

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE  
QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO

# MACRONUTRIENTE - S

DOCENTE: Dr. Ribamar Silva



## Enxofre -----

### I. Introdução

- . **S** → **Macronutriente secundário;**
- . **Importância atual** → **semenhante a de N e P;**
- . **Deficiência S** → **↑ produções das culturas;**  
**uso de adubos concentrados (SFT).**





## II. Formas de Enxofre no Solo

- . Forma orgânica → M. orgânica (maior reserva);
- . Forma mineral →  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{S}^0$ ,  $\text{S}^{2-}$ ;



### III. Dinâmica do Enxofre no Sistema Solo-Planta

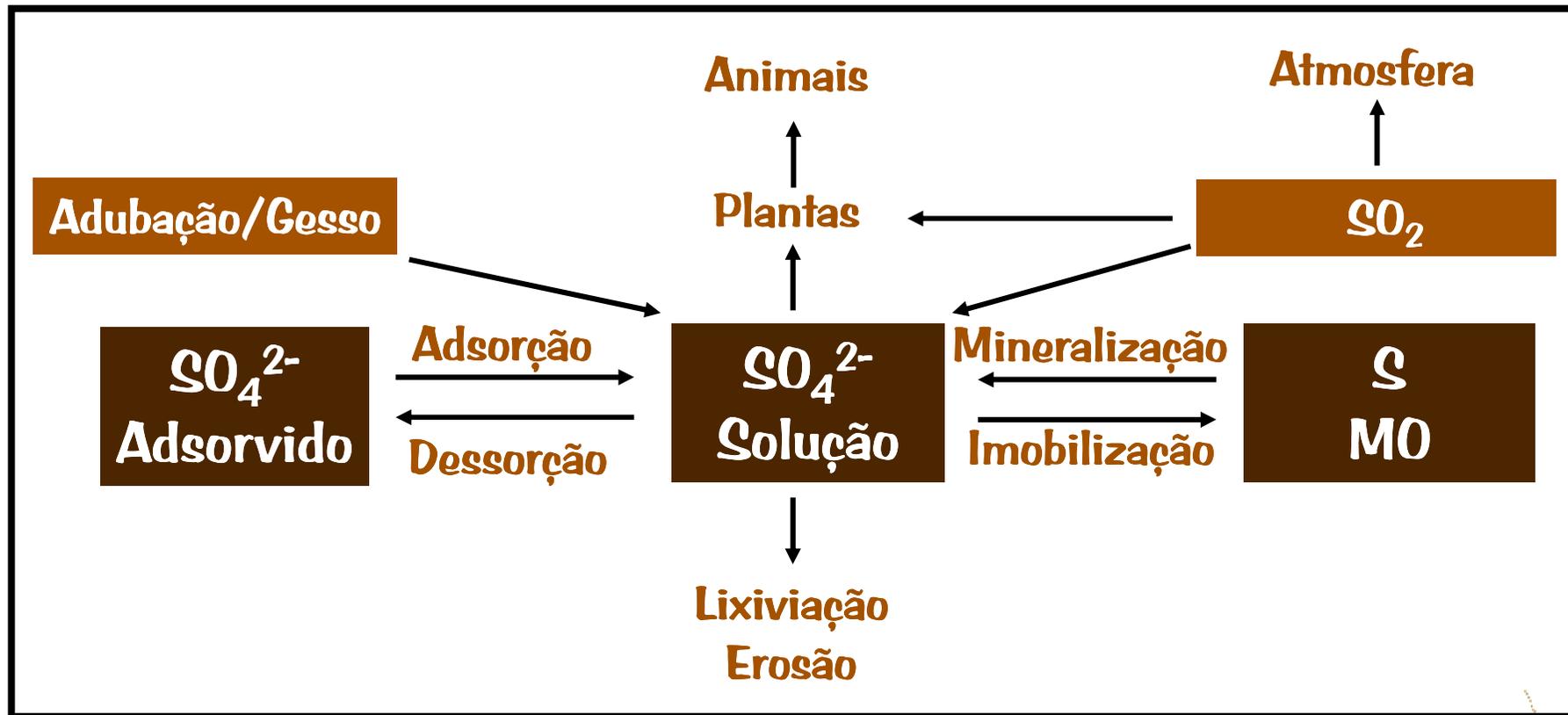


