



**Rivaldo V. dos Santos<sup>1</sup>, Lourival F. Cavalcante<sup>2</sup>, Adriana de F. M. Vital<sup>1</sup>,  
Claudivan F. de Lacerda<sup>3</sup>, Edivan R. de Souza<sup>4</sup> & Geovani S. de Lima<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande

<sup>2</sup> Universidade Federal da Paraíba

<sup>3</sup> Universidade Federal do Ceará

<sup>4</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco

## INTRODUÇÃO

O termo “fértil” é sinônimo de “frutífero” e “prolífico”. Para a Ciência do Solo a fertilidade significa disponibilidade de nutrientes assimiláveis às plantas em quantidades suficientes e balanceadas, de modo que a produção agrícola seja economicamente viável (Raij, 2011). Além disso, devem estar livres de substâncias ou elementos tóxicos e possuir atributos físicos, químicos e biológicos satisfatórios. Nesse aspecto, a salinização dos solos em regiões semiáridas, caracterizada pela elevada concentração de sais solúveis e, ou de sódio trocável, é um fator que afeta negativamente a fertilidade do solo, resultando em limitações para o crescimento e o desenvolvimento das plantas e consequentemente ocasiona prejuízos à produtividade agrícola. Conceitualmente, por apresentarem elevada saturação por bases, a princípio, poderia se afirmar que os solos afetados por sais possuem elevada fertilidade. No entanto, deve-se observar que a elevada percentagem de sódio afeta negativamente a fertilidade do solo, pois não se trata de um elemento essencial para os vegetais ou quando é, como no caso das plantas de metabolismo fotossintético C4, a quantidade requerida é muito pequena.

As interações iônicas que afetam a disponibilidade, absorção e transporte de nutrientes são altamente complexas mesmo na ausência de salinidade e de outros estresses. A salinidade e a sodicidade adicionam um novo nível de complexidade para a nutrição mineral das culturas, afetando a atividade dos íons em solução e os processos de absorção, transporte, assimilação e distribuição. Essa complexidade é explicada pelas diferenças na concentração e na composição iônica dos meios salinos aos quais

as plantas são submetidas, pelos nutrientes essenciais envolvidos e pelas diferentes respostas das plantas tanto em relação à salinidade como para a eficiência na aquisição de nutrientes do solo. Isso promove uma gama de interações que não podem ser facilmente explicadas. As dificuldades na interpretação dos resultados são aumentadas em face das diferentes condições de cultivo utilizadas, do tempo de exposição ao estresse e do tipo de tecido amostrado (Lacerda, 2005).

A compreensão dos fatores que influenciam a dinâmica dos nutrientes, os atributos físicos nos solos salinizados e o domínio de técnicas visando a recuperação dos mesmos constituem-se em avanços promissores, onde comprovadamente o uso de corretivos traz melhoria dessas condições. No entanto, quanto aos atributos químicos há um longo caminho a ser percorrido, seja relativo ao balanceamento iônico na solução do solo após a lavagem ou a aplicação de corretivos. A compreensão da interação salinidade-correção-fertilidade constitui-se num desafio para reintegrar as áreas degradadas à exploração agrícola e minimizar o impacto sócio-econômico-ambiental resultante do processo de salinização nas regiões áridas e semiáridas. Nesse capítulo será enfatizado o efeito do excesso de sais solúveis e de sódio trocável nos atributos do solo, sua interação com a fertilidade e, em especial, sua influência na nutrição mineral e na produção de culturas.

## A INTERAÇÃO SALINIDADE-FERTILIDADE DO SOLO

### Origem e classificação dos solos halomórficos

Nas regiões semiáridas, devido ao baixo conteúdo de água nos solos, os minerais primários e secundários

sofrem um incipiente processo de degradação química, onde as reações de hidrólise, hidratação, carbonatação e oxi-redução restringem-se a um curto período de tempo, com pequena liberação de eletrólitos para a solução do solo; no entanto, ao longo do tempo há acumulações de cátions e ânions que, por estarem localizados em ambiente com elevada evapotranspiração, tendem a precipitar-se na forma de sais. Esses compostos apresentam solubilidade variável, sendo representados principalmente por sódio, cálcio e magnésio em forma de sulfatos, carbonatos, cloretos e bicarbonatos. A influência desses íons confere aos solos características específicas e têm impactos diretos e indiretos em sua fertilidade. A ocorrência de minerais no solo e seu intemperismo são de extrema importância para compreensão da salinização primária do solo. As reações de hidrólise, hidratação, oxidação e redução estão detalhadas e discutidas por Kampf et al. (2009).

