



# ELEMENTOS BENÉFICOS

*Antonio Roque Dechen  
Francisco A. Monteiro  
Quirino A. C. Carmello  
Éllen Cristina A. Anicésio*



# O que são elementos benéficos?

São elementos minerais que estimulam o crescimento dos vegetais, mas que **não são essenciais** ou que **são** essenciais somente para certas espécies ou ainda que são essenciais somente em condições específicas.



# Critérios de essencialidade

- ✓ **Critério 1:** o elemento é essencial se sua deficiência impede que a planta complete o ciclo de vida;
- ✓ **Critério 2:** não pode ser substituído completamente por outro com propriedades similares;
- ✓ **Critério 3:** deve participar diretamente no metabolismo da planta.

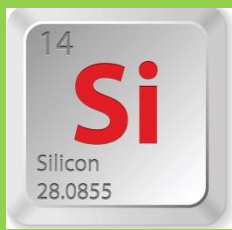
# Quais são os elementos benéficos?

1A	1		2A																	8A	
	1	<b>H</b>																			2
	2	3	4																		10
	3	11	12	Elementos de transição										13	14	15	16	17	18		
	4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
	5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
	6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
	7	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118		
		Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo		
		Frâncio	Rádio		Rutherfordório	Dúbnio	Seabórgio	Bório	Hássio	Meitnério	Ununílio	Ununúnio	Unúmbio	Ununtrio	Ununquádro	Ununpentio	Ununhexio	Ununséptio	Ununóctio		
	* 6	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71					
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
		Lantânio	Cério	Praseodímio	Neodímio	Promécio	Samário	Európio	Gadolínio	Térbio	Disprósio	Hólmio	Érbio	Túlio	Ítérbio	Lutécio					
	** 7	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103					
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw					
		Actínio	Tório	Protactínio	Urânio	Netúnio	Plutônio	Americo	Cúrio	Berquélio	Califórnio	Einsténio	Férmio	Mendelévio	Nobélio	Laurêncio					



# SILÍCIO (Si)

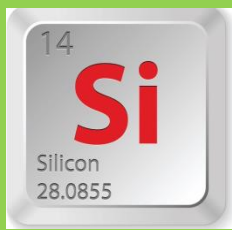




# NO SOLO

- ✓ Segundo elemento mais abundante na crosta terrestre (aproximadamente 28%); minerais: quartzo, opala e cristobalita;
- ✓  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  é resultante da intemperização dos minerais e da decomposição de resíduos vegetais (fitólitos);
- ✓ Na solução do solo: na forma de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , pouco solúvel em água e solubilidade varia com pH;
- ✓ É adsorvido por óxidos de Fe e Al – adsorção específica – aumenta a disponibilidade de P.

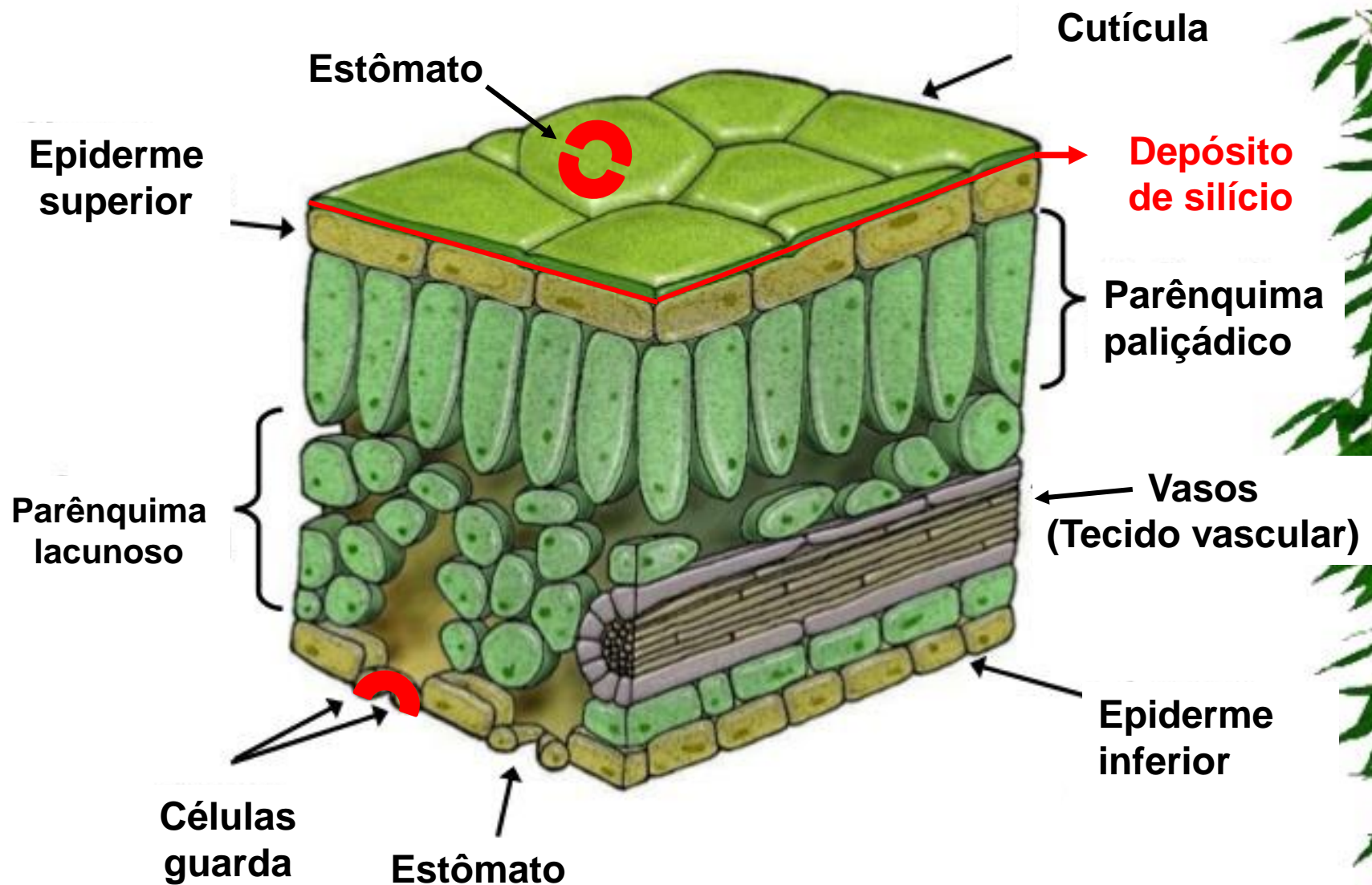
3A	4A	5A
5	6	7
<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>
Boro	Carbono	Nitrogênio
13	14	15
<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>
Alumínio	Silício	Fósforo
24	28	32