Figura 1. Dinâmica do enxofre no sistema solo-planta



## IV. Índices de Disponibilidade de Enxofre

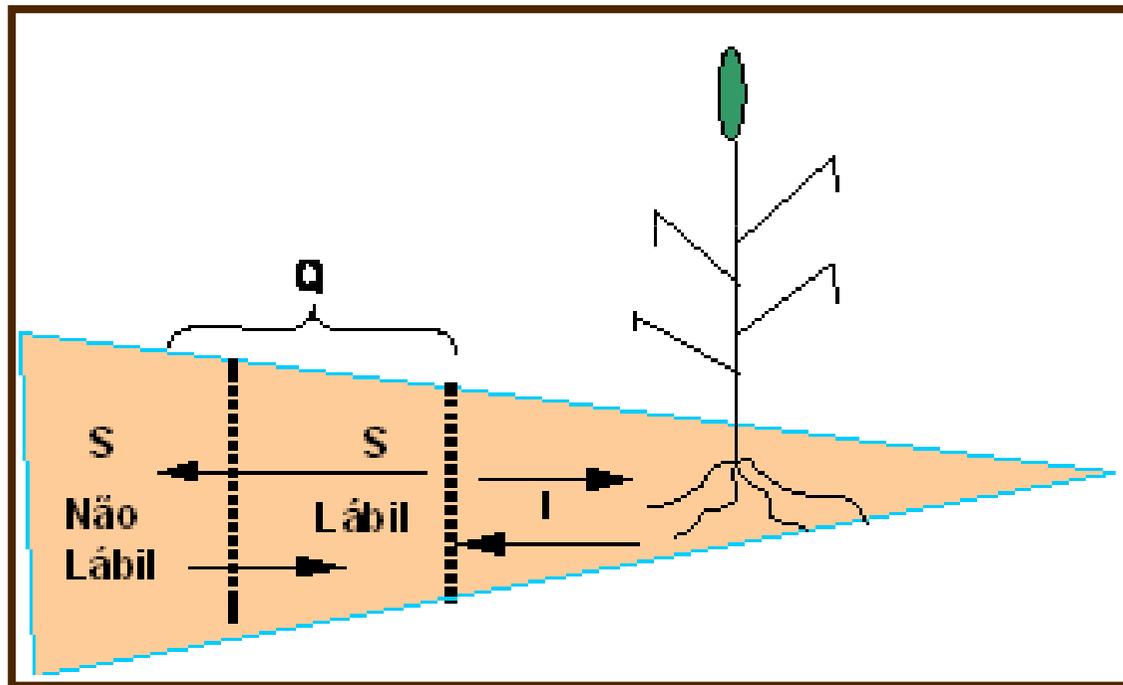


Figura 2. Fatores intensidade (I), Quantidade (Q) e Capacidade Tampão de Enxofre (CTS)





① Fatores Intensidade (I), Quantidade (Q) e Capacidade Tampão (Q/I)

. Fator Intensidade de S (I) →  $[SO_4^{2-}]$  solução:

. Fator Quantidade de S (Q) →  $[SO_4^{2-}]$  adsorvido (reserva lábil)/precipitado que está em equilíbrio com o  $[SO_4^{2-}]$  da solução:

. Fator Capacidade (Q/I) → capacidade do solo de manter inalterada a  $[SO_4^{2-}]$  na solução pelo fator quantidade “Q”.



MACRONUTRIENTE

“Enxofre”



