Silva

Disponibilidade de Nutrientes para as Plantas



Conceituação Moderna de Disponibilidade de Nutrientes para as Plantas



Conceitos → Disponibilidade de Nutrientes

① Realisticamente

. Disponibilidade → É a quantidade do nutriente que pode ser absorvida pela cultura durante seu ciclo vegetativo.

② Conceitualmente

. Disponibilidade → É a resultante da ação integrada dos fatores Quantidade (Q), Intensidade (I) e Capacidade Tampão (CT) do nutriente no solo.

ONDE:

- I - Fator Intensidade** → [Nutriente] na solução do solo.
- Q - Fator Quantidade** → Reserva lábil, quantidade adsorvida, trocável ou precipitada do nutriente que pode passar à solução do solo (equilíbrio dinâmico).
- CT (Q/I) - Capacidade ou Poder Tampão** → Medida da resistência do solo para deixar variar a [Nutriente] na solução do solo.
 - Solo Argiloso → Q/I alto e Q alto.
 - Solo Arenoso → Q baixo e I alto, Q/I baixo.

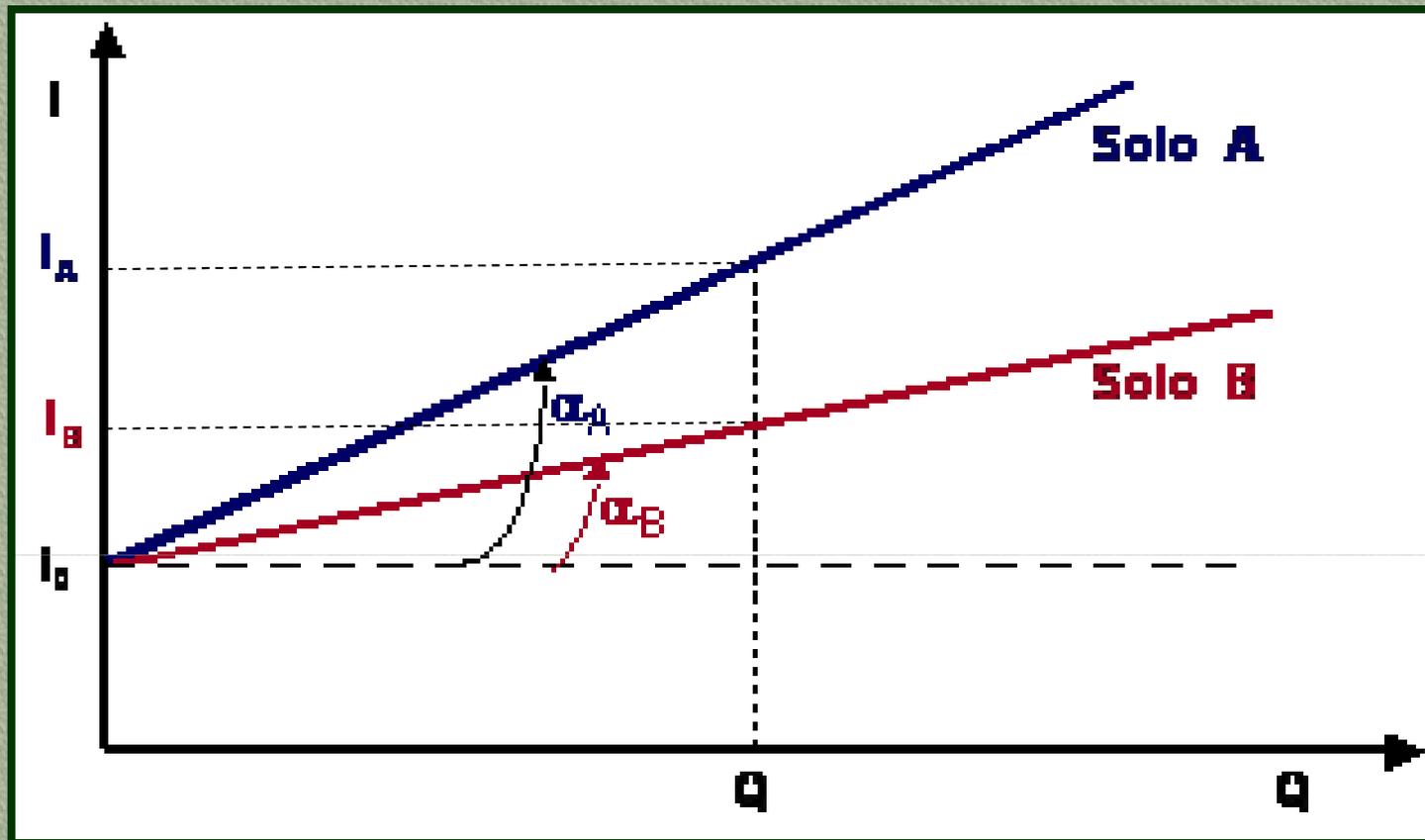


Figura 2. Isotherma de adsorção de um nutriente M.

- . $\text{tg } \alpha = \Delta I / \Delta Q$ (declividade)
- . Poder Tampão é o inverso da declividade, assim:

$$CT = 1 / [\Delta I / \Delta Q] \rightarrow CT = \Delta Q / \Delta I$$

③ Operacionalmente

- . Disponibilidade → quantidade de nutrientes extraída que se correlaciona estreitamente com o conteúdo desse nutriente na planta →
M-extraído x M-planta ($R^2 \geq 0,80$).
- . Quantidade Disponível → realisticamente é a resultante do balanço entre perdas e ganhos do nutriente no solo.
- . Disponível nem sempre representa a quantidade de um nutriente absorvível e absorvido.

- . Disponível → formas do nutriente com potencialidade de ser utilizado, sendo sua utilização efetiva controlada pelo transporte até a zona de absorção radicular.

Quantidade Absorvida → Depende da:

- . Quantidade Absorvível por um lado e,
- . Eficiência de absorção da planta. Ou seja, depende da quantidade disponível e do mecanismo de transporte.

Assim: Assimilável = Absorvível ≠ Disponível

Disponível = Absorvível → Só quando não há limitações de transporte até as raízes.

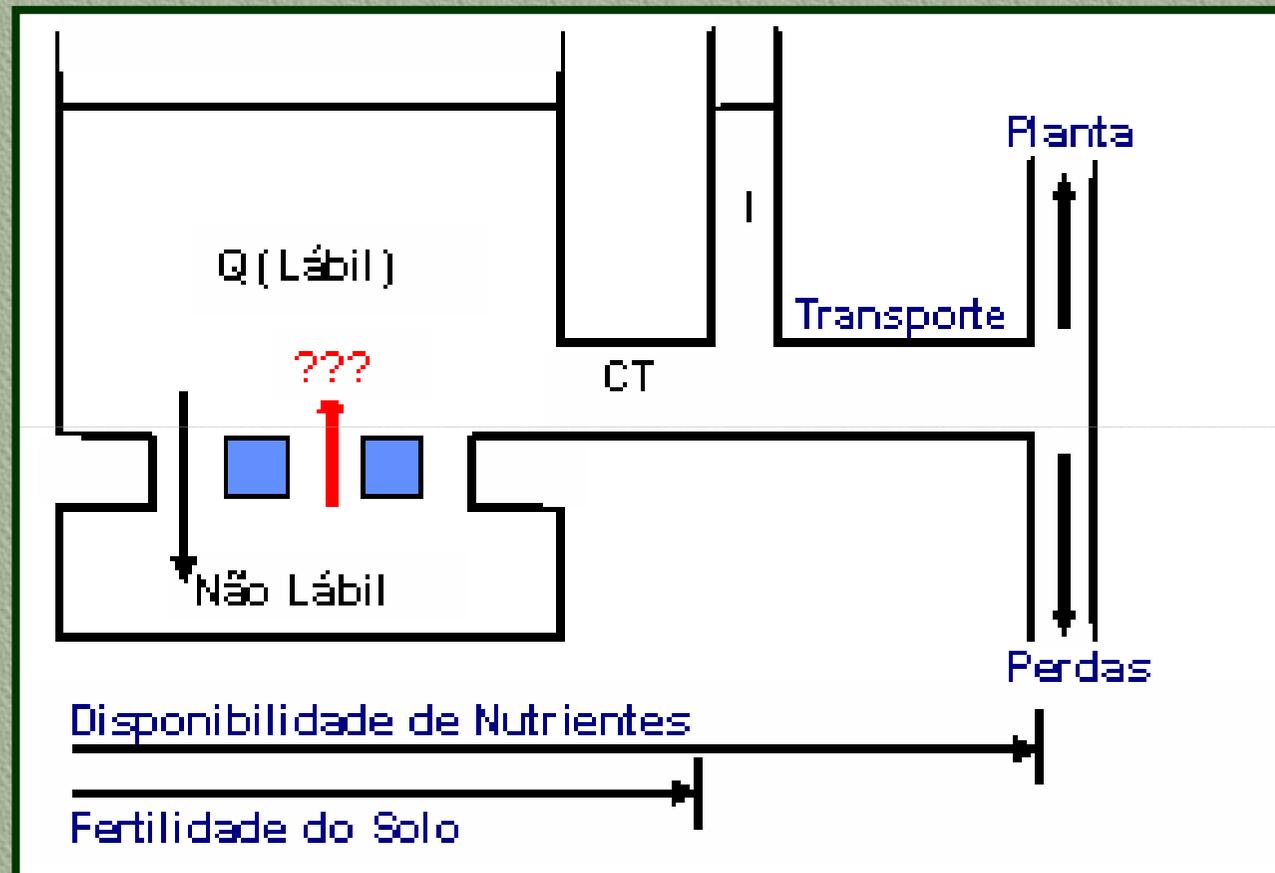


Figura 3. Disponibilidade de nutrientes sob o ponto de vista hidrodinâmico.