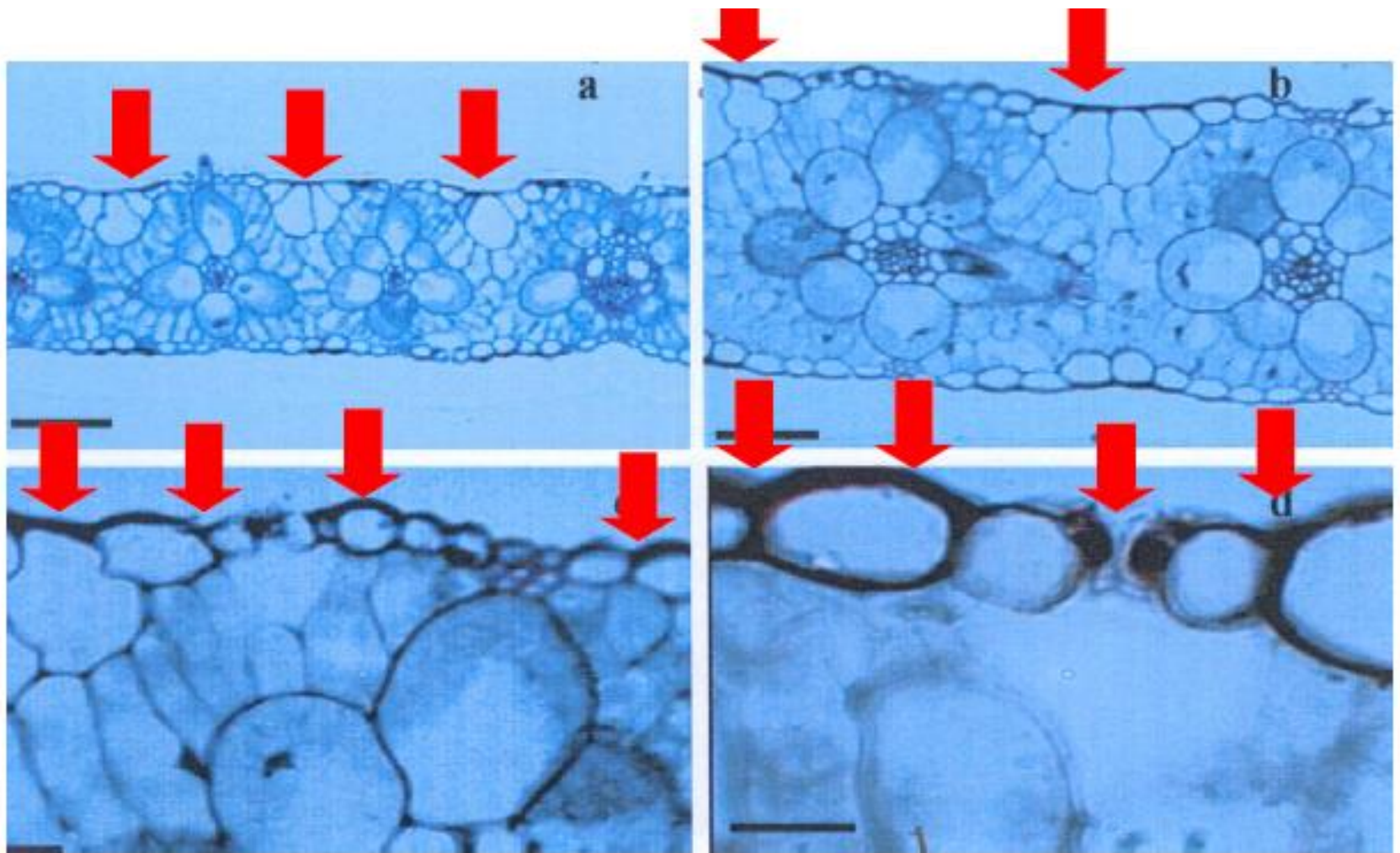
# NAS PLANTAS

- ✓ Absorvido como ácido monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ );
- ✓ Mecanismo de contato íon-raiz: fluxo de massa;
- ✓ No xilema movimenta-se na forma de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ;
- ✓ Distribuição: folhas > caules > raízes;
- ✓ Transporte de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  no interior da planta acontece no mesmo sentido do fluxo da água (transpiração);
- ✓ Deposita-se principalmente na parede celular, nas brácteas das inflorescências, nos tricomas.

# Seção transversal foliar







Seções transversais das folhas recém-expandidas (LR) do capim-Marandu, cultivado em solução nutritiva com dose de Si de  $2,4 \text{ mmol L}^{-1}$ , destacando a superfície adaxial. Barras: (a)  $100\mu\text{m}$ , (b)  $50\mu\text{m}$ , (c)  $10 \mu\text{m}$  e (d)  $10\mu\text{m}$



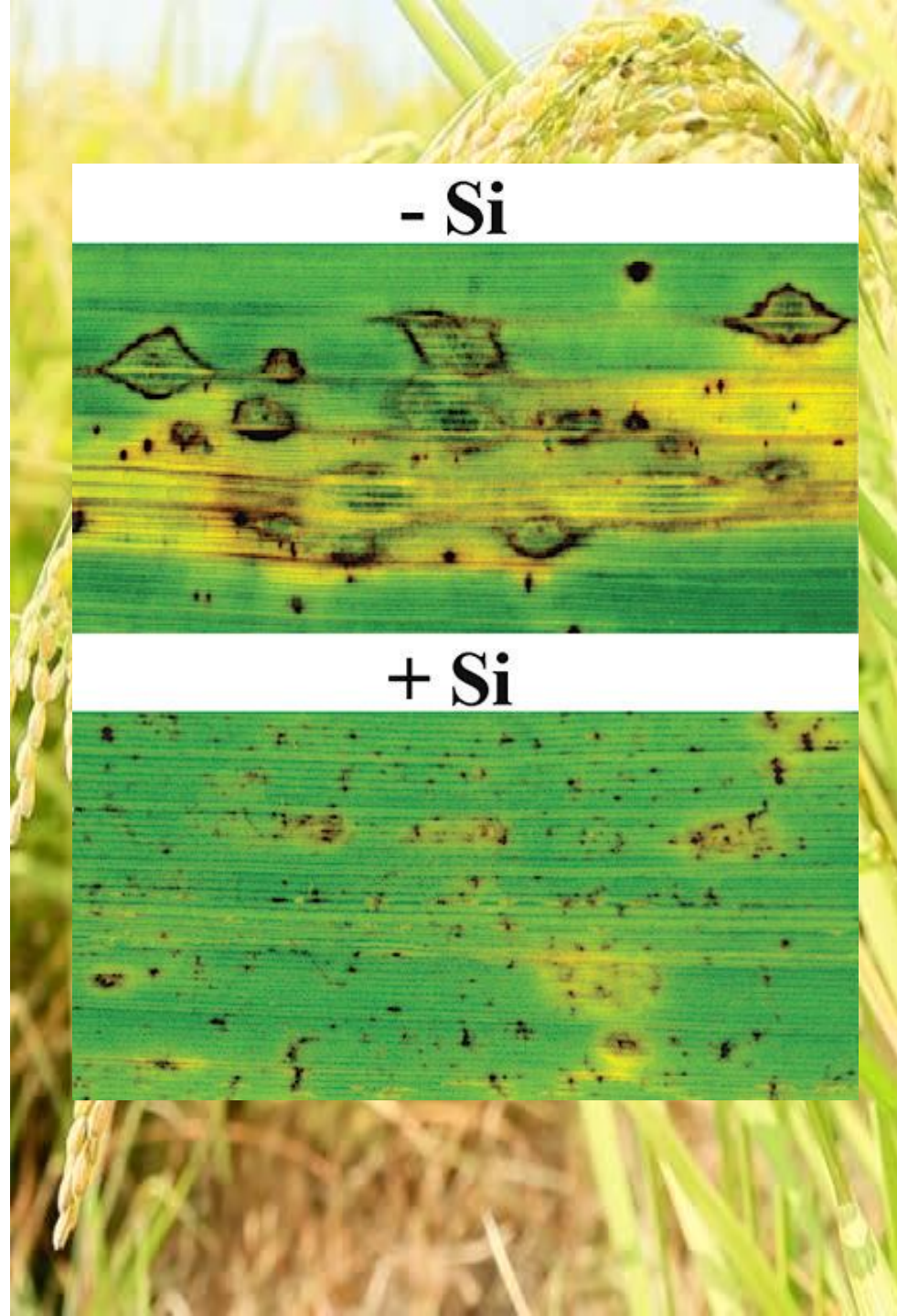
# NAS PLANTAS

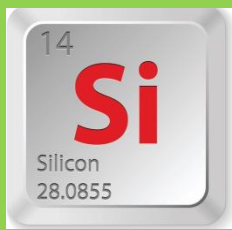
## ➤ Funções estruturais e aumento da resistência das plantas:

- ✓ Proporciona resistência à parede celular
- ✓ Aumenta a resistência às pragas e doenças
- ✓ Melhora a arquitetura das folhas - reduz autossombreamento e acamamento.
- ✓ Maior capacidade fotossintética
- ✓ Regula a evapotranspiração (economia de água)
- ✓ Reduz o efeito tóxico de metais pesados
- ✓ Reduz a taxa de senescência foliar

# Aplicação de silício no arroz resulta em:

- ✓ Maior tolerância ao estresse climático;
- ✓ Redução de perda de água;
- ✓ Aumento da espessura da parede do colmo;
- ✓ Aumento da resistência a brusone;