Os solos afetados por sais têm sua classificação baseada na concentração de sais solúveis do extrato da solução do solo, na percentagem de sódio trocável (PST) e no potencial hidrogeniônico (pH). Os solos salinos são aqueles em que o crescimento das plantas é inibido pela elevada concentração de sais solúveis. Podem ser convertidos em solos não salinos pela lixiviação do excesso de sais da zona radicular. A condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) é superior a  $4 \text{ dS m}^{-1}$  e o percentual de sódio trocável inferior a 15%. O pH geralmente é inferior a 8,5 e normalmente são solos bem floclados. Os solos salino-sódicos apresentam CEes maior que  $4 \text{ dS m}^{-1}$  e PST superior a 15%, enquanto o pH situa-se em torno de 8,5. A sua limitação à produtividade vegetal deve-se ao efeito conjunto da concentração excessiva de sais solúveis e de sódio trocável. Nestes solos ocorre a lixiviação mais intensa dos sais solúveis que do sódio trocável, convertendo-o em solo sódico. Os solos sódicos têm CEes inferior a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , PST maior que 15% e frequentemente pH superior a 8,5. Deve-se destacar que o pH do solo não é fator decisivo na classificação, pois há solos sódicos ou salino-sódicos com reação ácida, com pH variando de 5,0 a 6,0. A alcalinidade dos solos afetados por sais é mais frequente nos solos salino-sódico e sódicos, e esta se deve à baixa concentração hidrogeniônica ( $\text{H}^+$ ) e à elevada concentração dos ânions  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ . Maiores informações sobre os processos de formação de solos afetados por sais podem ser visto no Capítulo 2.

### **Classificação-interação dos solos halomórficos**

#### **Solos salinos**

O pH é um atributo químico do solo que exerce intensa influência nas trocas iônicas do solo principalmente nos solos onde predomina os argilominerais do tipo 1:1, tais como caulinita, bem como os óxidos de Fe e Al, que possuem cargas elétricas da superfície externa dos minerais dependentes do pH

Nos solos salinos devido a alta concentração de sais solúveis os valores de pH variam de 6,5 a 8,0, quanto a

fertilidade e disponibilidade de nutrientes apresentam uma faixa adequada; no entanto a concentração excessiva de sais solúveis aumenta a CE da solução do solo tornando seu potencial osmótico ( $\Psi_s$ ) mais negativo, aumentando a dificuldade de absorção de água e nutrientes pelos vegetais, o que representa um efeito negativo da salinidade para as plantas. Relativo ao atributo físico, a concentração excessiva de sais confere maior permeabilidade aos solos salinos, sendo um aspecto positivo no manejo desses solos. Com a maior concentração de eletrólitos ocorre uma compressão da dupla camada difusa, fazendo com que as partículas fiquem mais próximas. Neste caso as forças de Van der Waals superam as forças repulsivas, resultando num aumento do grau de floclulação das partículas. Isso ocorre quando a distância entre as partículas é inferior a 20 Angstroms (Å). A maior floclulação é também proporcional à concentração de  $\text{Ca}^{2+}$ , conforme pode ser visto com mais detalhes no Capítulo 3.

Assim, apesar dos solos salinos apresentarem elevada soma por bases trocáveis e solúveis, com saturação por bases (V) superior a 70%, a rigor não são solos férteis, devido seu fator osmótico limitar sua fertilidade. Dessa forma a saturação por bases não é recomendável na avaliação da fertilidade dos solos salinos, devido à concentração excessiva de sais, mesmo quando subtrai-se do total dos sais aqueles solúveis e considera-se apenas os cátions trocáveis. Vale salientar ainda que no cálculo da saturação por bases o sódio é contabilizado e, por não ser um elemento essencial para a maioria das plantas, pode mascarar a interpretação dessa variável como indicativa da fertilidade do solo. A interpretação da saturação por bases deve ser associada com a capacidade de troca de cátions.

#### **Solos salino-sódicos**

A fertilidade do solo é limitada pelos aspectos apresentados no item anterior, acrescentando-se a esses os aspectos da sodicidade, que caracteriza-se pela alta concentração de sódio trocável e, na maioria das vezes, está associada também a condições de reações básicas.

Os solos salino-sódicos são comuns nos perímetros irrigados do semiárido brasileiro e sua implicação na fertilidade dos solos têm três vertentes: a primeira deve-se ao aspecto químico desfavorável da alta concentração de sais solúveis e o impacto negativo do baixo  $\Psi_s$  da solução do solo; a segunda refere-se a concentração excessiva de sódio solúvel e trocável que acrescenta uma dificuldade específica no manejo desses solos; e a terceira relaciona-se com a reação dos solos, normalmente com valores de pH em torno de 8,5, com influência direta e indireta na disponibilidade de nutrientes às plantas.

#### **Solos sódicos**

O excesso de sódio trocável provoca alterações nas propriedades físicas do solo, especialmente pela dispersão das argilas, que provoca a desestruturação do solo, reduzindo

a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica, aumento da densidade e da resistência do solo à penetração de raízes, o que repercute diretamente no crescimento vegetal e produtividade das culturas (Vasconcelos et al., 2013; Santos et al., 2014).