- Fertilidade → Considera a disponibilidade do nutriente na solução do solo perto das partículas sólidas sem considerar o transporte (difusão, fluxo de massa, interceptação radicular).**

Suprimentos de Nutrientes às Plantas

. Para um nutriente ser absorvido é requerido:

- Solo forneça nutriente;
- Nutriente → Transportado até à zona das raízes (via solução do solo).

Principais Mecanismos de Suprimento

① Interceptação Radicular

- . Crescimento das raízes, ao longo de sua trajetória, ocorre o contato com o nutriente e sua absorção.
- . Raízes ocupam 0,1 - 2,0 % do volume do solo → Contribuição muito pequena.

① Interceptação Radicular (Cont.)

- . Importância maior → facilitar a difusão.
- . Ca pode ser suprido totalmente por esse mecanismo.

② Fluxo de Massa ou Fluxo de Transpiração

- . É consequência da existência de um gradiente de potencial hídrico oriundo da transpiração, onde o potencial de H₂O no solo é maior do que aquele junto à raiz.
- . Fechamento dos Estômatos → Diminui a absorção de N, Ca e Mg.

② Fluxo de Massa ou Fluxo de Transpiração

- . Tecidos com baixa taxa de transpiração (meristemas e frutos) têm menor teor de cálcio.
- . [Ca] folhas desenvolvidas > [Ca] frutos → folhas têm maior transpiração → Ca tendo baixa mobilidade nas plantas → Fluxo de Massa.
- . N, Ca, Mg → Maiores concentrações na solução e retidos com menor energia na fase sólida em relação ao Zn e P, por exemplo, são supridos por fluxo de massa.

③ Difusão

- É decorrente da existência de um gradiente de concentração na solução do solo fora e dentro da área de ação do sistema radicular.
- "P", "K" e "Zn" são supridos principalmente por esse mecanismo de suprimento.
- O esquema a seguir ilustra o processo de difusão ao nível de raiz.



$C1$ → [Nutriente]sol. fora da zona das raízes

C → [Nutriente]Sol. Próximo à raiz

③ Difusão

Expressão Matemática da Difusão:

$$D = D_e \cdot V_e \cdot f_e \cdot \frac{dl}{dQ} + D_t$$

Onde:

D = Difusão do elemento no solo (cm^2/s).

D_e = Coef. Difusão do elemento na água (T e P).

V_e = Conteúdo volumétrico de água.

$\frac{dl}{dQ}$ = Representa o inverso do Poder Tampão (diferencial).

f_e = Fator impedância, inclui: tortuosidade da trajetória, aumento da viscosidade próximo à superfície da raiz, adsorção.

D_t = Difusão na Fase Sólida.

OBS: Sorção = Adsorção + Precipitação
Adsorção Não Lábil → Irreversível.

③ Difusão

Significado prático da difusão:

D (cm²/s) → Diretamente dependente:

- Conteúdo volumétrico de água;
- Concentração do nutriente próximo à raiz;
- Inverso do poder tampão;
- Área radicular.

D Alto → Fluxo de massa é o principal mecanismo de suprimento do nutriente → . . .

- Alta mobilidade.
- Intensas perdas por lixiviação.
- Pequeno ou nenhum efeito residual.
- São mais críticos no estágio mais avançado do desenvolvimento da planta, coincidindo com a maior demanda.
- Pouco dependentes do volume de raízes.

D Baixo → associado ao mecanismo de difusão.

- Imobilidade no solo;
- Pouca perda por lixiviação.
- São mais críticos na fase inicial de desenvolvimento da planta, Dado ao pequeno volume de solo explorado pelas raízes.

Coeficientes de Difusão de Alguns Íons no Solo:

ÍON	VALOR DE "D"
H_2PO_4^-	$9,8 \times 10^{-11}$
K^+	$2,3 \times 10^{-7}$
NO_3^-	$0,5 - 5,0 \times 10^{-6}$
NH_4^+	$0,4 - 3,0 \times 10^{-7}$



$$D_{\text{NO}_3^-} = 100.000 \times D_{\text{H}_2\text{PO}_4^-}$$

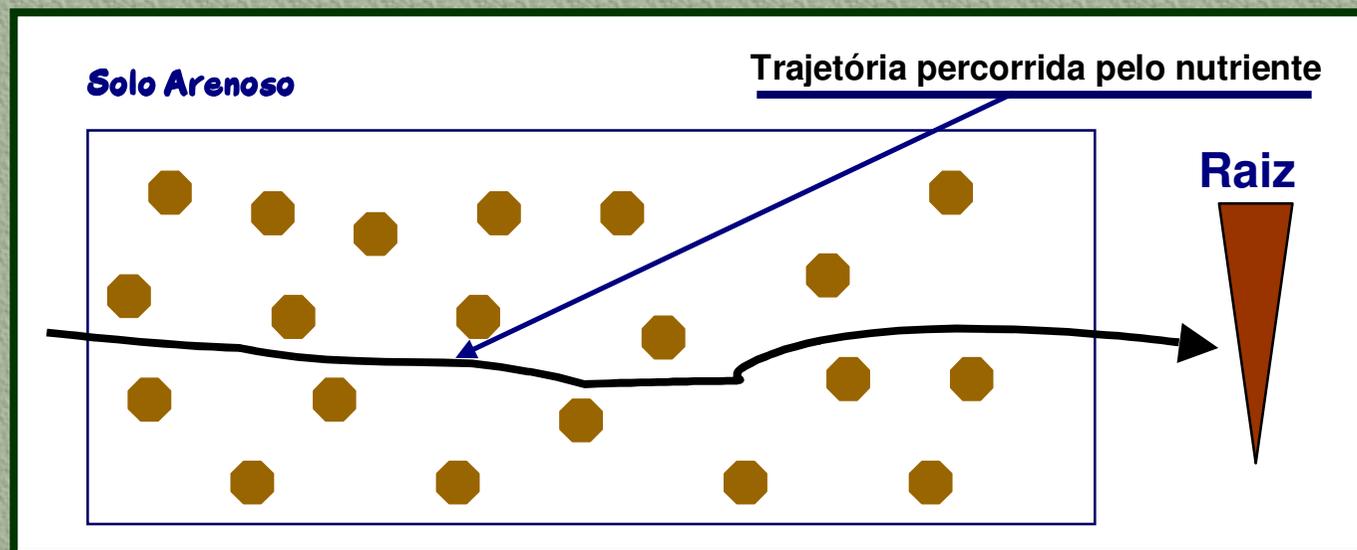
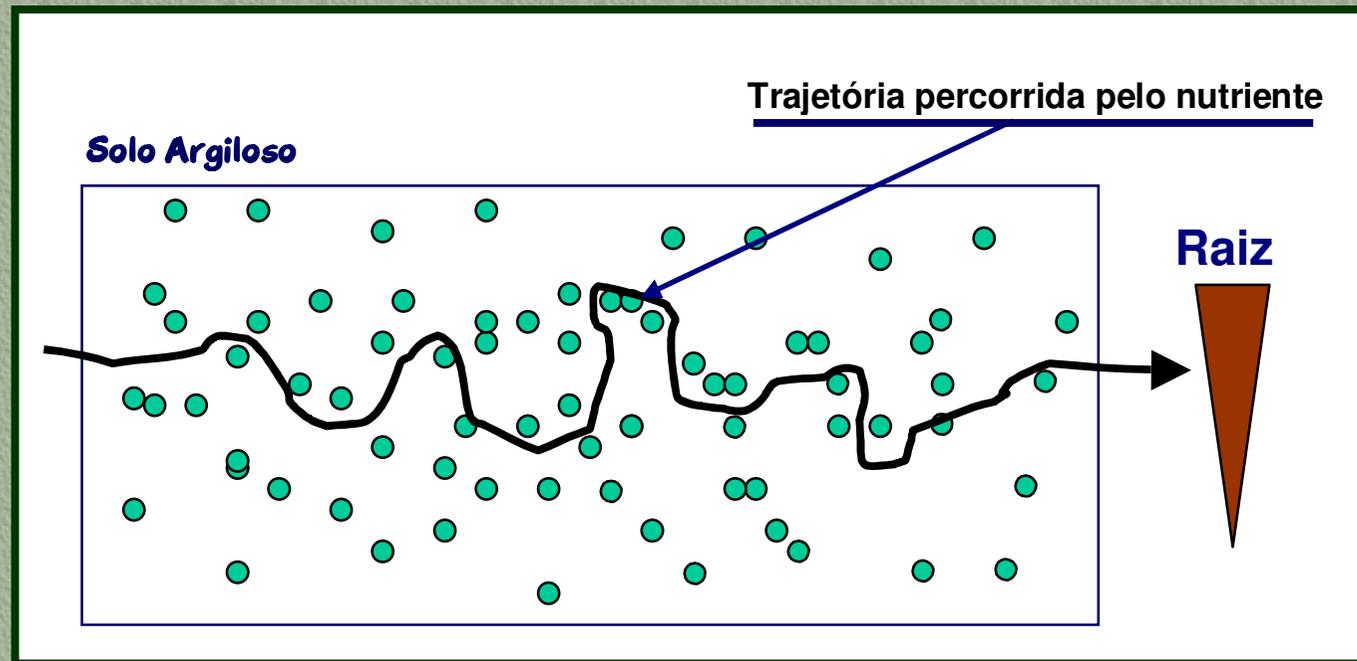
Alta Mobilidade do NO_3^- → Intensas perdas por lixiviação
→ Pequeno ou nulo efeito residual com os cultivos → Fluxo de massa ou de Transpiração.