## V. Forma Absorvida pelas Plantas



## VI. Visão Físico-Química da Disponibilidade de Enxofre



# MACRONUTRIENTE

## “Enxofre”

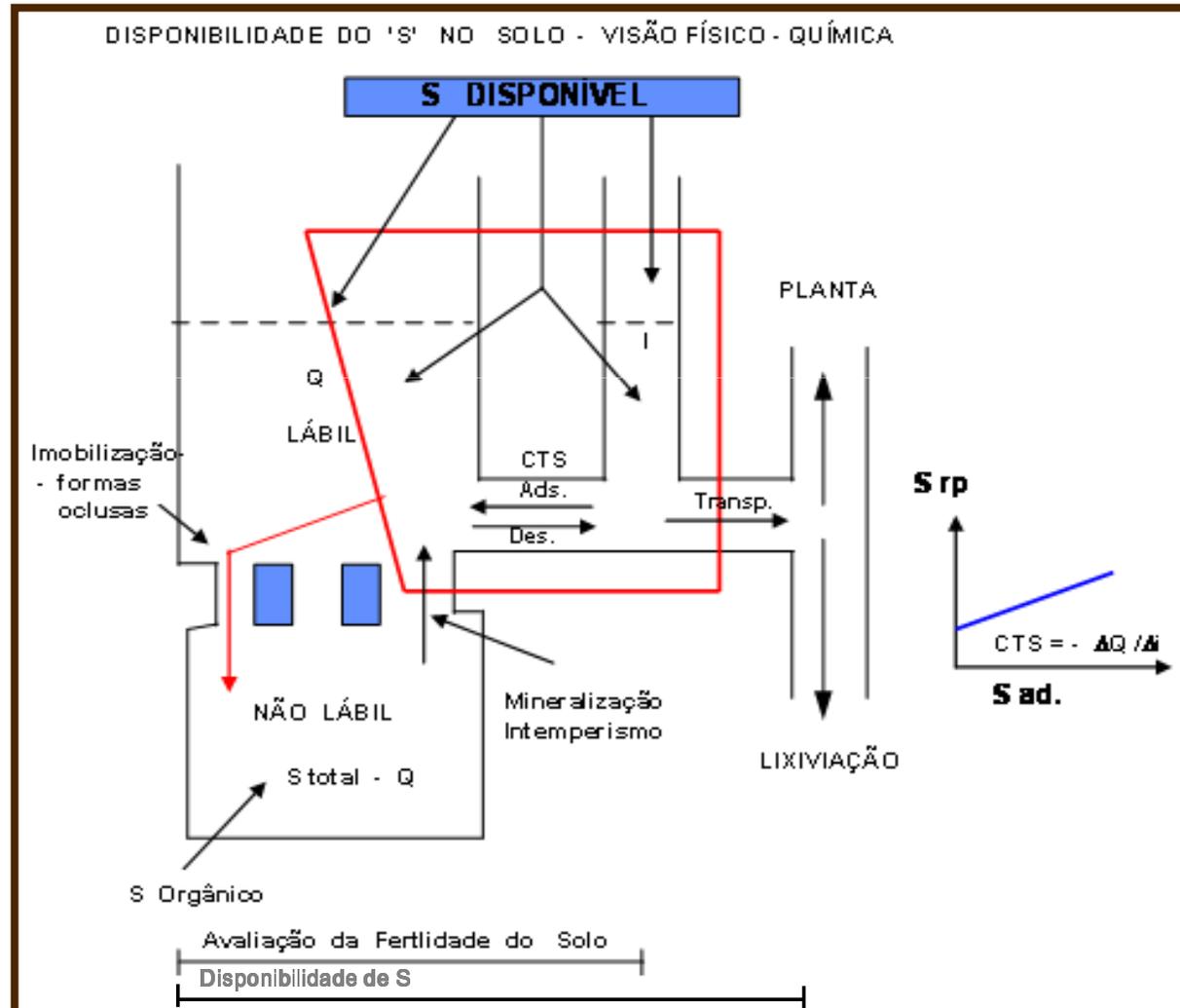


Figura 3. Visão físico-química da disponibilidade de S para as plantas.



MACRONUTRIENTE

“Enxofre”



## VI. Retenção de Enxofre no Solo

**Adsorção de Ânions:**

- . **Adsorção específica (troca de ligantes):**
- . **Adsorção não específica.**



# MACRONUTRIENTE

“Enxofre”

Argila



+ +  
+ +  
+ +  
+ +  
+ +  
+ +



-  
+  
-  
+  
-  
+  
-  
+

⊖ Ânion

Adsorção não específica

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Cl}^- \\ \text{NO}_3^- \end{array} \right.$

Prevista pelas propriedades da dupla camada difusa



**Adsorção Específica:**

- . Ânion entra na esfera de coordenação do íon metálico, com deslocamento de íons OH ou OH<sub>2</sub>, numa reação chamada troca de ligantes.
- . SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> retido com menos energia que o H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> e maior que o NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.
- . Energia de Adsorção:  
$$\text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{MoO}_4^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- \cong \text{NO}_3^-$$



# MACRONUTRIENTE

“Enxofre”

## Adsorção Específica:

- Vai entrar imagem da Laboratório

.  $\text{SO}_4^{2-}$  retido com menos energia que o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e maior que o  $\text{NO}_3^-$ .