Solos adensados são pegajosos quando úmidos e duros quando secos. O crescimento das raízes e a aeração dos solos requerem uma condição porosa. Caso a água da chuva promova a lixiviação dos eletrólitos do solo, as partículas de argila podem tornar-se dispersas. Tornando-se seco, o solo endurece e a compactação pode ocorrer. Isso reduz a aeração do solo, condição indispensável para o adequado crescimento radicular, já que a presença de oxigênio é essencial ao metabolismo vegetal. Por outro lado, pode-se manter uma concentração de eletrólitos no solo que provoque floculação. Para alcançar tais condições pode-se aplicar gesso,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (se tiver presença de calcário no solo), dentre outros. O cálcio é conhecido por apresentar alto poder de floculação das partículas de argila com cargas negativas, melhorando as condições químicas e físicas do solo. O agravante é que os “corretivos” de sodicidade são exigidos em quantidades demasiadas, provocando um desbalanceamento nas proporções adequadas de nutrientes, principalmente nas relações  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{HPO}_4^{2-}$ .

Apesar da mesma valência que o  $\text{Ca}^{2+}$ , o  $\text{Mg}^{2+}$  apresenta menor raio iônico e, por isso, maior raio hidratado, dificultando sua aproximação das partículas coloidais carregadas negativamente para neutralização de suas cargas elétricas. Isto gera um remanescente de carga negativa nas partículas dos solos, com consequente dispersão e movimentação de coloides ao longo do perfil do solo, provocando a criação de camadas mais adensadas que funcionam como impedimento à movimentação de ar e água em profundidade (Ribeiro et al., 2009).

A reduzida aeração dos solos sódicos, devido a ausência do oxigênio, compromete a disponibilidade de nutrientes. O oxigênio é o receptor primário de elétrons no solo e, na sua ausência, outros receptores secundários passam a substituí-lo, dentre esses o  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . Estes cátions e radicais aniônicos sofrem redução, convertendo-se em formas indesejáveis à agricultura, ou seja,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , alguns deles atingindo concentrações tóxicas e outros sendo perdidos no processo de volatilização.

Vale destacar ainda que a redução da umidade do solo restringe também a dissolução de minerais e a disponibilidade de nutrientes na solução do solo, causando efeito também na fertilidade do solo, provocando reduções significativas na produção das culturas. Além disso, a reduzida infiltração e o aumento no escoamento superficial, conjuntamente com a hidratação e a dispersão, aumentam as perdas do solo pela erosão. A presença do sódio, de forma indireta pelos efeitos negativos na estrutura do solo, reduz o processo de redistribuição e evaporação da água no perfil, o que pode resultar em uma temporária inundação da superfície do solo, que prejudica a germinação das sementes devido a

ausência de oxigênio. Essa condição também resulta em um período mais prolongado de umedecimento, dificultando as operações de manejo.

A forte reação alcalina (pH de 8,5 a 10) de muitos solos sódicos é causada pela alcalinização, que resulta da hidrólise dos íons  $\text{Na}^+$  adsorvido a argila do solo e do  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Tan, 1982), conforme equações:



Os íons  $\text{OH}^-$  produzidos aumentam com o pH do solo.



A sodificação do solo está associada a excessos dos ânions  $\text{OH}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ , conferindo-o forte caráter de alcalinidade, a qual implica, para os vegetais, numa severa toxicidade de sódio e boro e deficiências de Zn, Fe, Cu, Mn e P. Nessas condições de pH variando de 8,5 a 10, associado a alta PST, há também acúmulo de matéria orgânica e reduzida mineralização, com a consequente diminuição na disponibilidade de N, P, S e B aos vegetais. Porém, os solos sódicos intensamente lixiviados tendem a ser ácidos (pH~5,5) e com baixas concentrações de Ca, Mg e K.

#### Atributos do solo na interação

A fertilidade do solo é severamente afetada pelas condições salinas. Quanto a influência da concentração excessiva de sais solúveis destaca-se seu efeito no aumento da condutividade elétrica e na concentração de ânions, tais como cloretos, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos e boratos, na solução do solo. Sob condições sódicas um outro agravante é a presença de elevado pH (> 8,5). Tais condições originam toxicidade dos íons específicos e provocam deficiências nutricionais às plantas. A compreensão da dinâmica desses íons, assim como da reação do solo é indispensável para que se possa evitar concentrações excessivas e desequilíbrio de nutrientes, ou adicionar aqueles que estão em concentrações muito baixas.

#### Potencial osmótico

O potencial osmótico ( $\Psi_s$ ) é resultante da atuação do solutos na solução do solo. Pode-se usar a equação de Van't Hoff para estimar o potencial osmótico de uma solução:  $\Psi_s = -RTC$ , onde R é a constante universal dos gases (0,0082 kg MPa mol  $\text{K}^{-1}$ ), T é a temperatura absoluta da solução em Kelvin, e C é a concentração do soluto em mol  $\text{kg}^{-1}$  (Souza et al., 2012). A concentração excessiva de sais na solução do solo diminui a energia livre da água, reduzindo sua absorção pelas plantas e aumentando a condutividade elétrica (CE).