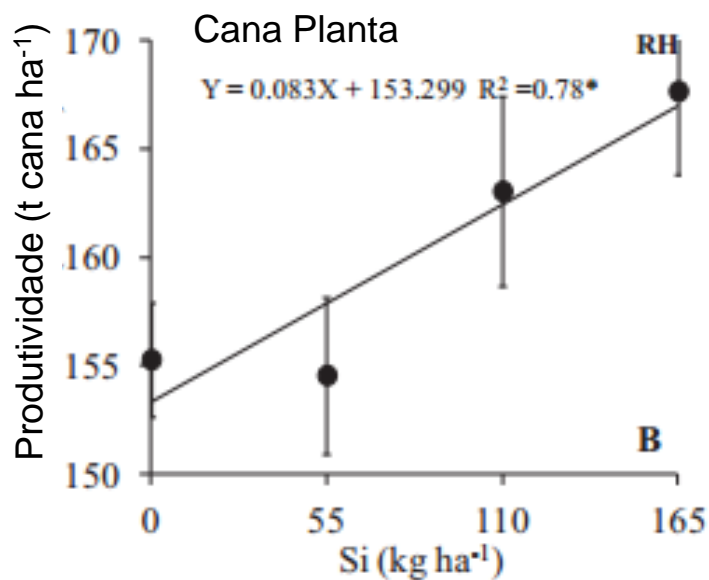


# PLANTAS SILICÓFILAS

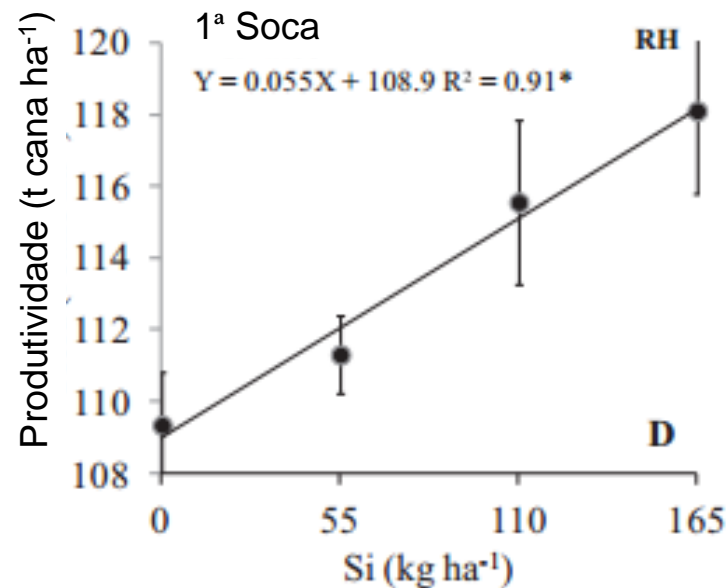
➤ A falta de silício resulta em:

- ✓ Menor crescimento;
- ✓ Menor produção (ARROZ é cultura altamente responsiva ao Si);
- ✓ Necrose em folhas maduras;
- ✓ Murchamento das plantas;
- ✓ Aumento do auto-sombreamento.

# APLICAÇÃO DE SILICATO NA PRODUÇÃO DE CANA DE AÇÚCAR EM SOLO TROPICAL (PIRACICABA – SP)



↑ 13 t ha<sup>-1</sup>



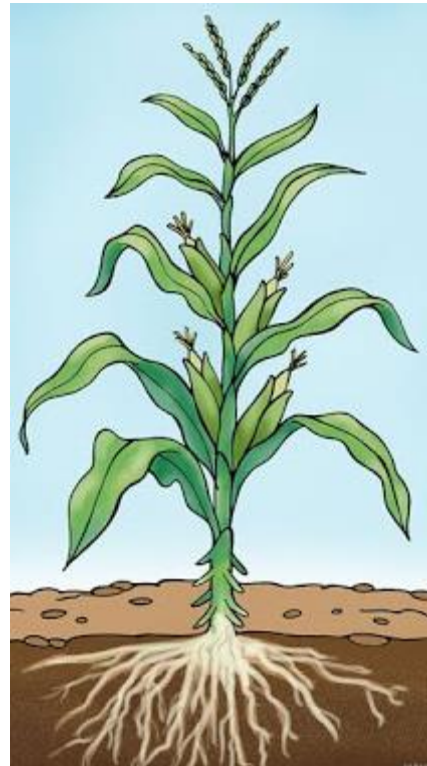
↑ 9 t ha<sup>-1</sup>

# SILÍCIO AMENIZA TOXIDEZ POR METAL

Nas folhas



- Aumento na síntese de clorofila;
- Redução do estresse oxidativo/ Aumento da atividade das enzimas antioxidantes.
- Aumento de biomassa;
- Coprecipitação de Si com metais.



No caule e nos grãos



- Menor concentração de metais;

Na raiz



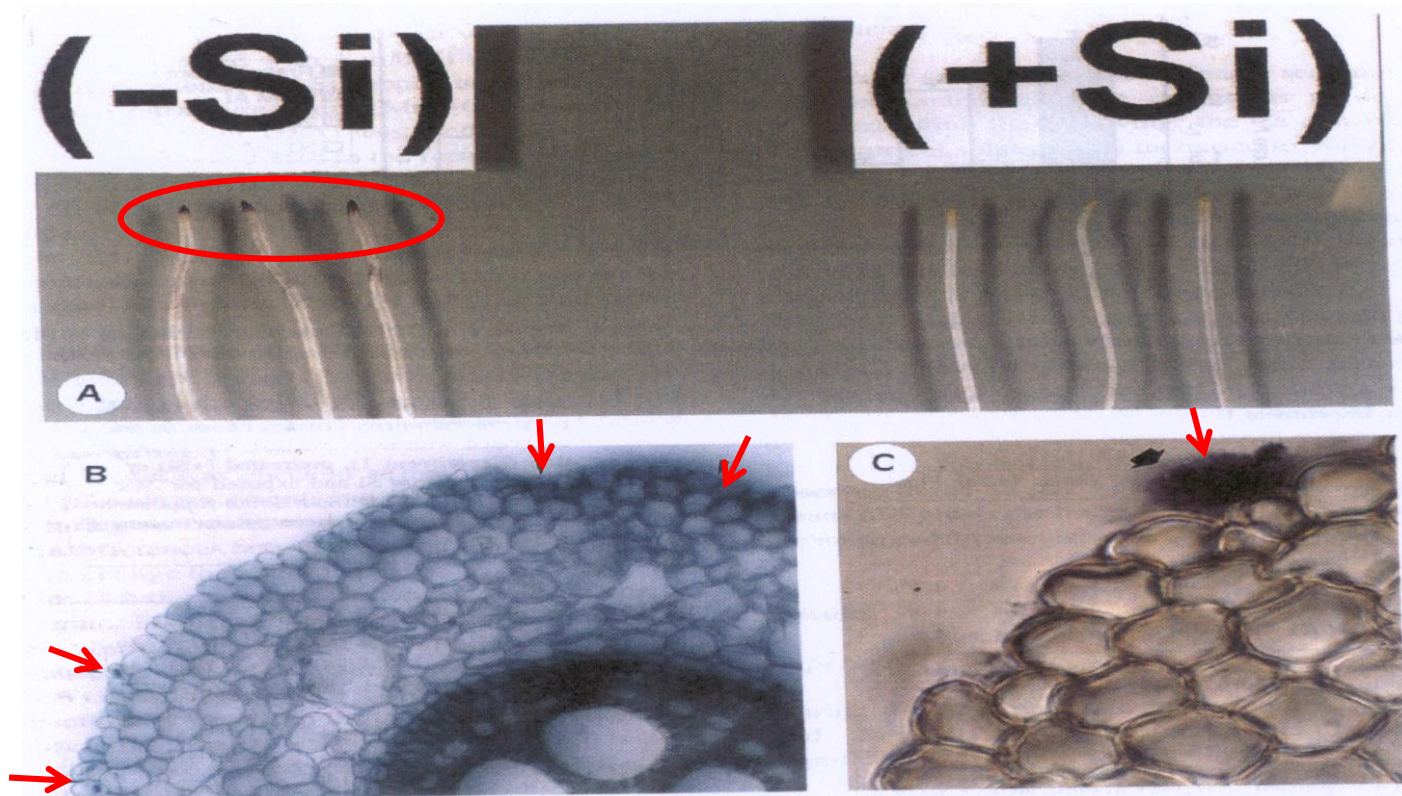
- Reduz a absorção do metal;
- Imobilização no apoplasto;
- Aumento do crescimento e absorção de nutrientes;
- Redução do estresse oxidativo/ Aumento da atividade das enzimas antioxidantes.