. Energia de Adsorção:



## VII. Fatores que Afetam a Adsorção de Sulfato

### ① Natureza da Fração Mineral do Solo

- . Solo → Argilas 2:1 → pouca/nenhuma atração  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ .
- . Solo → Argilas 1:1 e óxidos Fe e Al → adsorção de ânions.

### ② pH do Solo

- . ↑ pH → ↓ adsorção  $\text{SO}_4^{2-}$  → ↑ disponibilidade.
  - ↳ ..↑  $[\text{OH}^-]$  solução → ↑ competição com  $\text{SO}_4^{2-}$  pelos sítios de adsorção.



## MACRONUTRIENTE

“Enxofre”

- . Indiretamente → calagem ↑ disponibilidade de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  → competir também com  $\text{SO}_4^{2-}$ .
- . ↑ pH → melhora as condições favoráveis para atividade microbiana → ↑ taxa de mineralização S-orgânico.

### ③ Concentração de $\text{SO}_4^{2-}$ na Solução do Solo

- . Quanto maior  $[\text{SO}_4^{2-}]$  solução → > adsorção  $\text{SO}_4^{2-}$ .





#### ④ Matéria Orgânica

- M. Orgânica tem dominância de cargas negativas, mais pode adsorver  $\text{SO}_4^{2-}$  nas cargas positivas.

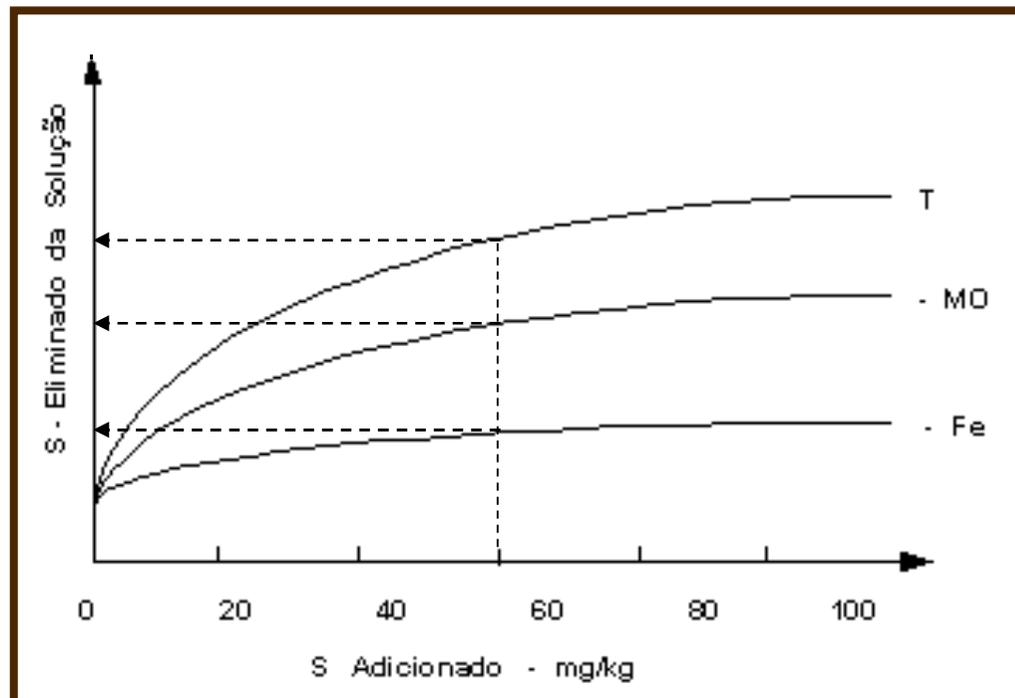


Figura 5. Efeito da eliminação da matéria orgânica e dos óxidos de ferro sobre a adsorção de sulfato.