O principal efeito dos sais é osmótico, já que o alto nível salino no solo dificulta a absorção de água pelas plantas. Quanto mais salina for a água, menor será o seu potencial osmótico e mais difícil a absorção pelas plantas, podendo

chegar a uma condição de perda de água da célula para o meio, levando ao processo denominado de plasmólise. Porém, sob condições salinas se verifica redução do potencial osmótico das células, sem redução de volume, o que é denominado de ajustamento osmótico, ficando a plasmólise restrita a condições de severa salinidade ou quando a raiz é submetida a um choque osmótico. Vale ressaltar, que mesmo nas plantas ajustadas osmoticamente o fluxo de água no sistema solo planta é reduzido, pois a salinidade afeta a condutividade hidráulica nas raízes e as plantas tendem a reduzir a abertura estomática e o fluxo transpiratório sob condição de estresse osmótico.

Sabe-se que os nutrientes apenas são absorvidos pelos vegetais quando encontram-se sob forma iônica e solúvel, e antes de ocorrer o processo de absorção há necessidade do movimento dos íons no solo em direção à raiz, que verifica-se por fluxo em massa, difusão ou interceptação radicular. O fluxo em massa está associado ao processo de transpiração, de modo que a redução no fluxo de água decorrente do aumento da salinidade pode restringir a absorção e o transporte de nutrientes, principalmente de nitrogênio, potássio e cálcio. No entanto, esse problema é minimizado quando a redução no crescimento é proporcional à redução no fluxo de seiva do xilema, ou seja, nessas condições é mantida a concentração do nutriente no tecido vegetal.

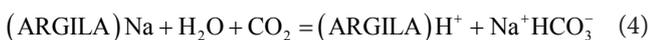
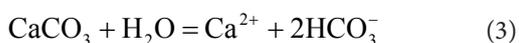
**Reação do solo**

A reação dos solos sob condições salinas é variável. Os solos salinos tendem a apresentar reação salina levemente alcalina ou ácida, normalmente com pH < 8,5. Quanto aos solos salino-sódicos, apresentam pH ≈ 8,5 e nos solos sódicos o pH pode ser superior a 8,5. Em alguns solos sódicos intensamente lixiviados, no entanto, o pH atinge valores baixos que variam de 5,5 a 6,0, sendo denominados de solos sódicos degradados. A degradação continuada de um solo sódico pela substituição do Na<sup>+</sup> pelo H<sup>+</sup> pode produzir um solo ácido, não salino e não sódico, conforme está descrito no Capítulo 2.

A reação desses solos durante muito tempo tem sido expressa por sua alcalinidade, ou seja, pela diferença entre a concentração total de cátions e a concentração total de ânions. Como nos solos com excesso de sais e de sódio os ânions dominantes são o carbonato, o bicarbonato e a hidroxila, sua alcalinidade é expressa por:

$$\text{Alcalinidade} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \quad (2)$$

Os colchetes expressam concentração molar. Dessa forma, a elevação de pH é acompanhada pelo aumento na concentração de carbonatos como ocorre no intemperismo de carbonatos sob a influência de CO<sub>2</sub>:



Assim, a elevação da pressão parcial de CO<sub>2</sub> aumenta o pH do sistema. Em solos sódicos, devido à elevada concentração de carbonatos e bicarbonato de sódio, o pH situa-se em muitos casos em torno de 10.

Solos ricos em CaCO<sub>3</sub> tem frequentemente pH próximo a 8,0. Sob tais condições, o pH da pasta saturada varia de 7,1, em solos altamente salinos a 8,2 em solos não salinos. Medições do pH em suspensão solo: água (1:2) revelam pH de 7,6 para solos altamente salinos e, em torno de 8,5 - 8,6 em solos não salinos. O acúmulo de sais reduz o pH em solos salinos, pois íons em excesso como K<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> são quantificados. Em solos sódicos, contudo, o pH aumenta com a elevação da sodicidade, devido a presença de altas concentrações de íons carbonato e bicarbonato de sódio.

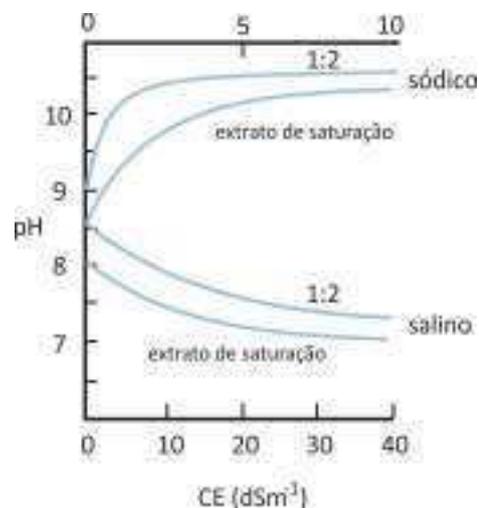
A diluição da suspensão solo-água também aumenta o pH. A diferença do pH entre o extrato de saturação e a suspensão solo:água de solos sódicos ou salino sódicos aproxima-se de uma unidade de pH em solos com baixa salinidade, e de 0,2 a 0,4 unidades de pH em solos altamente salinos. A Figura 1 apresenta a variação do pH e da condutividade elétrica em extratos obtidos da pasta saturada e de suspensão solo:água (1:2).