No solo



- Aumento no pH do solo
- Formação de compostos inertes na solução do solo.

# INFLUÊNCIA DO SILÍCIO NA REDUÇÃO DO EFEITO TÓXICO DE ALUMÍNIO EM RAÍZES DE MILHO



**A:** pontos de estrangulamento nos ápices radiculares, causados pela toxicidade de Al.

**B:** pontos de estrangulamento - regiões depressivas e escuras.

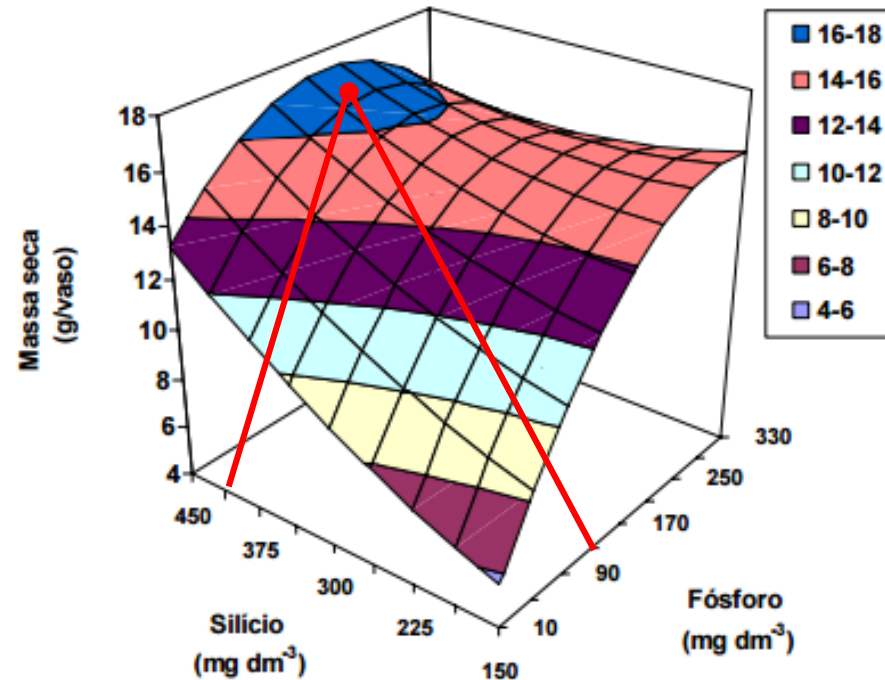
**+Si:** reduz o efeito da toxicidade do Al nas raízes / **-Si:** a região meristemática da ponta da raiz mostra número alto de células com dois núcleos (paralisação do processo de divisão celular)

# SILÍCIO MODIFICA ANATOMIA RADICULAR DE PLANTAS DE MILHO NA PRESENÇA DE CÁDMIO





# RELAÇÃO SILICATO x FOSFATO EM GRAMÍNEA TROPICAL



$$Y = 3,1821 + 0,007308*Si + 0,08589*P + 0,000031*Si*Si - 0,000086*P*Si - 0,00012*P*P$$

$$R^2 = 0,72$$

- Combinações de P e Si no solo
- Dose média de P (90 mg dm<sup>-3</sup>) e alta de Si (450 mg dm<sup>-3</sup>): maior produção de MS - substituição do fosfato pelo silicato no solo – maior disponibilidade de P

(Melo, 2005)



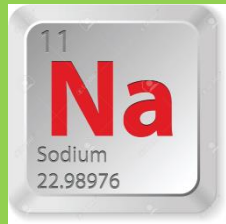
# PRINCIPAIS FONTES DE Si

- ✓ Termofosfatos magnesianos (Yoorin) - 23%  $\text{SiO}_2$
- ✓ Wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) - 52%  $\text{SiO}_2$
- ✓ Sílica - 97%  $\text{SiO}_2$
- ✓ Silicatos de cálcio e magnésio - 14%  $\text{SiO}_2$
- ✓ Silicato de potássio - 26%  $\text{SiO}_2$
- ✓ Escórias de siderurgia - 20%  $\text{SiO}_2$
- ✓ Bagaço de cana - 78%  $\text{SiO}_2$
- ✓ Casca de arroz - 14,5%  $\text{SiO}_2$



# SÓDIO (Na)

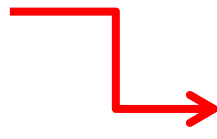


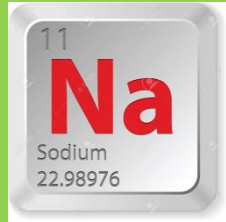


# NO SOLO

- ✓ Cátion monovalente ( $\text{Na}^+$ )
- ✓ Comportamento similar ao do potássio ( $\text{K}^+$ )
- ✓ Removido do solo por lixiviação
- ✓ Em geral, em solos de clima úmido, há menos  $\text{Na}^+$  do que  $\text{K}^+$
- ✓ Regiões semi-áridas podem acumular Na no solo na forma de sais: cloreto, sulfato e carbonato

	1A		
	1		
1	<b>H</b> Hidrogênio		2A
	3		4
2	<b>Li</b> Lítio		<b>Be</b> Berílio
	11		12
3	<b>Na</b> Sódio		<b>Mg</b> Magnésio
	19		20
4	<b>K</b> Potássio		<b>Ca</b> Cálcio

 baixa precipitação pluvial + alta evaporação

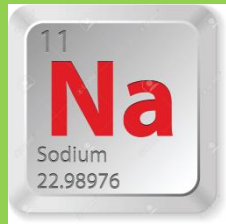


# NAS PLANTAS

- ✓ Absorvido como  $\text{Na}^+$ ;
- ✓ Mecanismo de contato íon-raiz: fluxo de massa e difusão;
- ✓ No xilema e no floema movimentam-se na forma de  $\text{Na}^+$ ;
- ✓ Distribuição: raízes > caules > folhas;
- ✓ Nas halófitas a distribuição é mais uniforme.