Mobilidade = f (D) → DH_2PO_4^- baixo → Assegura imobilidade no solo → < lixiviação → Mecanismo de difusão.

$\text{DNH}_4^+ < \text{DNO}_3^-$ → NH_4^+ é menos lixiviado.

Influência da Textura:

- Solo Arenoso → Partículas maiores, com teor de umidade próximo à saturação → Fluxo difusivo percorre distâncias menores para levar o nutriente até às raízes.
- Se → $f_e = 1/\text{dist. percorrida}$ (tortuosidade).
- Solo Arenoso → $< d \rightarrow > f_e$, além de $I > Q \rightarrow dI/dQ$ é mais alto → Maior difusão.
- Solo Argiloso → $> d \rightarrow < f_e \rightarrow$ Difusão não depende só do f_e ; Ela resulta da interação dos demais fatores onde dI/dQ (mais baixo) → tem um efeito maior ($I < Q$) que o do $f_e \rightarrow$ Menor difusão.



- . Em solos 2:1 → A difusão ocorre mesmo em menor nível de água, Existe menor adsorção e conseqüentemente dI/dQ é alto, o mesmo não ocorre em solos oxídicos.
- . Em clima semi-árido (pouca chuva) → Difusão chega a ser satisfatória. Solos oxídicos maior é a necessidade de água para uma difusão eficiente.

Contribuição de cada mecanismo de suprimento em solo de região temperada:

Nutriente	I (mg/L)	Nutriente Requerido (kg/ha)	Intercepção Radicular	Fluxo de Massa	Difusão
P	0,2	30	1	0,12	28,9
K	10	110	3	12,0	95,0
Mg	25	35	8	75,0	-
Ca	200	45	40	90,0	-

- . Solo de Cerrado → Oxídico (eletropositivo) → Fluxo de massa é mais dificultado que em solos de regiões temperadas, pois as cargas (+) dificultam o movimento dos ânions até as raízes.
- . Em solos 2:1 o K^+ se comporta semelhante ao P no Cerrado → tem sua difusão dificultada.
- . Fluxo de massa → Só passa a ser importante para fósforo quando se adiciona P ao solo de modo a saturar a capacidade máxima de adsorção, aí sobra P na solução em concentração mais elevada.

Densidade do solo (Compactação):

Experimento: Relação Densidade do Solo x Produtividade Trabalhos Realizados na UFV - Prof. Novais

① $450 \text{ ppm P} \rightarrow 900 \text{ kg/ha P} \times 2,3 = 2.070 \text{ kg/ha P}_2\text{O}_5$
 $2.070 \times 100/20 = 10,3 \text{ t/ha de SFS}$

Doses P (mg/kg)	0	150	300	450
Densidade (g/cm ³)	1,3	1,3	1,3	1,3
		-----Não houve resposta às doses P-----		

- . Só houve resposta à aplicação de P → $ds < 1,3 \text{ g/cm}^3$
- . $ds = 1,3$ → No tratamento 150 ppm em diante não teve mais resposta.
- . **Conclusão:**
Dependendo do solo, aumentar dose de P em solo compactado não garante respostas satisfatórias.

2 Solo Sete Lagoas (LE – 70 % argila) Dose de P = 100 mg/kg

Densidade do Solo (g/ml)	0,9	1,1	1,3
Matéria Seca (g)	Resposta (+)	--- Resposta caiu bruscamente---	

Conclusão: Maior Compactação → Menor Produtividade.
Para P = 400 mg/kg → Efeito da compactação diminuiu.
Para P = 800 mg/kg → Efeito da compactação desapareceu → Econômico?

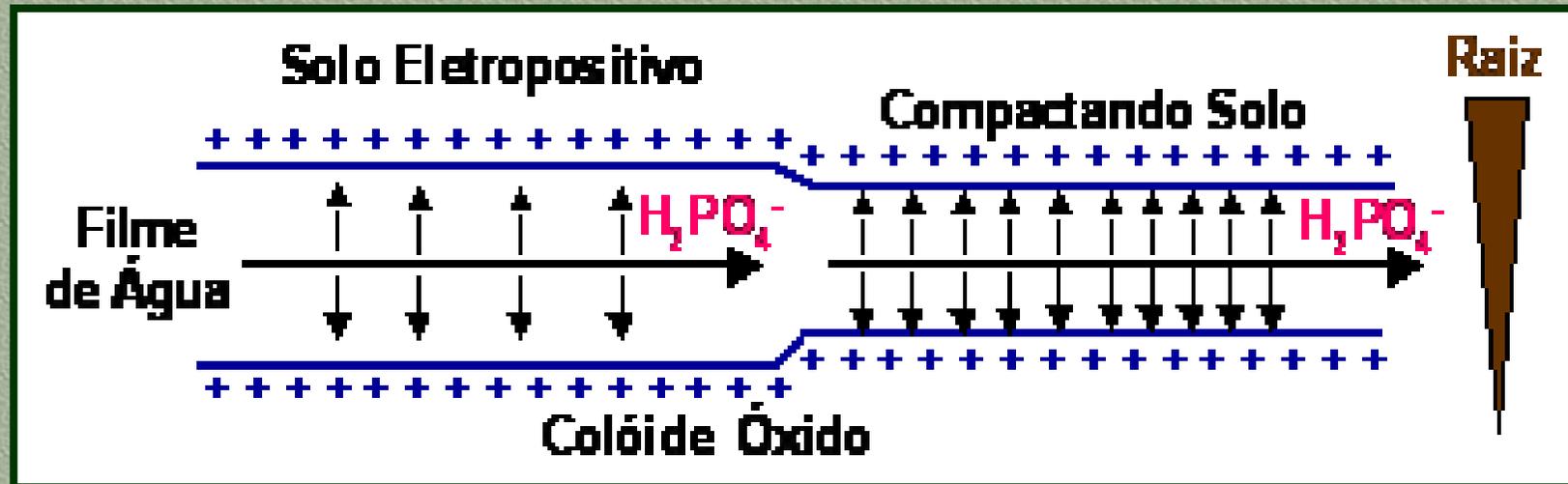


Figura 4. Efeito da compactação sobre a difusão de fósforo.

- . Solos argilosos e bem intemperizados → ↑ densidade (compactação) → Filme de água mais delgado → Ânions $H_2PO_4^-$ mais atraídos em sua trajetória/colóides (eletropositivos) em relação à força gerada pelo gradiente de concentração que os levam até às raízes.
- Doses mais elevadas de P são requeridas para que o excedente seja transportado até as raízes.

3 Solo Arenoso - 20% argila - P = 75 mg/kg

Densidade Solo (g/ml)	1,3	1,5	1,7
Matéria Seca (g)	Resposta (+)	*Queda Produção bem menor	
* Em relação à observada no solo argiloso (T2)			

Conclusão: Solo Arenoso → Não tem carga positiva (+ jovens), ainda permanece uma porosidade maior. Às vezes uma ligeira compactação → Favorável a um filme contínuo de água → Aumento de produção. Mesmo submetido a uma compactação maior a queda na produção foi menor em relação ao solo argiloso.

. O aumento da umidade pode compensar em parte o efeito da compactação.

Compactar solos do Nordeste → Consequências?

- . Cargas negativas >>> positivas → Não seria tão crítico com relação aos mecanismos de transporte de nutriente. Sob condições de falta de água seria também menos crítico.

Umidade do solo:

- . Figura 5 a seguir → Influência do teor de umidade sobre o processo de transporte do fósforo no solo.
- . A secagem do solo afeta, de modo idêntico à compactação, o processo de difusão de fósforo, reduzindo assim seu fluxo até a raiz, principalmente em solos argilosos e bem intemperizados (oxídicos).