Apesar do maior valor de pH nas suspensões solo: água, têm-se observado menor alcalinidade em extratos aquosos, quando comparado com os valores do extrato de saturação. Esse paradoxo pH-alcalinidade foi associado com o equilíbrio cálcio-carbonato (Lindsay, 1979). No sistema carbonato de cálcio (H<sub>2</sub>O - CO<sub>2</sub> - CaCO<sub>3</sub>), a relação entre PCO<sub>2</sub> e pH tem sido representada pela Eq. 5 ou 6:

$$\text{pH} = 5,983 - \frac{2}{3} \log(\text{PCO}_2) + \frac{1}{3} \log(\gamma\text{H}_2\text{CO}_3) - \frac{1}{3} \log(\gamma\text{Ca}^{2+}) \quad (5)$$

$$\log(\text{PCO}_2) = 8,975 - 1,5\text{pH} + \frac{1}{2} \log(\gamma\text{HCO}_3^-) - \frac{1}{2} \log(\gamma\text{Ca}^{2+}) \quad (6)$$

onde γ refere-se ao coeficiente de atividade do íon. A relação entre pH e alcalinidade (alcalinidade do carbonato) pode ser



Fonte: Gupta & Abrol (1990)

**Figura 1.** Efeito da diluição e de sais solúveis na alteração do pH em solos salino-sódicos e sódicos

estabelecida pela substituição dos valores de  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$  nos termos da Eq. 7:

$$2\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^- = \text{PCO}_2 \left( \frac{2 \times 10^{-18,75}}{a^2\text{H}^+ \cdot \gamma\text{CO}_3^2} + \frac{10^{-7,82}}{a\text{H}^+ \cdot \gamma\text{CO}_3} \right) \quad (7)$$

Substituindo a Eq. 6 em 7, obtém-se uma relação que sugere que o aumento na  $\text{PCO}_2$  poderia reduzir o pH e aumentar a alcalinidade do carbonato. Dessa forma parece que o paradoxo pode ser devido a queda na  $\text{PCO}_2$  com o aumento da relação solo:água e perda do  $\text{H}_2\text{CO}_3$  durante a extração à vácuo da amostra.

Quanto a relação entre sodicidade e pH, verifica-se que o alto valor de pH sob tais condições é causado pela presença de minerais de carbonato e bicarbonato de sódio em solos sódicos ou salino-sódicos, os quais precipitam durante a evaporação e conduz a um aumento na relação de adsorção de sódio (RAS) da solução do solo. Uma relação entre pH e relação de sódio trocável (RST) foi verificada em solos sob condições de alcalinidade. Gupta et al. (1981) desenvolveram uma relação de dependência do pH simultaneamente com o complexo de troca  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  e o equilíbrio da calcita em solos sódicos a salino-sódicos ( $\text{pH} > 7,0$ ). A relação é expressa por Eq. 8:

$$\log \text{RST} = \text{pH} - 5,2336 + 0,5 \log [P(\text{CO}_2)] + \log(\text{Na}^+) + 0,5\text{I}^{1/2} \quad (8)$$

onde RST refere-se a relação de sódio trocável ( $\text{Na}_T$ ), conforme Eq. 9, e I é a força iônica da solução do solo.

$$\text{RST} = \frac{\text{Na}_T}{\text{CTC} - \text{Na}_T} \quad (9)$$

A variação aproximada da PST correspondente ao pH na pasta saturada do solo e em suspensões solo: água (1:2) é frequentemente observada sob condições de campo, conforme Tabela 1. Seu cálculo é feito pela Eq. 10.

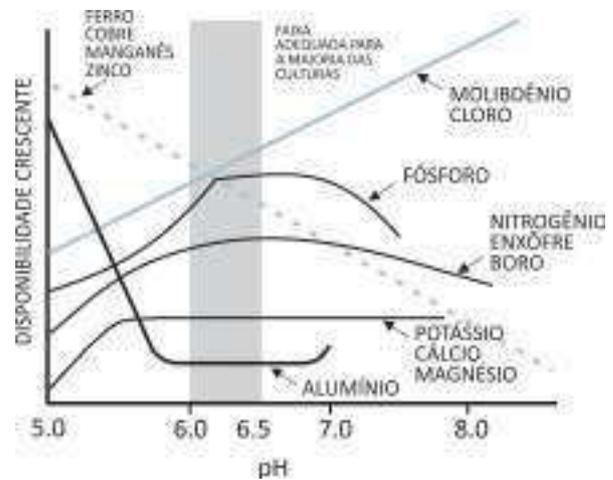
$$\text{PST} = \frac{\text{Na}_T}{\text{CTC}} \cdot 100 \quad (10)$$

Para estabelecer-se a metodologia de análises da fertilidade dos solos, a padronização do método de extração é de extrema importância, já que existe diferenças nos valores de pH e evidentemente, da concentração iônica de cátions

mono e bivalentes quando se utiliza diferentes métodos de obtenção do extrato.