## MACRONUTRIENTE

“Enxofre”

- . Q<sup>do</sup> se remove a M. O → menor adsorção de  $\text{SO}_4^{2-}$ .
- . Q<sup>do</sup> se remove óxidos-Fe → menor adsorção de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

### 5 Natureza dos Íons Presentes na Solução do Solo

- . Competição pelos sítios de adsorção (+) → adsorção não específica.
- . Adição de ânion fosfato >> Ânion sulfato





## ⑥ Adição de P no Solo

- . Interação  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$   $\times$   $\text{SO}_4^{2-}$  .
- .  $\uparrow$  adição SFS  $\rightarrow$   $\downarrow$  adsorção  $\text{SO}_4^{2-}$   $\rightarrow$   $>$  Perdas por lixiviação.
- . Se planta  $\rightarrow$  sistema radicular mais profundo absorve  $\text{SO}_4^{2-}$  em movimento descendente no perfil.
- . Adsorção preferencial  $\rightarrow$  fosfato  $\gg$  sulfato.



# MACRONUTRIENTE

“Enxofre”

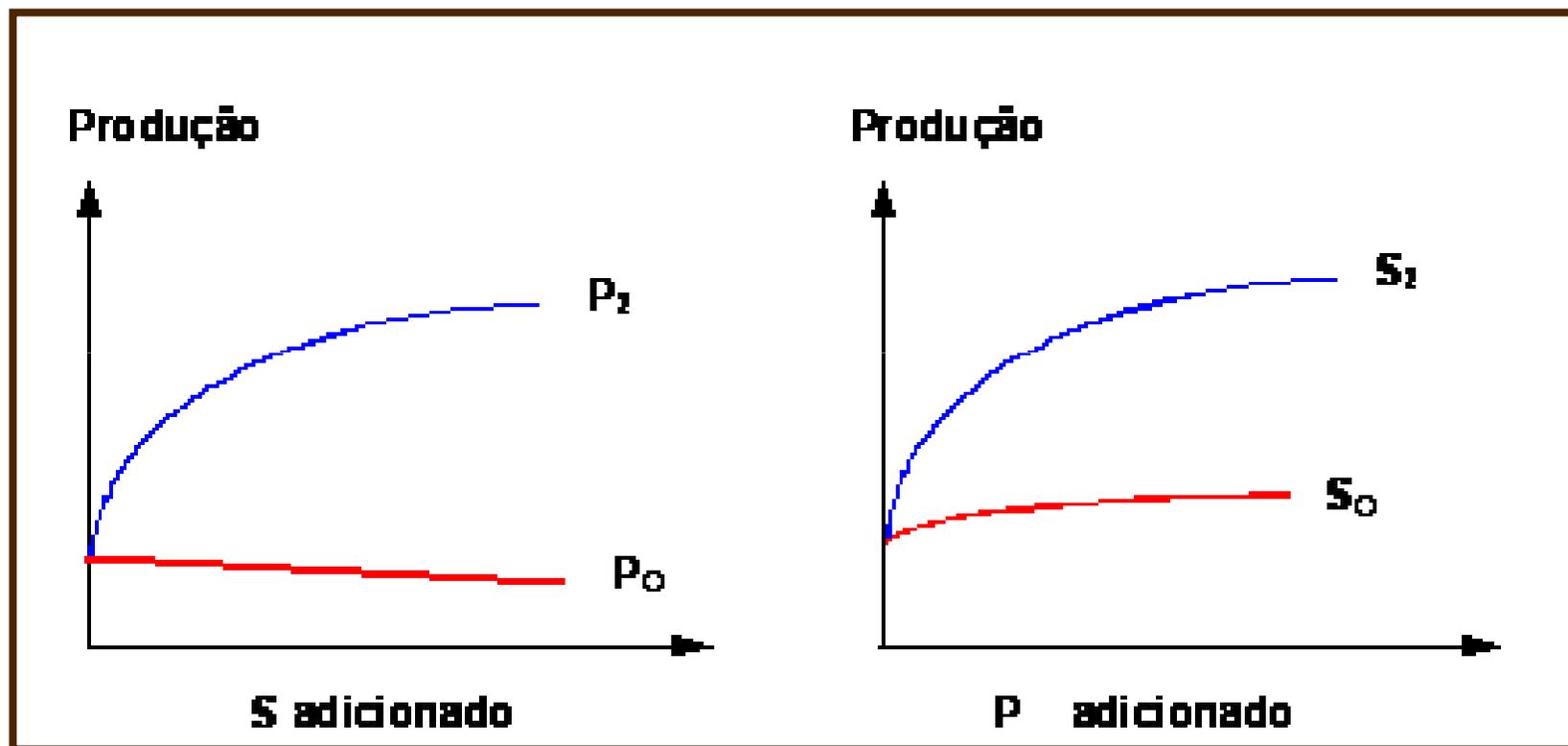


Figura 6. Curvas de resposta à aplicação de S e P ao solo.