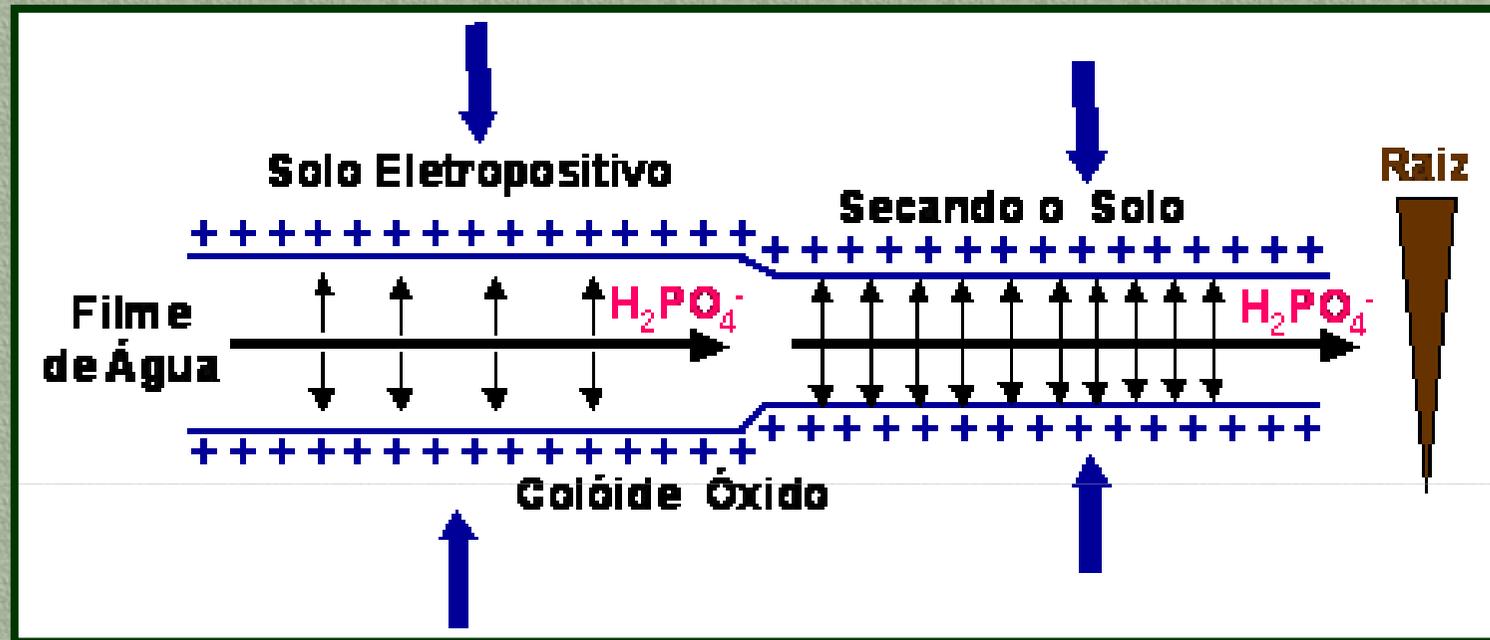


Figura 5. Efeito do teor de umidade na difusão de P.

- Em solos 2:1 → Efeito da perda de água não é tão crítico → Dominantemente eletronegativos. Trajetória do nutriente será prioritária em direção à raiz e não ao solo (colóide).

- . A água é mais crítica em solos de regiões úmidas ou naqueles naturalmente de regiões áridas?

Região úmida → Solos bem intemperizados, sistema se ajustou tendo mais água → Qualquer veranico passa a ser crítico. A importância da água é mais nutricional (transporte de nutrientes).

Região árida → Qualquer quantidade de chuva já é suficiente, pois a água importante é fisiológica.

- . Mesmo em solo arenoso já com certo grau de intemperização que ocorre no Cerrado → Pequeno déficit de água pode ser drástico, mesmo quando se aplica alta dose de P no solo.

- . Quando aumentamos novamente o teor de umidade do solo → Espessura do filme de água aumenta → Ânions passam mais distantes das cargas (+) dos colóides → < atração com força menor que a gerada pelo gradiente de concentração

Fatores que Afetam Disponibilidade dos Nutrientes para as Plantas

A - Material de origem/grau de intemperização dos solos:

- . Solos Jovens derivados de Basalto → Em geral são solos fontes (ricos em Ca, Mg e Fe).

- . Solos derivados de Granito → Fontes de K total.
- . Solos extremamente intemperizados → Drenos.

B - Mineralogia dominante:

**Minerais
Podem Atuar**

Fonte de Nutrientes

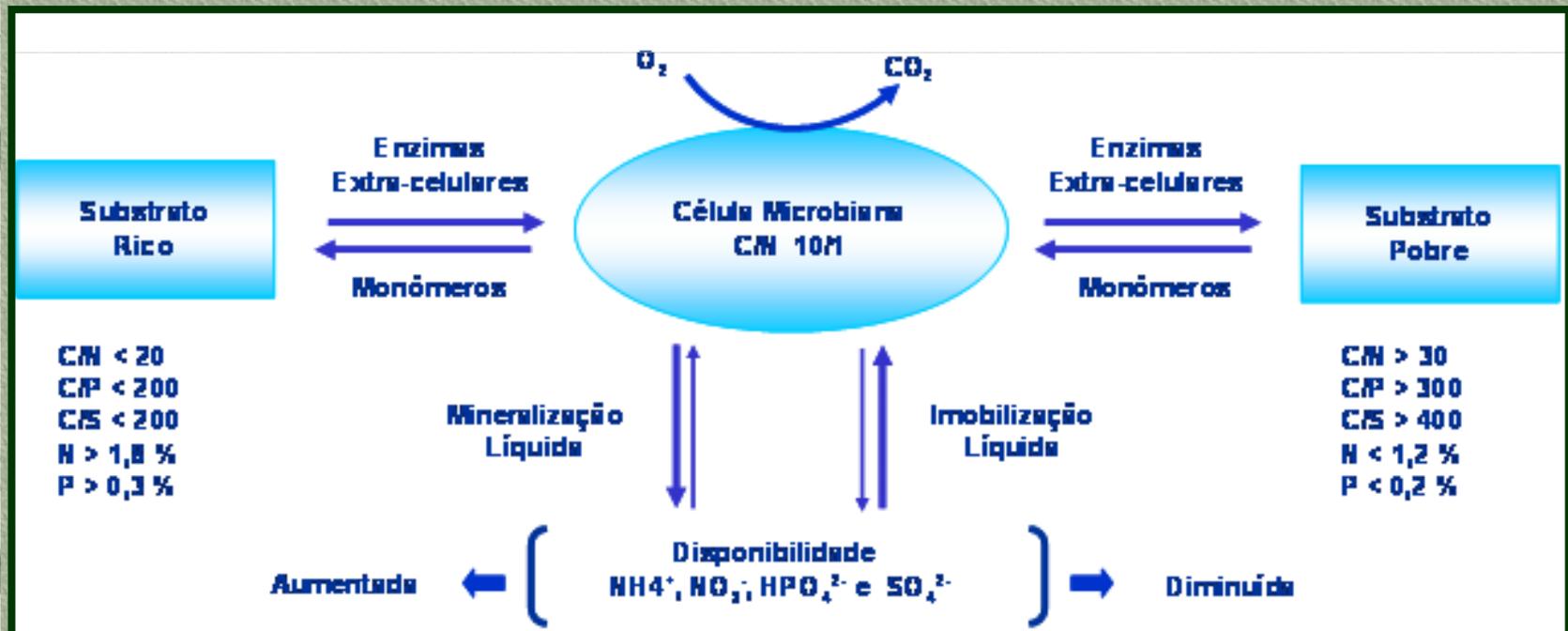
- . Piroxênios, Anfibólios
- . Plagioclásios, Micas

Fixadores de Nutrientes

- . Minerais 2:1 (vermiculita) → K^+ , NH_4^+
- . Óxidos Fe e Al → $H_2PO_4^{-1}$

C - Matéria Orgânica:

- . Mineralização → Liberação de N, P e S.
- . Contribui, ao lado da argila → Retenção de cátions (CTC) e adsorção de aniônica → SO_4^{2-} e H_2PO_4^- .