A manutenção do pH entre 6,0 e 6,5 em solos com condições salinas deve ser meta prioritária, já que esse atributo químico apresenta uma estreita relação com a disponibilidade de nutrientes (Figura 2), e assim com a fertilidade dos solos.

A aplicação de doses crescentes de ácido sulfúrico em solo salino-sódico do perímetro irrigado de São Gonçalo, Sousa-PB ( $\text{PST} = 94\%$  e pH inicial 10,4) reduziu os valores de pH, por um período de 48 semanas, indicando que com a dose de ácido de  $3,06 \text{ mL kg}^{-1}$  de solo, após 16 dias, obtém-se um pH de 6,5, quimicamente adequado ao crescimento vegetal (Tabela 2). No mesmo solo, adição do ácido sulfúrico resultou em um aumento na disponibilidade de fósforo segundo a equação  $\text{P} = 1,19\text{H}_2\text{SO}_4 + 12,03$ , onde a unidades são:  $\text{P}(\text{mg kg}^{-1})$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4 (\text{mL kg}^{-1})$  (Costa Silva, 1997).



Adaptado: Lopes (1989)

**Figura 2.** Gráfico ilustrativo do efeito do pH na disponibilidade de nutrientes

**Tabela 2.** Efeito do ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) no pH do solo em vários períodos

| $\text{H}_2\text{SO}_4$<br>$\text{mL kg}^{-1}$ | Dias após aplicação do ácido |     |     |     |     |     |
|--|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | 8                            | 16  | 24  | 32  | 40  | 48  |
| 0  | 10,4                         | 9,7 | 9,3 | 9,4 | 9,4 | 9,3 |
| 1,53   | 9,8                          | 8,5 | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 |
| 3,06   | 7,0                          | 6,5 | 6,0 | 5,7 | 5,5 | 5,4 |
| 4,59   | 4,8                          | 4,4 | 3,8 | 3,4 | 3,4 | 3,4 |
| 6,12   | 4,0                          | 3,8 | 3,2 | 3,1 | 3,1 | 3,1 |
| 7,65   | 3,5                          | 3,3 | 2,8 | 2,6 | 2,7 | 2,6 |
| 9,18   | 3,3                          | 3,2 | 2,8 | 2,7 | 2,8 | 2,6 |
| 10,71  | 3,0                          | 3,0 | 2,4 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |

**Tabela 1.** Dependência do pH na sodicidade do solo

| pH             |                           | PST - Percentagem de sódio trocável |              |                    |
|----------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------------|
| Pasta saturada | Suspensão solo:água (1:2) | Chang & Dregne (1955)               | Kovda (1965) | Abrolet al. (1980) |
| 8,0-8,2        | 8,2-9,0                   | < 20                                | < 15         | < 20               |
| 8,2-8,4        | 9,0-9,4                   | 20-30                               | 15-25        | 21-35              |
| 8,4-8,6        | 9,4-9,6                   | 30-45                               | 25-30        | 35-50              |
| 8,6-8,8        | 9,6-9,8                   | 45-60                               | 30-40        | 50-65              |
| 8,8-9,0        | 9,8-10,0                  | > 60                                | 40-50        | 65-85              |
| 9,0-9,8        | > 10,0                    | -                                   | > 50         | > 85               |

Fonte: Gupta & Abrol (1990)

## DINÂMICA DOS NUTRIENTES EM SOLOS HALOMÓRFICOS

A redução da concentração de sais solúveis através da lavagem e o deslocamento para a solução do solo do sódio trocável e sua remoção também por lavagem, constituem-se em práticas com reflexos positivos nos atributos físicos dos solos afetados por sais. No entanto, há necessidade de intensificar estudos do balanço iônico buscando, após a adoção de práticas de recuperação destes solos, um balanceamento iônico adequado, de modo que ocorra uma maior disponibilidade de nutrientes para melhoria da nutrição mineral das plantas. A compreensão da química desses solos associada com a seleção de plantas mais tolerantes a estas condições adversas é a chave para reintegrar tais áreas, sem função produtiva, à exploração agrícola e mitigar um grave problema socioeconômico e ambiental nas áreas irrigadas das regiões semiáridas.

Em solos salinos as plantas são adversamente afetadas pela baixa absorção de água pelas raízes devido aos efeitos do potencial osmótico. Quando a salinidade é dada principalmente por cloreto de sódio, a toxicidade de íons também afeta a produtividade vegetal. Em solos sódicos a elevada alcalinidade e as condições anóxicas reduzem a concentração de nutrientes e a fertilidade do solo, limitando o crescimento vegetal. O balanço de nutrientes é facilmente alterado em solos sódicos devido principalmente a carência de drenagem e outras práticas importantes como a utilização de fertilizantes. O que se necessita é a condução de ensaios em solos sódicos relacionando a disponibilidade de nutrientes com atributos do solo afetados pela sodicidade, assim como a resposta de plantas aos nutrientes em menor disponibilidade no solo. Na escolha do fertilizante a ser aplicado, o conhecimento da reação do solo é um aspecto importante a ser considerado. Para a maioria dos solos sódicos deve-se optar por produtos de reação ácida. Compreender a química da solução do solo, os processos que afetam sua composição e a influência da matéria orgânica na disponibilidade de nutrientes são aspectos de extrema relevância.