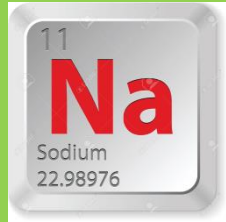


Alto requerimento de sais para ajustamento osmótico



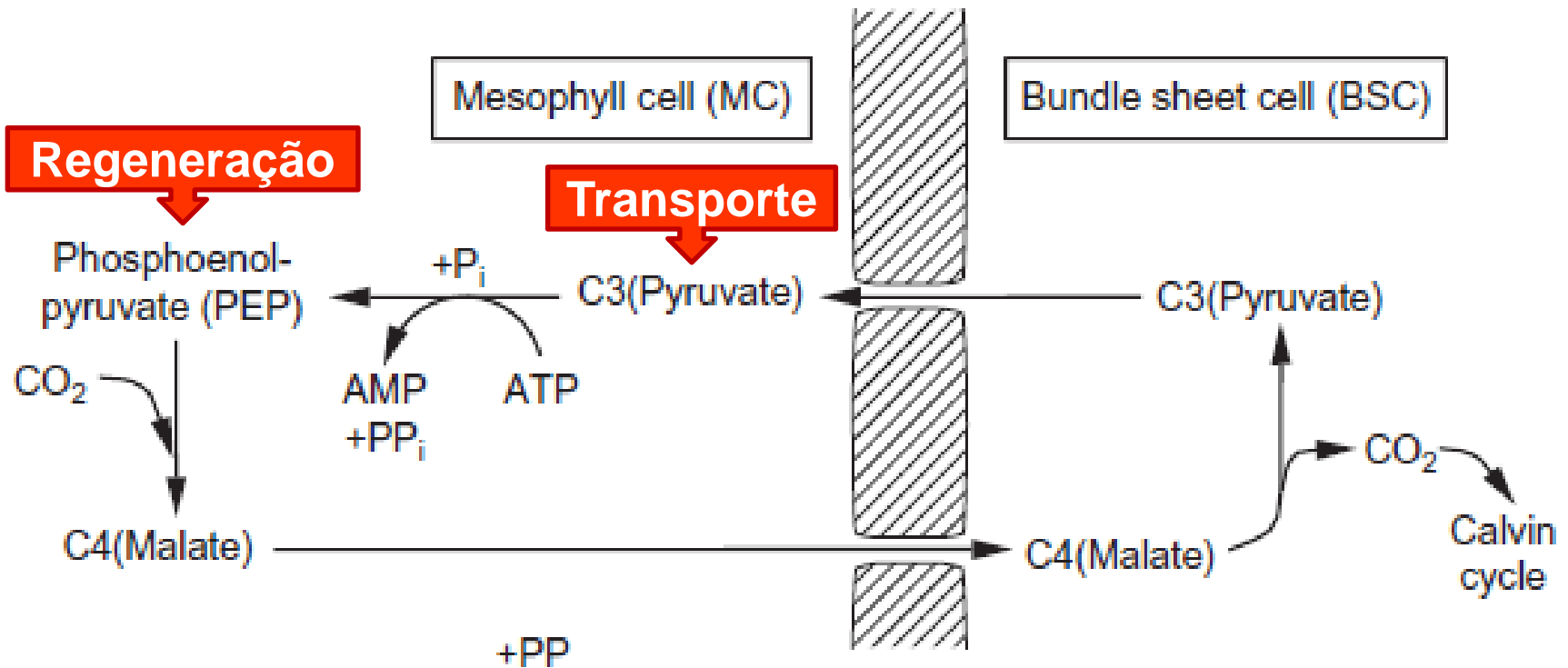
# NAS PLANTAS

- ✓ Plantas  $C_4$  respondem mais à adição de Na do que  $C_3$
  - ✓ Abertura estomatal
  - ✓ Ativador de algumas enzimas
  - ✓ Manutenção do balanço de água
  - ✓ Estimula o crescimento vegetal
- Substituição parcial do K

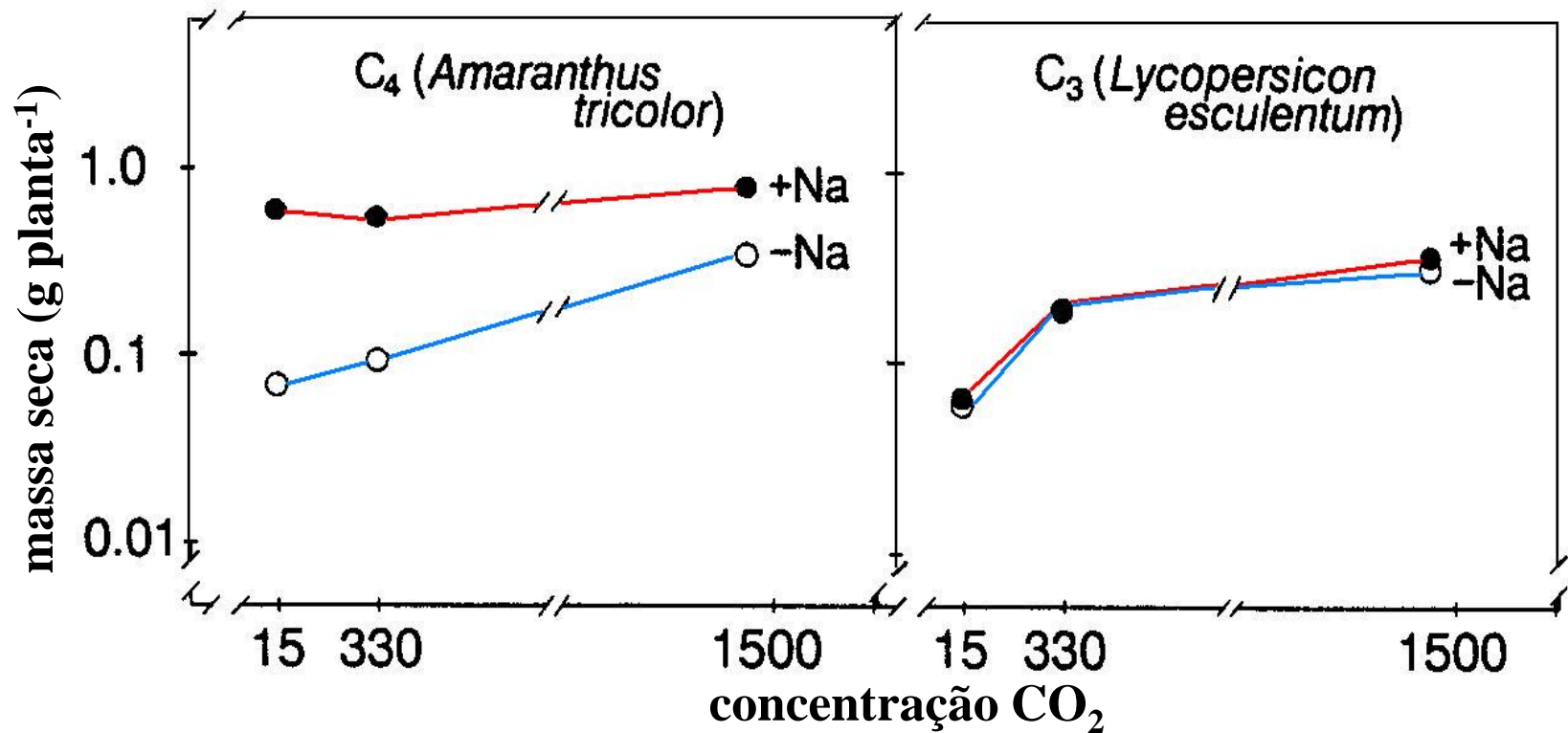


# NAS PLANTAS

## Papel do sódio em plantas C4

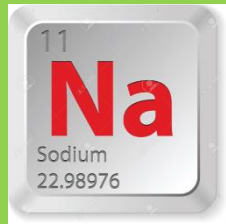


Resposta no crescimento de plantas C<sub>4</sub> e C<sub>3</sub> à adição de Na e aumento na concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente