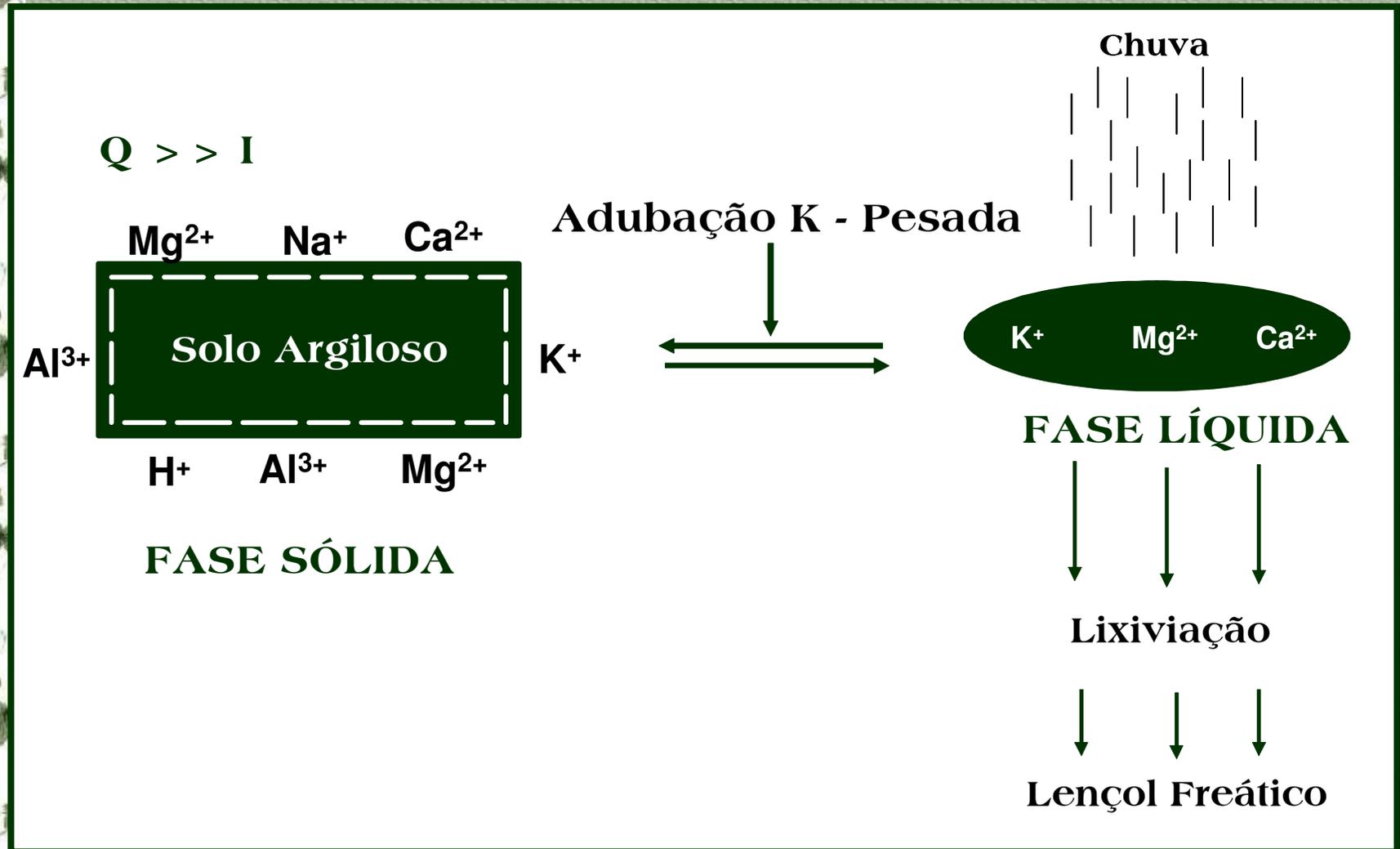


Substrato Rico → Boa disponibilidade de Nitrogênio
Relação C/N será baixa → Liberação de nutrientes por mineralização é rápida.

Substrato Pobre → Baixa disponibilidade de nutrientes (N), com o crescimento da atividade biológica o nitrogênio produzido fará parte inicialmente da biomassa microbiana (imobilização).

D - Textura do Solo:

- . Teor de argila ao lado da matéria orgânica → Aumento da CTC do solo → > Retenção de cátions.
- . Dependendo do tipo de argila → > ou < adsorção aniônica (SO_4^{2-} e H_2PO_4^-).



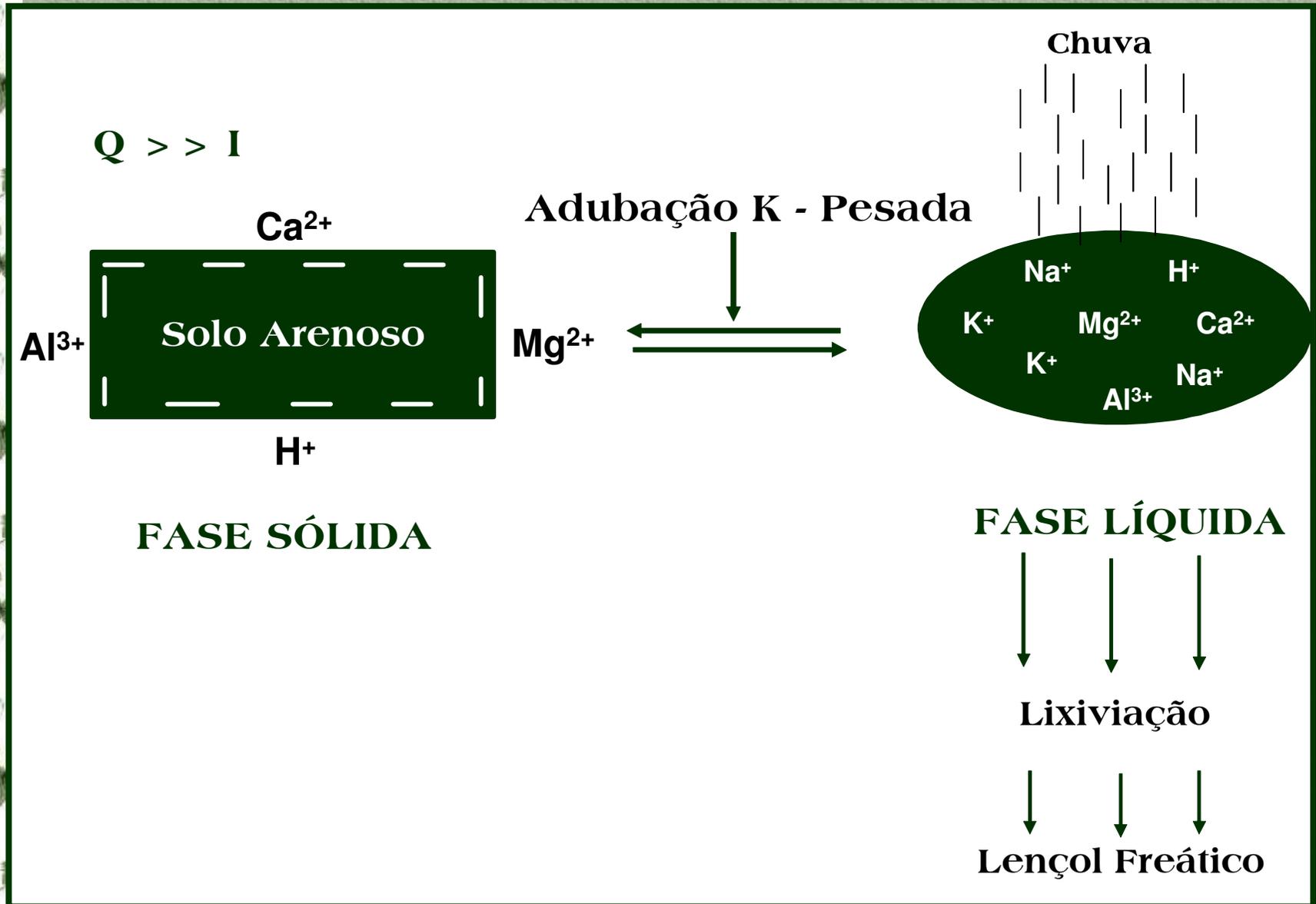


Figura 6. Efeito da textura na disponibilidade de Potássio.

E – pH no Solo:

- . **Influencia na CTC (Cargas dependentes de pH) e na solubilidade → Afeta a disponibilidade dos nutrientes para as plantas:**

↑ pH até 6,0 - 6,5 (Calagem):

- **↑ Solubilidade → K, Ca, Mg, N, P, S, B e Mo**
- **↓ Solubilidade → Fe, Cu, Zn, Mn e Al**