No Brasil a preocupação em compreender a interação salinidade-fertilidade é um tema que merece ser mais explorado, tendo em vista que os aspectos investigados tem abordado com mais afinco a caracterização e correção dos solos. Ainda são incipientes os trabalhos (Freire et al., 2010) que exploram aspectos relacionados com a fertilidade em solos afetados por sais.

### Disponibilidade de nutrientes

Os solos sódicos apresentam degradação física e isso acarreta prejuízos quanto a disponibilidade de nutrientes. Abaixo são citadas as classes de solo sódico e os prejuízos mais comuns em sua fertilidade, conforme Rengasamy & Olsson (1991). São apresentadas interações com atributos físicos e morfológicos.

#### A) Solo Sódico Alcalino (pH > 8)

- Toxicidade dos nutrientes Mo, B, Na (em solo com pH > 9);

- Deficiências de nutrientes Cu, Zn, Mn, Fe, Co, N, Mg, Ca (em solo com pH > 9) e P (8,0 < pH < 8,5); e,
- Efeitos físicos prejudiciais no subsolo saturado, baixa infiltração de água e baixa aeração.

#### B) Solo Sódico Neutro (6 < pH < 8)

- Toxicidade dos nutrientes Mo, B, Fe, Cu e Mn; e,
- Efeitos físicos prejudiciais: superfícies encrostadas, superfície e subsuperfície saturadas, condições anóxicas: toxidez de Mn e Fe.

#### C) Solo Sódico Ácido (pH < 6)

- Toxicidade de Fe, Mn, Al, Cu e Zn;
- Deficiências de Mo, P, Ca, Mg e K; e,
- Duripans em alguns solos.

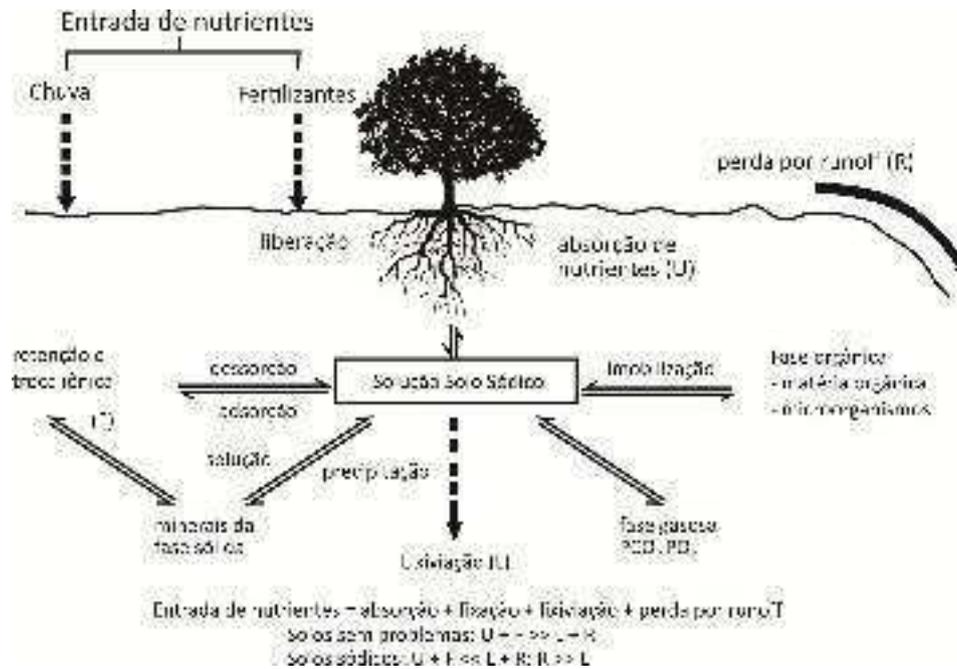
Desse modo, tanto a fertilidade química quanto a física dos solos são afetadas pela sodicidade. As elevadas concentrações de sódio, alto pH, associado ao estresse osmótico e a baixa aeração induzem muitos problemas de fertilidade nos solos. A utilização de nutrientes via fertilizantes em solos sódicos é restrita.

A composição química da solução do solo é dinâmica (Figura 3) e determinada por um equilíbrio multifase envolvendo:

- uma fase sólida, compreendendo minerais de argila, compostos inorgânicos amorfos e materiais orgânicos;
- uma fase líquida, representada pela água do solo;
- uma fase gasosa, relativa principalmente ao oxigênio e dióxido de carbono; e,
- o complexo de troca.