Não ocorre para todas as plantas C<sub>4</sub>  
**Natofílicas x Natofóbicas**

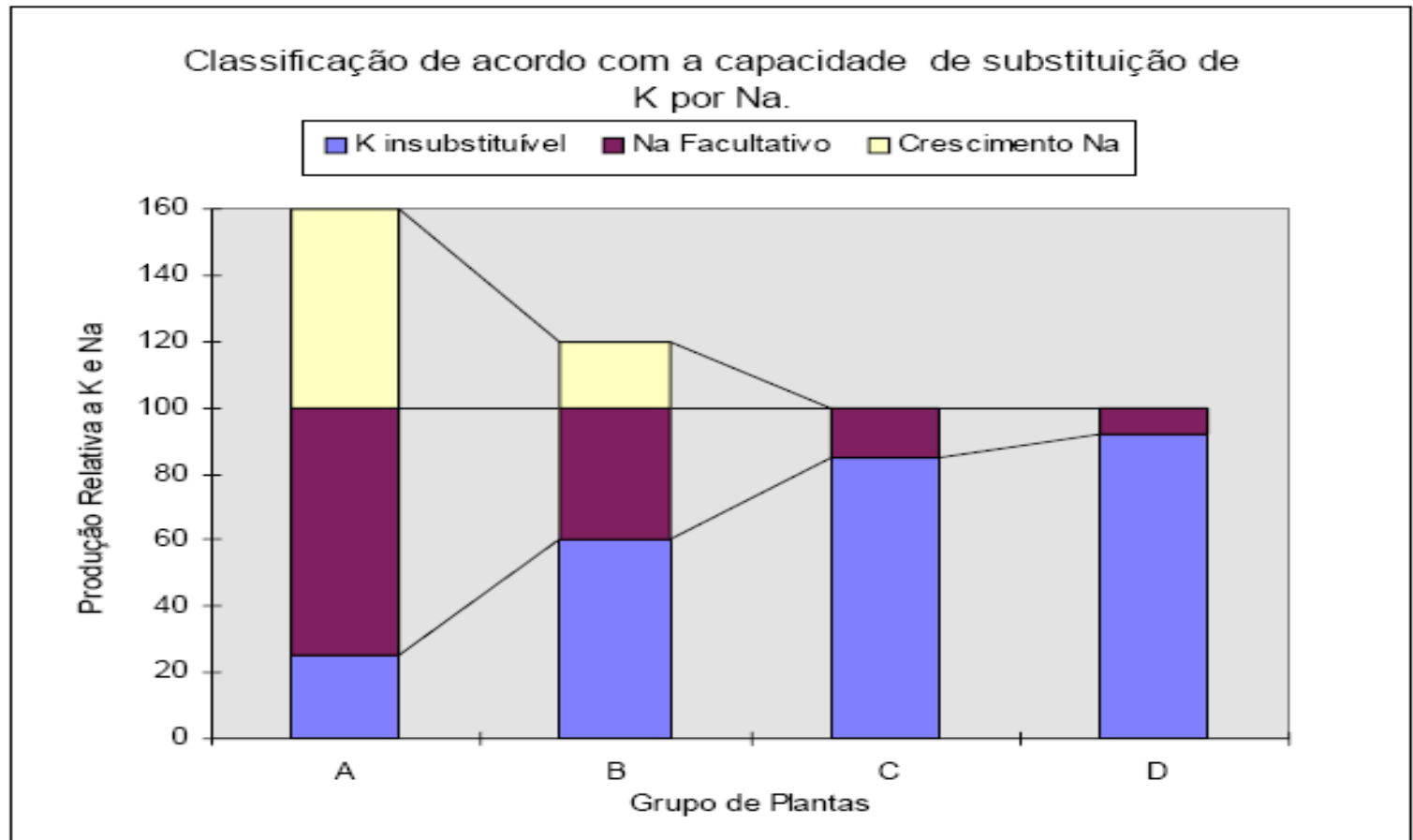




# NAS PLANTAS

## Substituição PARCIAL do potássio pelo sódio

- ✓ Algumas reações enzimáticas;
- ✓ Contribuição ao potencial de soluto (turgor celular);
- ✓ A proporção em que o Na pode substituir o K varia entre espécies, variedades e mesmo órgãos da planta;



Natrofílica

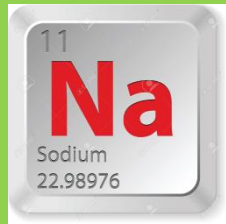
Natrofóbica

**Aveia**  
**Beterraba**  
**Mostarda**  
**Gramínea C<sub>4</sub>**

**Algodão**  
**Repolho**  
**Couve**  
**Trigo**

**Cevada**  
**Milheto**  
**Arroz**  
**Batata**

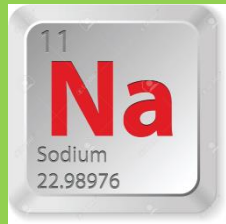
**Milho**  
**Centeio**  
**Soja**  
**Feijão**



# NAS PLANTAS

## Estimula o crescimento vegetal

- ✓ Expansão celular e balanço de água;
- ✓ Regulação estomática;
- ✓ Maior área foliar – maior número de estômatos por unidade de área foliar – decréscimo na concentração de clorofila.



# EXCESSO DE SÓDIO

- ✓ Nos solos proporciona dispersão de argila → menor porosidade e permeabilidade do solo
- ✓ Solos salinos/sódicos a atividade agrícola é prejudicada
- ✓ Nas plantas com excesso de Na aparecem áreas necróticas nas pontas, margens e regiões internervais das folhas
- ✓ Em condições moderadamente salinas, as plantas conseguem sintetizar solutos orgânicos, que diminuem o potencial da água das células, o que poderá resultar em alguma absorção adicional de água

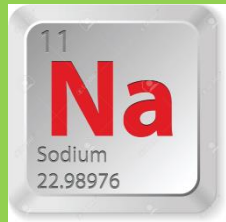
# Adaptação das plantas ao excesso de sais



**GLÂNDULAS  
SALINAS**



**FACE SÚPERIOR (ADAXIAL) DA FOLHA**



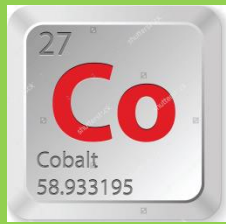
# PRINCIPAIS FONTES DE SÓDIO

- ✓ Potássicos com NaCl (variável)
- ✓ Salitre do Chile (25% Na)
- ✓ Salitre potássico ( $\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$ ) - 12% de Na
- ✓ Cloreto de sódio - 39% de Na



# COBALTO (Co)

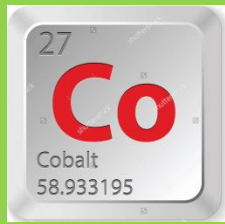




# NO SOLO

- ✓ Cátion divalente ( $\text{Co}^{2+}$ );
- ✓ Adsorvido na fração argila (óxidos de Mn) ou em complexos na matéria orgânica;
- ✓ Disponibilidade no solo é favorecida pelo aumento da acidez ou de condições redutoras (como em encharcamento);
- ✓ Teor no solo varia de 1 - 40  $\text{mg dm}^{-3}$ ;
- ✓ Teores mais baixos em solos arenosos.





# NA PLANTA

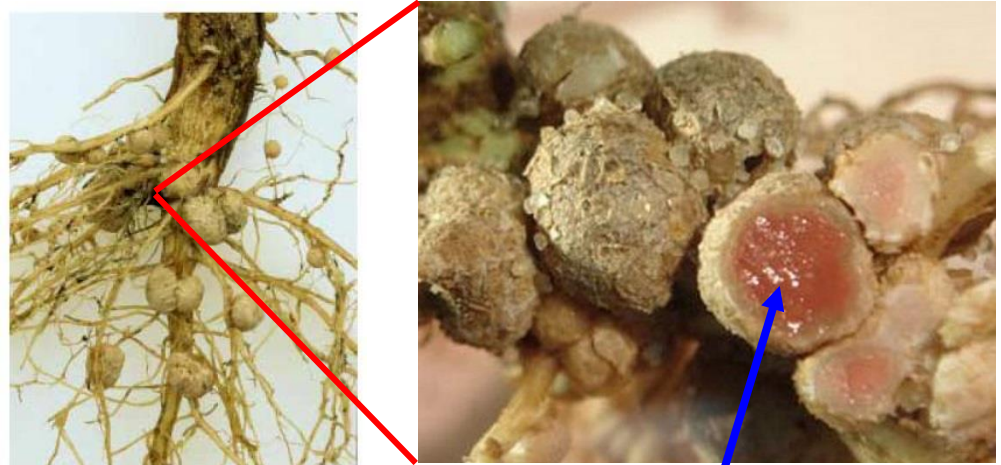
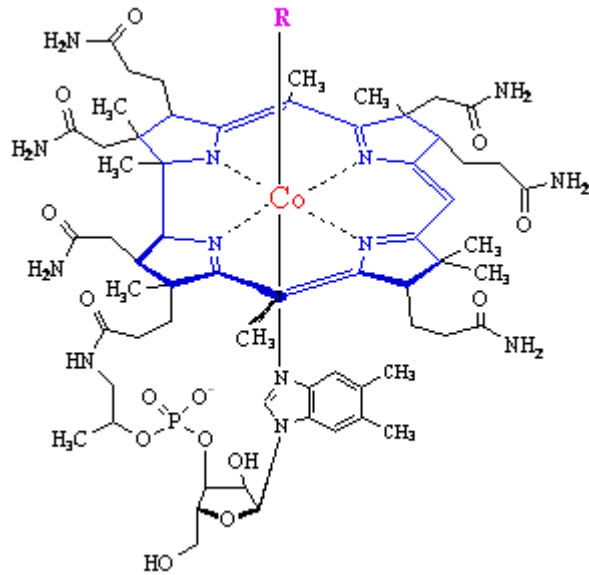
- ✓ Absorvido como  $\text{Co}^{2+}$ ;
- ✓ Mecanismo de contato íon-raiz: fluxo de massa;
- ✓ No xilema e no floema movimenta-se como  $\text{Co}^{2+}$ ;
- ✓ Distribuição: raízes > nódulos > parte aérea;
- ✓ Concentração de Co em plantas varia de 0,05 a 0,3  $\text{mg kg}^{-1}$  e é normalmente maior em leguminosas do que em gramíneas.