Disponibilidade de nutrientes

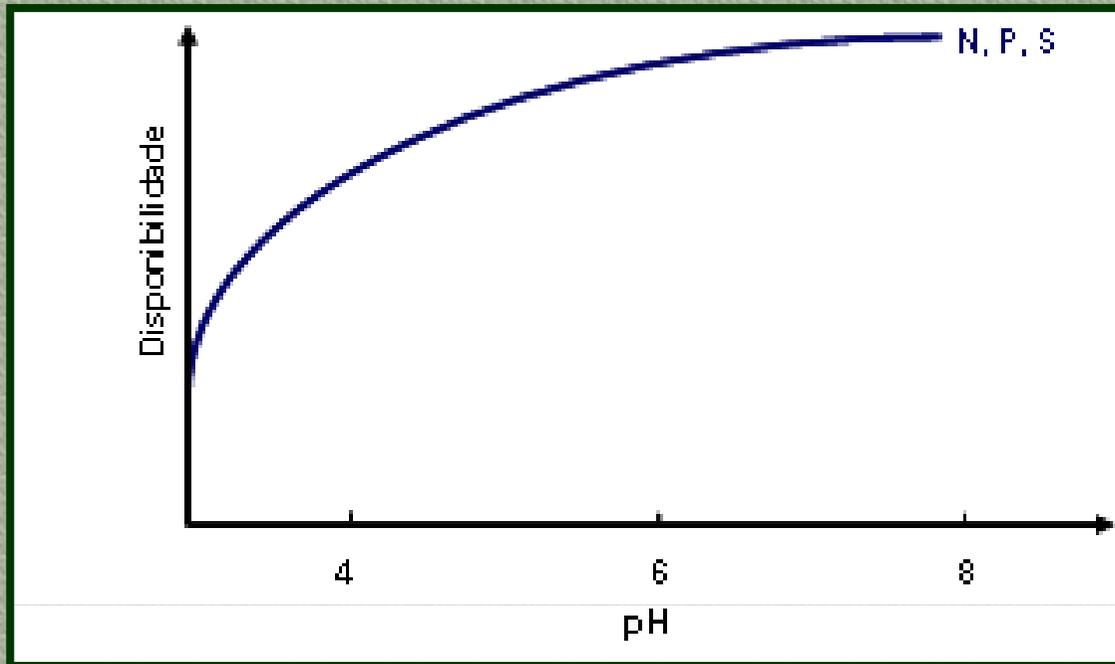
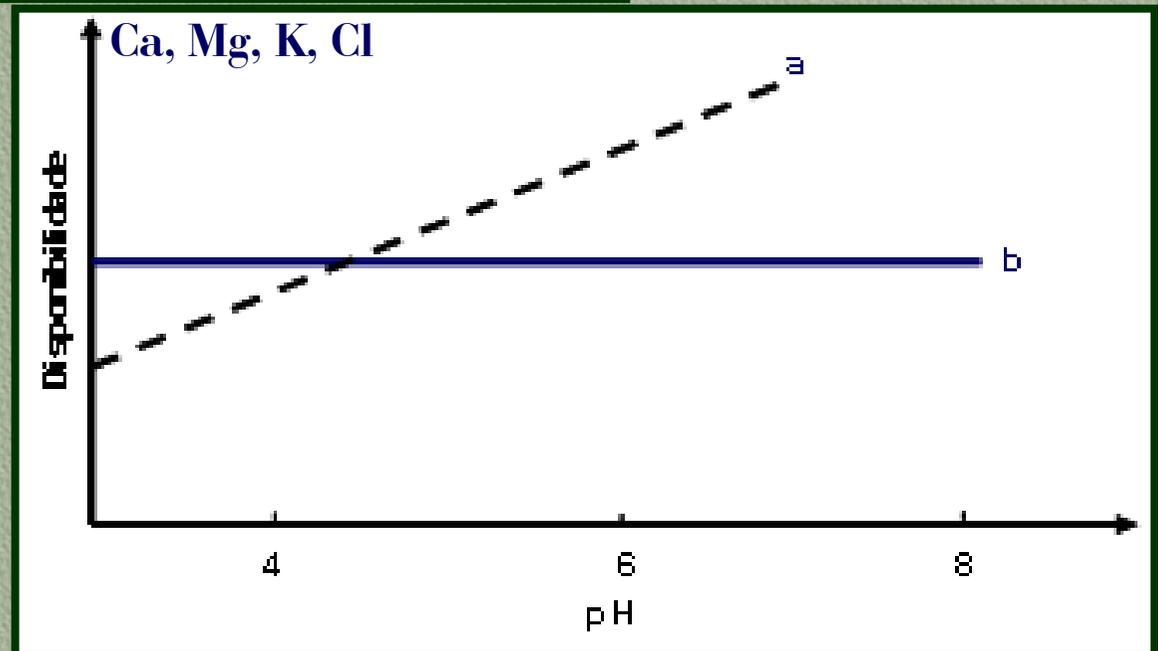


Figura 7. Disponibilidade dos macromutrientes em função do pH.

a → Efeito indireto, com a lixiviação das bases ocorre aumento da acidez e diminuição do pH.

b → Nenhum efeito direto do pH.



Disponibilidade de nutrientes

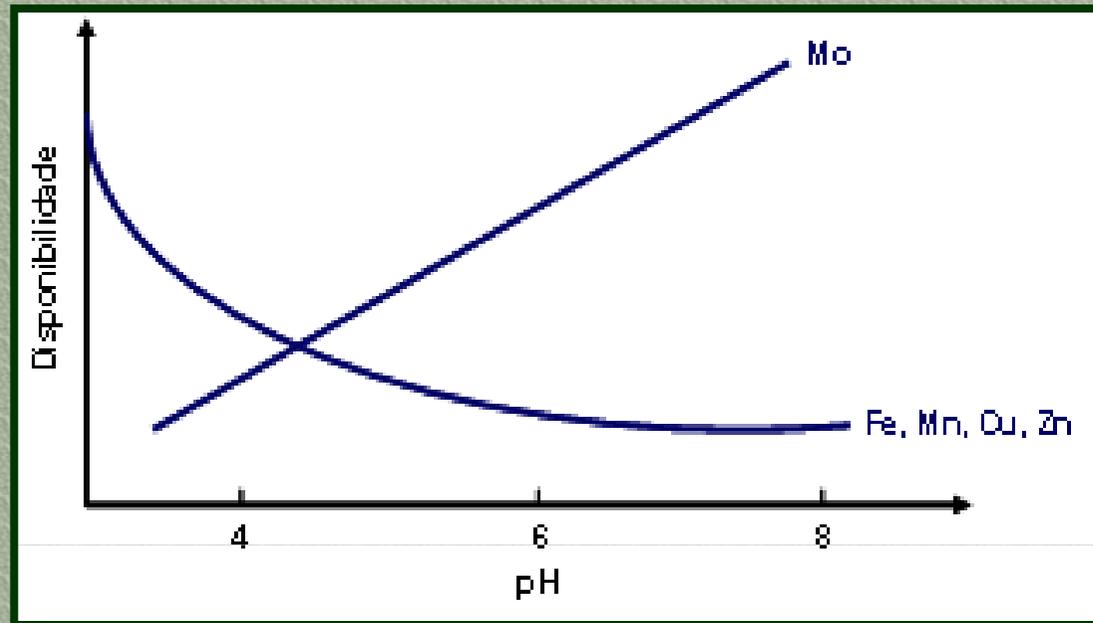
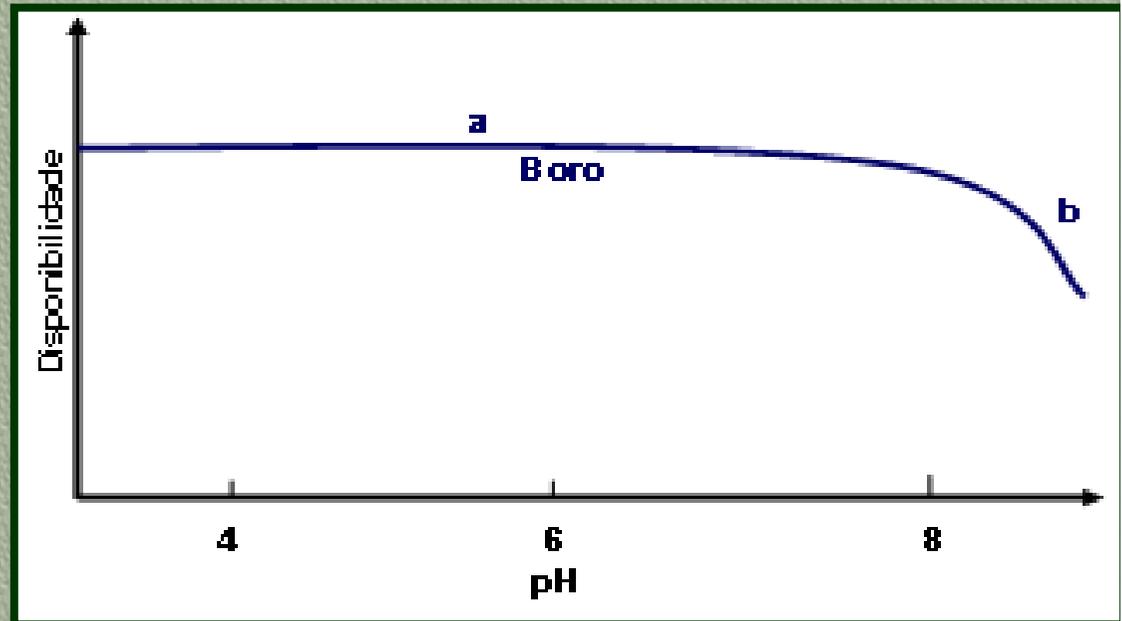


Figura 8. Disponibilidade dos micronutrientes em função do pH.

a → Abaixo de pH 7, há pouco efeito.

b → $\text{pH} > 7$, há decréscimo na solubilidade do "B"



F – Interação entre Íons:

- . Clássica → K x Mg, efeito maior do K reduzindo absorção de Mg;
- . K x Ca → Deficiência de Ca → Reduz absorção de K;
- . P x N → Deficiência de P → Reduz absorção de N.