## 7 Cátion Saturante nos Colóides do Solo

- Presença de cátions de maior carga na superfície do solo →  
↑ adsorção de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

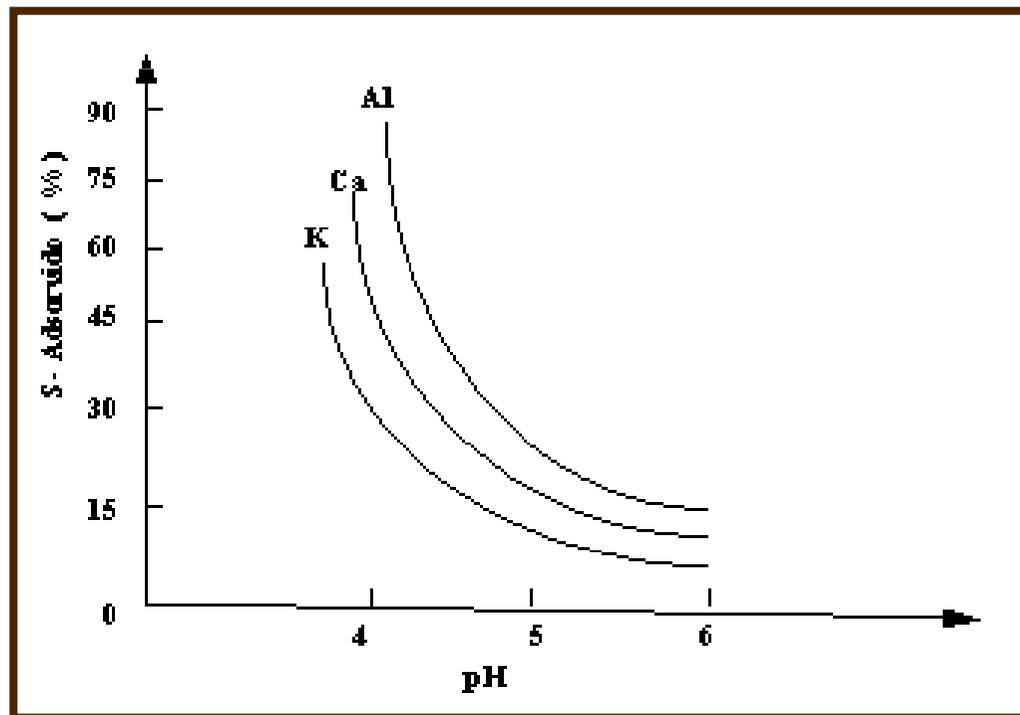
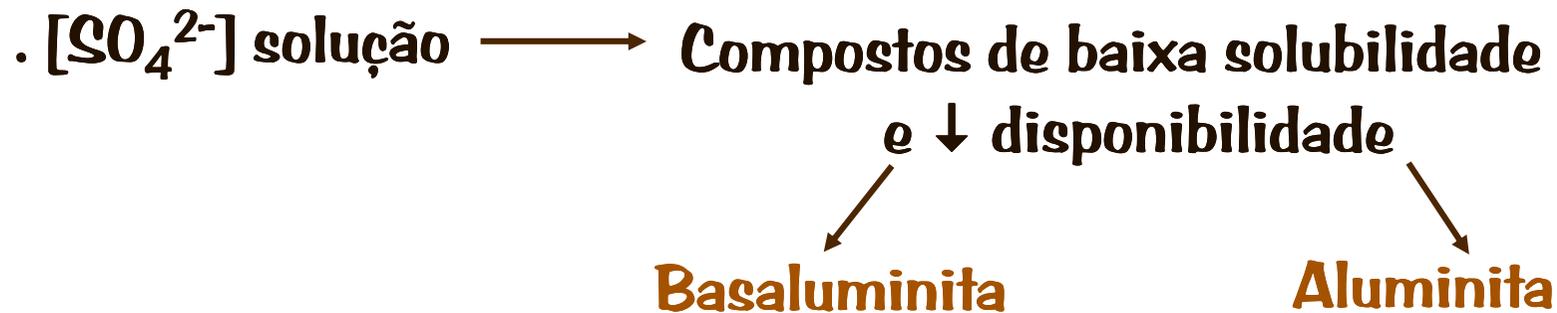