## Principal função:

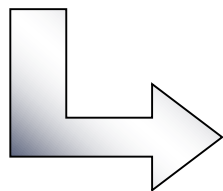
- ✓ Fundamental para a fixação de  $N_2$  em leguminosas (formação de cobalamina e leghemoglobina);
- ✓ Em leguminosas dependentes da FBN, a deficiência de Co está associada com sintomas de deficiência de nitrogênio;
- ✓ Em leguminosas deficientes em Co existe a tendência de se acumular nos nódulos.



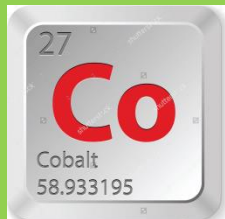
# FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO



Coenzima Cobalamina



Precursora da **LEGHEMOGLOBINA**



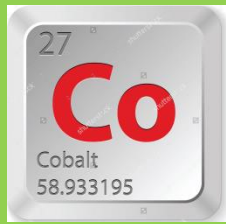
# Cobalto nos Nódulos de Leguminosas

Aplicação	Co ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ )	BACTER. (nº/nódulo)	COBALAM. ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ )	LEGHEMOGL. ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ )
SEM Co	45	15 X 10 <sup>9</sup>	5,9	0,71
COM Co	105	27 X 10 <sup>9</sup>	28,3	1,91



## Efeito do cobalto em amendoim

Tratamento	Nº nódulo	N (g kg <sup>-1</sup> )	Vagens (kg ha <sup>-1</sup> )
Sem Co	90	23,8	1,232
Co via semente	150	26,2	1,687
Aplicação Foliar (2x)	123	31,4	1,752
Via semente + Foliar (2x)	166	33,8	1,844



# EXCESSO DE COBALTO

- ✓ Com o excesso de cobalto, ocorre menor absorção de ferro e manganês e os sintomas lembram os de carência desses elementos.

7B	8B		1B	2B	
25	26	27	28	29	30
<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>
Manganês	Ferro	Cobalto	Níquel	Cobre	Zinco





# PRINCIPAIS FONTES

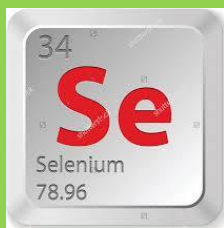
- ✓ Cloreto de Co ( $\text{CoCl}_2$ ) - 45,7% de Co
- ✓ Sulfato de Co ( $\text{CoSO}_4$ ) - 21% de Co
- ✓ Nitrato de Co ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ ) - 17% de Co



# SELÊNIO (Se)



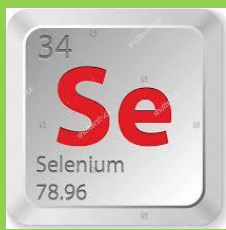




# NO SOLO

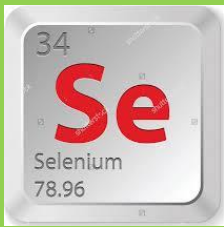
- ✓ Encontrado em rochas sedimentares das regiões mais secas, mas baixo teor em solos derivados de basalto e granito;
- ✓ Teor de **Se** no solo: média de 0,01 a 2,00 mg dm<sup>-3</sup>;
- ✓ **Se**: elemento não metálico relacionado ao enxofre (**S**);
- ✓ Diversos estados de oxidação: selenato ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ), selenito ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ), selênio elementar ( $\text{Se}^0$ ) e seleneto ( $\text{Se}^{2-}$ );
- ✓ **Se** e **S** competem na absorção pelas raízes.

6A	7A
8	9
<b>O</b>	<b>F</b>
Oxigênio	Flúor
16	17
<b>S</b>	<b>Cl</b>
Enxofre	Cloro
34	35
<b>Se</b>	<b>Br</b>
Selênio	Bromo
52	53



# NAS PLANTAS

- ✓ Absorvido como  $\text{SeO}_4^{2-}$  (selenato);
- ✓ Mecanismo de contato íon-raiz: fluxo de massa;
- ✓ No xilema e no floema movimenta-se como  $\text{SeO}_4^{2-}$
- ✓ Distribuição: acumula-se mais nas raízes;
- ✓ **Se**: pode substituir o **S** na cisteína e na metionina para formar os análogos, selenocisteína e selenometionina.



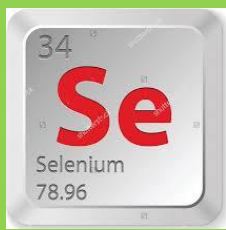
# PLANTAS CLASSIFICADAS EM TRÊS GRUPOS

➤ Grande variabilidade genética na absorção e no acúmulo de Se (crucíferas > gramíneas forrageiras > leguminosas > cereais)

**A: Se Acumuladoras** (acumulam Se para o seu crescimento): *Astragalus*, *Machaerantera*, *Haplopappus* e *Stanleya* (Se = 20.000 - 30.000  $\mu\text{g g}^{-1}$ );

**B: Se Indicadoras** (acumulam Se, mas não necessitam para o seu desenvolvimento): crucíferas como mostarda e brócolis (> 100  $\mu\text{g g}^{-1}$ );

**C: Se Não acumuladoras:** várias espécies de uso agrícola; toxicidade de Se <100  $\mu\text{g g}^{-1}$  (alfafa) ou <10  $\mu\text{g g}^{-1}$  (trigo).



# IMPORTÂNCIA DO SELÊNIO

- ✓ A deficiência de Se para o ser humano pode causar cárie dental, erupções na pele, artrite e edema subcutâneo;
- ✓ O Se tem efeito inibitório em vários tipos de câncer;
- ✓ A deficiência de Se pode causar distrofia muscular em bovinos e ovinos.

# Ingestão de Se em algumas regiões do Brasil

Estado/Cidade	Média ( $\mu\text{g}/\text{dia}$ )
Manaus	94.5
Mato Grosso	19
Santa Catharina	52*
Santa Catarina	139**
São Paulo	18
São Paulo-SP (Crianças)	26,3
Macapá-AP(Crianças)	107
Belém-PA (Crianças)	37.4