G – Aeração do Solo:

- . Processo de absorção ativa de nutrientes requer $[O_2]$ adequada no solo;
- . Reações de oxidação → Transformações N no solo;
→ Mineralização M. Orgânica.

H – Umidade:

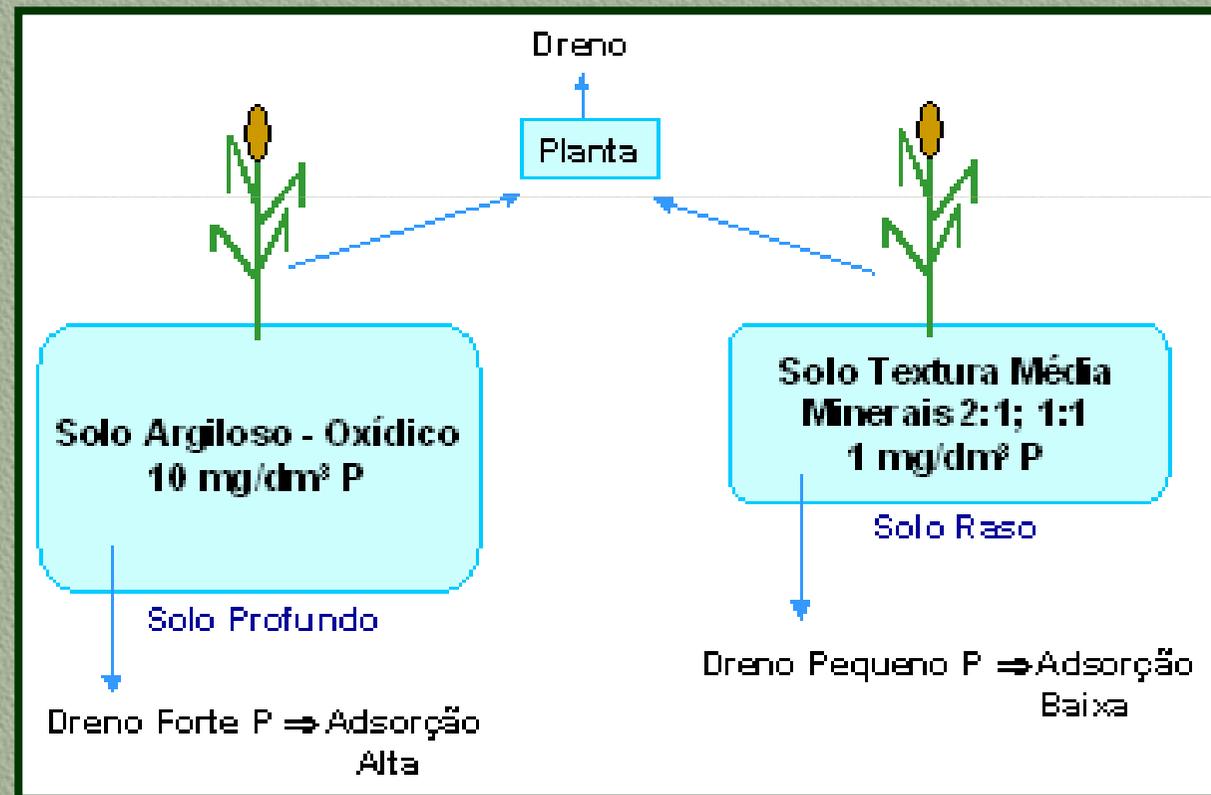
- . Afeta principalmente os nutrientes supridos por difusão e fluxo de massa.
- . Solos com minerais 2:1 → Liberação/Fixação de K.

I – Fatores de Planta:

- . Espécies, variedades, cultivares → Eficiência de absorção diferenciada.

Algumas Considerações Práticas

A – Textura do Solo x Produtividade → Dreno e Fonte:



- . Solo Dreno → [P] 10 vezes maior → Insuficiente;
- . Solo não Dreno → [P] bem menor → Alta produtividade;
- . Nos trópicos → Poucos solos são considerados Fontes → Visa-se reduzir Drenos → Produções econômicas.

4 Relação fertilidade natural, adubação fosfatada, solo-dreno.

Dose de Fósforo (mg/kg)	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO*	LATOSSOLO VERMELHO*
	----- Matéria Seca (g/planta) -----	
0	0,26	0,04
<u>100</u>	15,21	2,34
200	18,87	5,23
<u>400</u>	18,68	12,84

* Classificação Antiga: Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho Escuro, respectivamente.

Areia Quartzosa → Menos Fértil → < Dreno → > Produtividade

- . Rendimentos mais homogêneos no solo Areia Quartzosa. A dose 100 mg/kg P já poderia ser suficiente. A Dose 200 mg/kg P promoveu pequeno incremento e a de 400 mg/kg já seria antieconômica.

Latossolo Vermelho Escuro → É o mais fértil → Mas representa maior dreno para fósforo:

- . Produção significativa só foi alcançada com a dose 400. Não adianta o solo ter melhor fertilidade se por outro lado constitui um dreno violento.
- . Corrigir solos drenos (argilosos, oxídicos, p.exp.) é complicado → Elevado custo de produção.
- . O solo sendo dreno forte → Não adianta nada ter muito P com pouca água.

- Figura 6 a seguir → Mostra que é possível se obter maior resposta, com uso de pequeno nível tecnológico, num Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média (LVm) que num Latossolo Vermelho textura argilosa (LEarg), visto o primeiro não ser um solo-dreno forte.

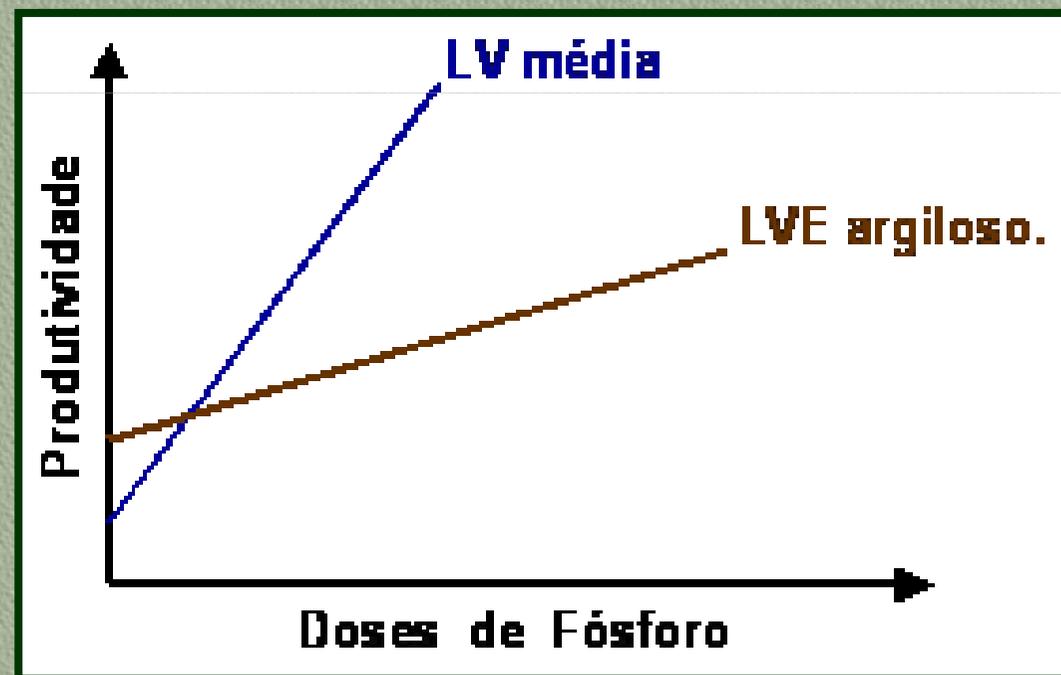
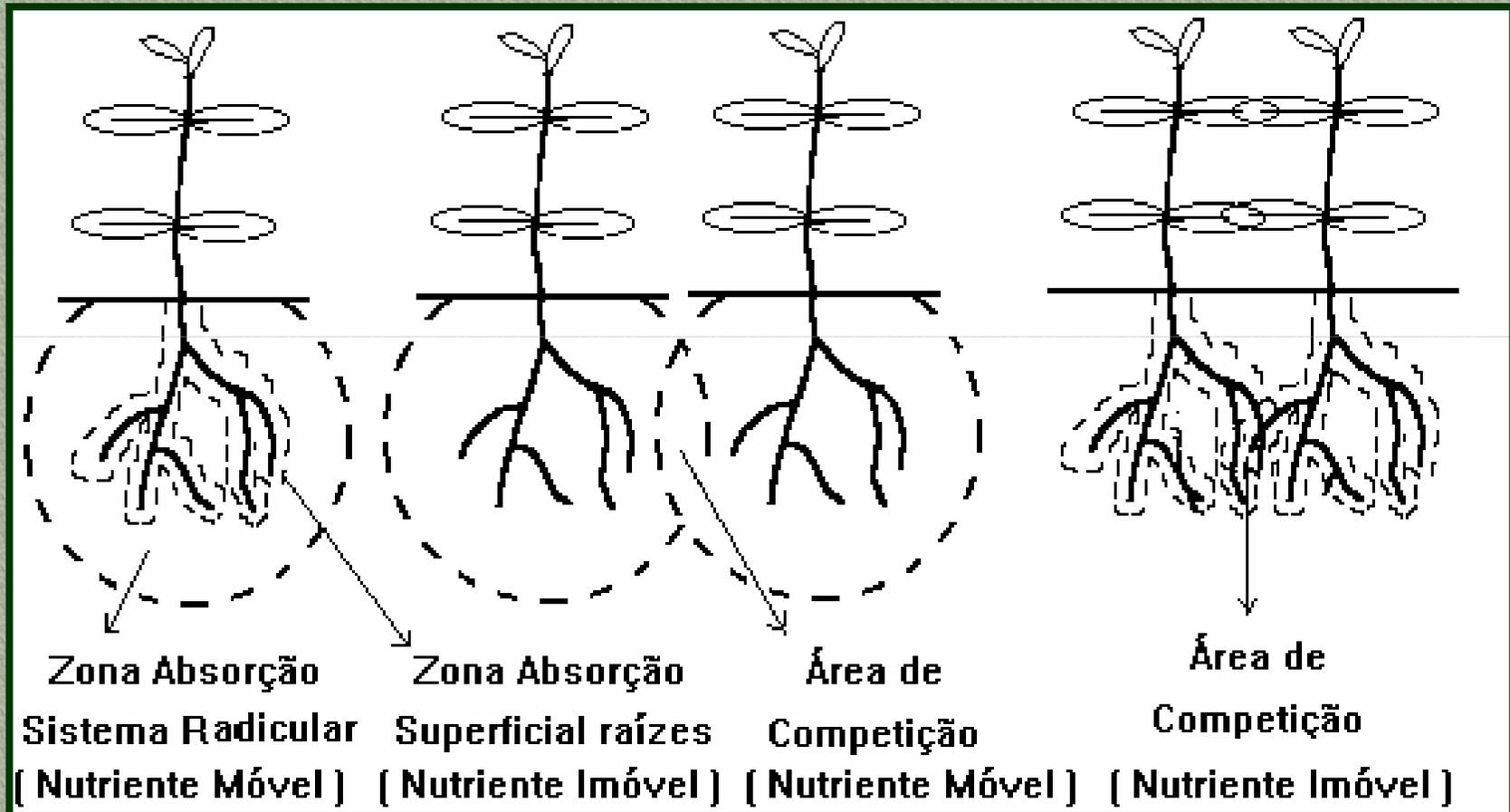