Figura 7. Efeito do pH e do cátion saturante do solo na adsorção de sulfato.

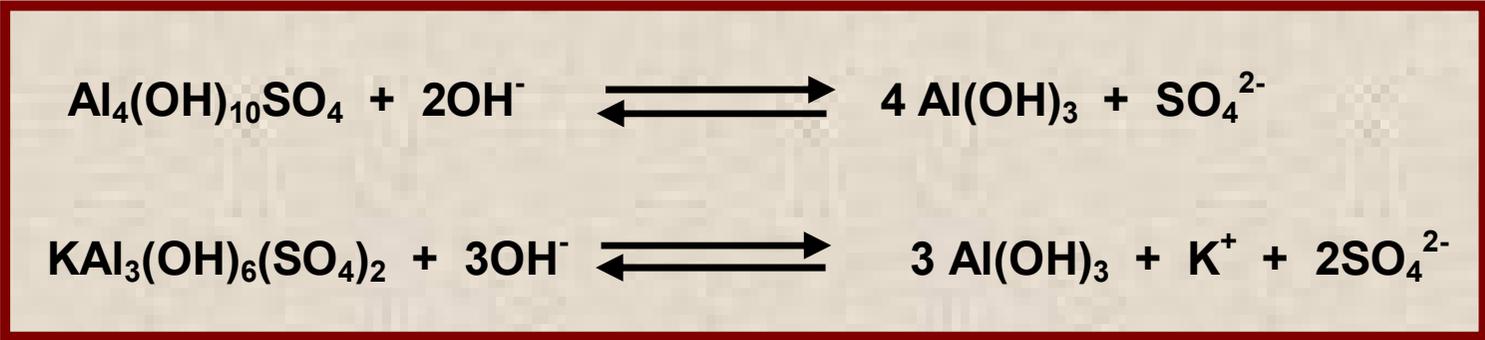




## ⑧ Formação de Complexos de Baixa Solubilidade ou Precipitação



### BASALUMINITA



MACRONUTRIENTE

“Enxofre”

## ⑧ Formação de Complexos de Baixa Solubilidade ou Precipitação

### ALUMINITA



. ↑ pH → ↑ Al(OH)<sub>3</sub> e [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] na solução.





## VIII. Movimentação do S no Perfil do Solo



- . Lixiviação  $\rightarrow$  leva para a subsuperfície  $\rightarrow$  cátion acompanhante  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ .
- . Promove a redução da saturação de alumínio.



## IX. Principais Causas de Deficiência de S no Solo

- . Deficiência induzida → aplicação de doses elevadas de N e P.
- . Solo → clima quente, úmido bem drenado → rápido processo de mineralização de M.O. → libera  $\text{SO}_4^{2-}$  → subsuperfície.
- . Em solos compactados ou com impedimento químico (Al alto) →  $\text{SO}_4^{2-}$  movimentado fora fica fora do alcance das raízes.
- . Área de cerrado → repetidas queimadas → S-cinzas → lixiviação.



## X. Principais Substâncias Contendo Enxofre

- . Sulfato de Amônio: 23 % S e 20 % N.
- . Sulfato de Potássio: 17 - 18 % S e 50 - 52 %  $K_2O$
- . Sulfato de Magnésio: 13 - 14 % S e 16-17 %  $MgO$
- . Gesso Agrícola: 15 - 16 % S e 28-30 %  $CaO$
- . Superfosfato Simples: 12 % S e 20 %  $P_2O_5$
- . Enxofre Elementar: 98 - 99 % S





## XI. Considerações Finais

.XXX.

.XXX.

.XXX..

.XXX..



Obrigado Pela Atenção...

Ribamar Silva