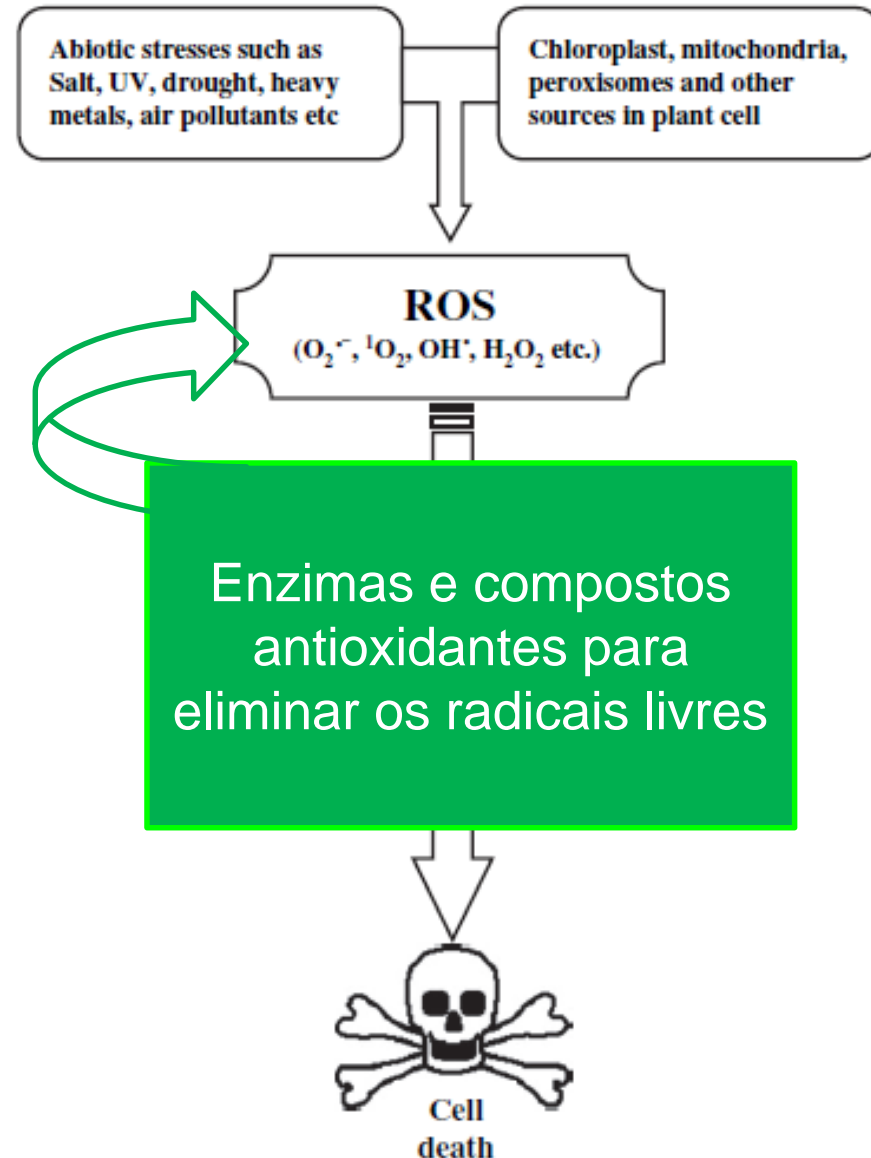
**50  $\mu\text{g}$  Se por dia é requerido e, pelo menos, 200  $\mu\text{g}$  Se por dia são necessários para prevenção do cancer.**

Fonte: adaptado de Gonzaga et al. (2007) e Maihara et al. (2004).

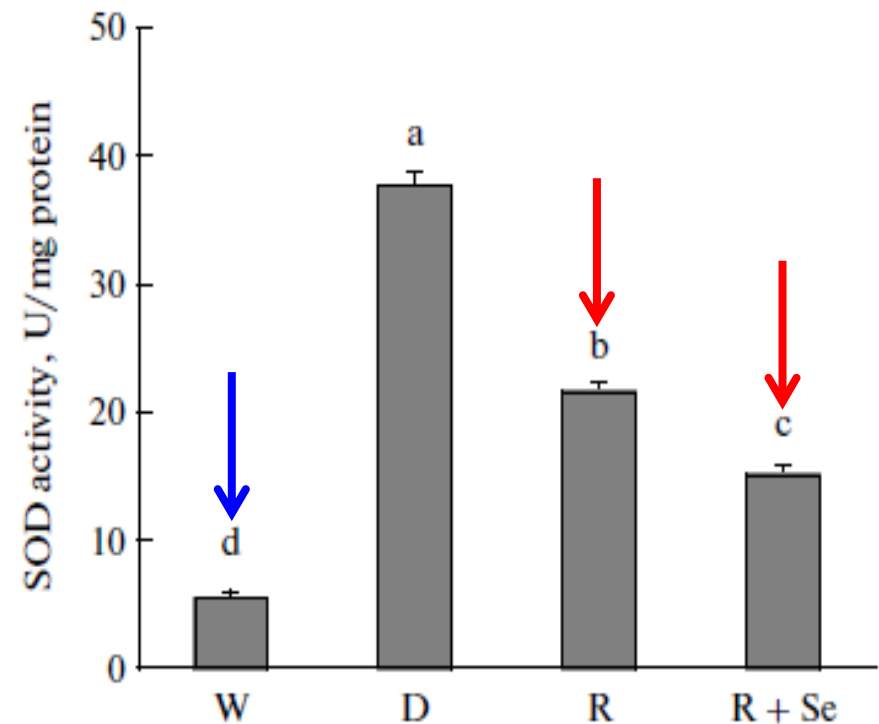
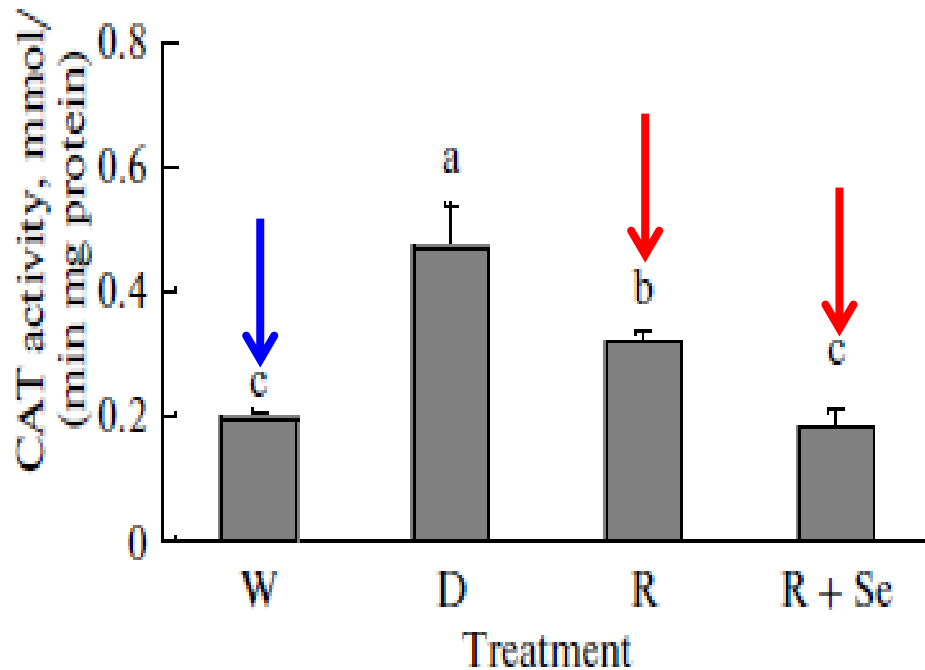
\*Classe social baixa; \*\*Classe social alta

# SELÊNIO X ESTRESSES ABIÓTICOS

- ✓ Aumenta a desmutação espontânea de  $O_2^-$  para  $H_2O_2$ ;
- ✓ Eliminação direta de  $O_2^-$  e  $OH$  por compostos de Se;
- ✓ Ativação de enzimas do sistema antioxidante;



# SELÊNIO x ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE TRIGO



W - bem regado

D - seca (estresse hídrico)

R - rehidração

R+Se - rehidração + Se



# PRINCIPAIS FONTES

- ✓ Selenato de Na ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) – 42% de Se
- ✓ Selenato de K ( $\text{K}_2\text{SeO}_4$ ) – 35% de Se
- ✓ Selenito de Na ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ) – 45% de Se





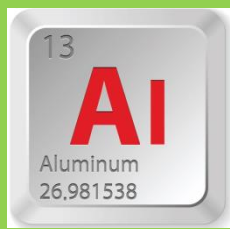
## RESUMO

<b>Elemento</b>	<b>Forma absorvida</b>	<b>Contato íon-raiz</b>	<b>Distribuição na planta</b>
<b>Cobalto</b>	$\text{Co}^{2+}$	Fluxo de Massa	Raízes > nódulos > parte aérea
<b>Selênio</b>	$\text{SeO}_4^{2-}$	Fluxo de Massa	Raízes
<b>Silício</b>	$\text{H}_4\text{SiO}_4$	Fluxo de Massa	Folhas > caules > raízes
<b>Sódio</b>	$\text{Na}^+$	Fluxo de Massa e Difusão	Raízes > caules > folhas



# ALUMÍNIO (Al)





# ALUMÍNIO

- ✓ Cátion trivalente -  $\text{Al}^{3+}$ ;
- ✓ Teor na solução do solo dependente do pH;
- ✓ **Tóxico** para a maioria das espécies vegetais;
- ✓ **Benéfico** para a cultura do chá (*Camellia sinensis*) e da hortênsia (*Hydrangea macrophylla*).





**Obrigada !!!**