Figura 9. Relação doses de P x Produtividade.

B - População x Níveis de nutrientes x Competição



- **↑ Número de Plantas → ↑ Competição** pelos nutrientes dos elementos **mais móveis** (NO_3^- ; $D = 0,5 \times 10^{-6}$) → **↑** mais a densidade de plantio → **Competição** pelos elementos **menos móveis** (P e Zn)↓. Como se vê praticamente não há competição pelos elementos menos móveis o problema é com os móveis (N e K), já que as raízes ocupam apenas 1% do volume do solo.
- **↑ Demasiadamente a população de plantas → Para os nutrientes imóveis (ou pouco móveis) a zona de competição** será apenas onde as raízes se tocam → Difusão ocorrendo numa faixa muito pequena (1mm) em torno da raiz → para P não seria problema o aumento da densidade de plantio.

. Se adensarmos um certo cultivo → vai requerer muito mais N, em segundo lugar K e o P pode-se deixar praticamente constante.

K → 50 % difusão e 50 % fluxo de massa

P → > 80 % difusão

Conseqüências do Adensamento de Plantas:

- 1. Competição maior se reflete nos elementos mais móveis.**
- 2. Sintomas de deficiências dos elementos imóveis → início do crescimento do milho (difusão não facilitada, poucas raízes).**
- 3. Profundidade de localização do P → Efeito da estiagem é menor. Não faz sentido em região onde há disponibilidade de água ou se usa irrigação.**

4. Boro e Zinco em cafezais:

- . Zn → Problema inicial (difusão) → Depois tende a minimizar com o crescimento da planta (+ raízes → + difusão).

- . B → Problema mais tardio (fluxo de massa) → planta transpira em qualquer idade. Assim:
 - O nível crítico para os elementos imóveis ocorre no início do desenvolvimento das plantas.
 - Com o tempo aumenta raízes, micorrizas → Aumenta a difusão.

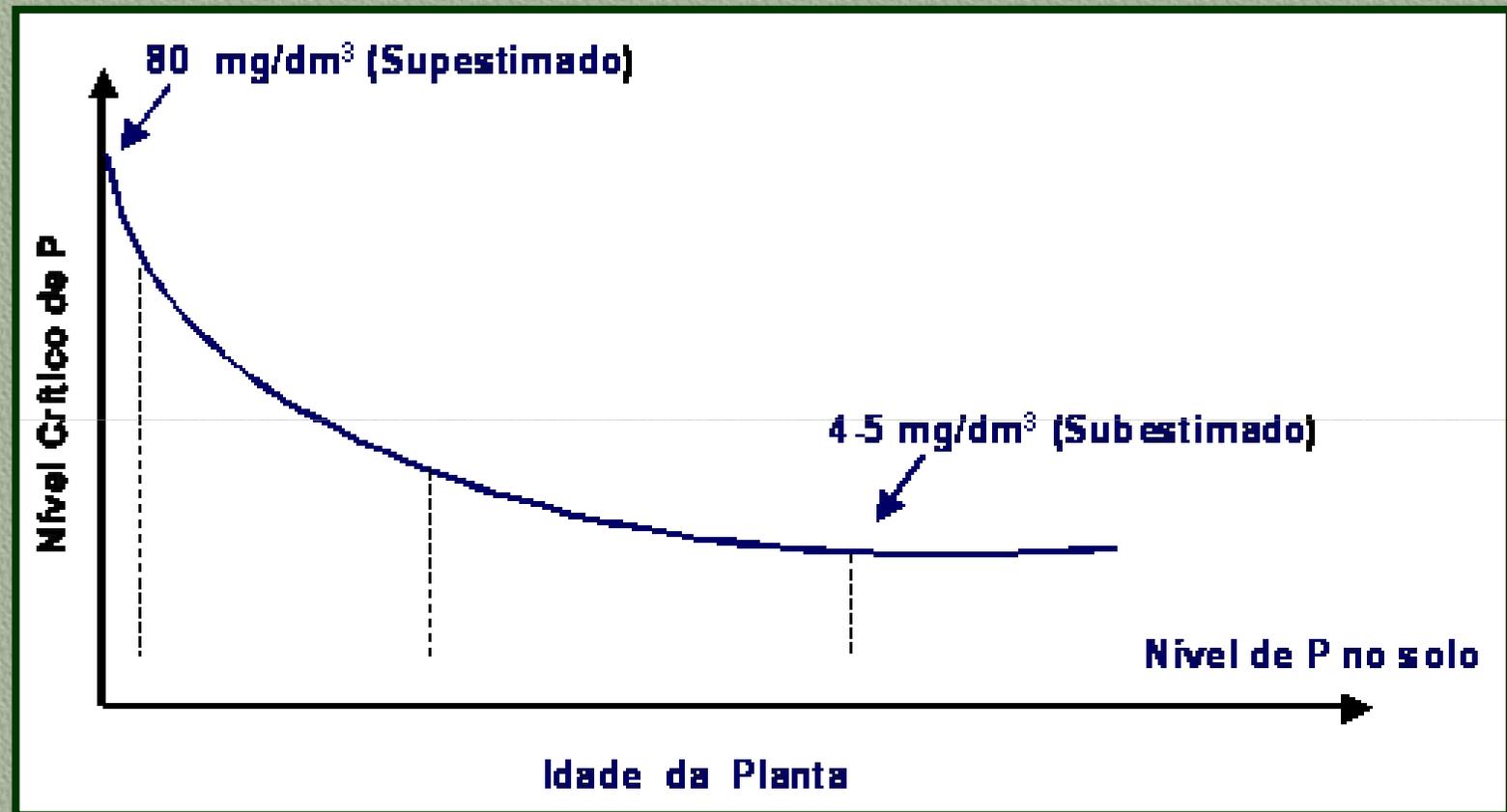


Figura 10. Nível crítico x idade da planta.

. **Nível Crítico (NiCri)** é o teor do nutriente (no solo ou na planta) que:

- a) Permite separar população de solos com alta dos de baixa probabilidade de resposta à adição do nutriente ou,
- b) Corresponde à disponibilidade necessária para obter a máxima eficiência econômica (90 % do \hat{Y} max.) quando os demais fatores de produção encontram-se próximos do ótimo.

Planta Jovem → NiCri na planta é muito alto devido a elevada demanda inicial para constituir estrutura vegetativa/crescimento.

Plantas crescidas em solos arenosos → Nível crítico é maior → as plantas trabalham com folga pois o nutriente (P, K) fica mais na solução.

Obrigado Pela Atenção...

Ribamar Silva