Cloreto, carbonato, bicarbonato, sulfato, magnésio e sódio são os íons dominantes no extrato de solos sódicos. O cálcio, nesses solos, está presente em baixas concentrações e é geralmente um fator limitante tanto para a nutrição de plantas quanto para a estabilidade estrutural do solo. O potássio é também encontrado em baixas proporções, mas o seu constante suprimento é garantido na solução de solos sódicos devido a predominância da mica hidratada. Em algumas situações específicas, o borato, nitrato e fosfato são encontrados em níveis consideráveis na solução de solos sódicos e águas subterrâneas

Juntamente com os componentes do solo e do clima, o manejo do solo tal como a adição de gesso, calcário, matéria orgânica, resíduos culturais, a irrigação e o período que o solo encontra-se exposto (sem proteção), também afetam os processos que ocorrem na solução do solo. Na ausência da adubação, a disponibilidade de nutrientes é derivada principalmente dos produtos do intemperismo dos minerais primários, das argilas e da decomposição da matéria orgânica. A liberação de nutrientes na solução do solo envolve vários mecanismos, entre os quais se destaca a troca iônica, a solubilização e precipitação, a formação de par iônico, a adsorção específica e a assimilação e excreção microbiológica. A assimilação e excreção microbiológica são importantes processos que podem afetar a concentração de



Adaptado de Naidu & Rengasamy (1993)

**Figura 3.** A dinâmica da química da solução do solo sódico

nutrientes na solução do solo. As complexações com ligantes, a quelação, são reações vitais que controlam a concentração de micronutrientes nos solos.

Ânions como sulfato e carbonatos associam-se aos cátions multivalentes e formam espécies não iônicas, reduzindo a atividade das espécies iônicas e a disponibilidade dos nutrientes. Esses complexos podem também reduzir a toxicidade de íons para as plantas. Nesse sentido, a formação de par de íons de Al<sup>3+</sup> com SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> reduz a atividade de Al<sup>3+</sup> e sua toxicidade às raízes das plantas, mas essa reação não é comum em solos sódicos, devido não conterem ou conterem baixa concentração de Al<sup>3+</sup>. Em solos sódicos os pares iônicos com carbonato, bicarbonato e sulfato reduzem a atividade de íons divalentes (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>). Por isso a RAS calculada a partir da concentração iônica superestima seu valor.

O estado redox do solo é descrito pela atividade dos elétrons livres, pE (isto é: - log(e<sup>-</sup>)), em conjunto com a atividade dos prótons (pH). A pH 7 solos sub-óxicos tem um pE que varia de +2 a +7, enquanto solos anóxicos tem um pE < +2. Em solos sódicos o Fe, Mn, N, O, S e C são os nutrientes mais comuns que sofrem reações de oxi-redução, originando outras espécies (Tabela 3).

Na ausência de oxigênio tanto organismos facultativos quanto anaeróbios usam o Mn<sup>4+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> nas reações de transferência de elétrons e produzem Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, N<sub>2</sub> e S<sup>2-</sup>. Essas reações aumentam excessivamente a disponibilidade dos nutrientes (Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>) para as plantas ou suas perdas (N<sub>2</sub>, S<sup>2-</sup>). Embora se comente que os íons Zn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> e MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup> sejam solúveis em solos com deficiência de drenagem, o efeito do pH é dominante em solos sódicos alcalinos e provoca a precipitação desses íons. Ainda que esses metais pesados possam ser solubilizados através da quelação por moléculas orgânicas, derivadas da decomposição anaeróbica

**Tabela 3.** Atividade dos elétrons (pE) a pH 7 para algumas reações químicas em solo sódico

| Reação química  | pE    |
|---|-------|
| O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup> ⇌ 2H <sub>2</sub> O                                    | 13,80 |
| 2NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 12H <sup>+</sup> + 10e <sup>-</sup> ⇌ N <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O  | 12,66 |
| MnO <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ Fe <sup>2+</sup> + 3H <sub>2</sub> O               | 6,80  |
| Fe(OH) <sub>3</sub> + 3H <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> ⇌ Fe <sup>2+</sup> + 3H <sub>2</sub> O             | -3,13 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 10H <sup>+</sup> + 8e <sup>-</sup> ⇌ Fe <sup>2+</sup> + 3H <sub>2</sub> O | -3,13 |
| CO <sub>2</sub> + 8H <sup>+</sup> + 8e <sup>-</sup> ⇌ CH <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O                 | -4,14 |
| N <sub>2</sub> + 8H <sup>+</sup> + 6e <sup>-</sup> ⇌ 2NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                        | -4,69 |
| 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ H <sub>2</sub>  | -7,00 |

da matéria orgânica, o estado de oxi-redução que ocorre em solos sódicos conduz a sua complexação com a superfície sólida do solo e a sua indisponibilidade às plantas.

Nos solos com excesso de água pode ocorrer também perdas de N por desnitrificação. Em solos com alto pH, como os solos sódicos calcários, o N pode ser volatilizado na forma de NH<sub>3</sub> ou precipitado como (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. A disponibilidade de N é muito reduzida sob essas condições quando a ureia é a fonte de N, devido a baixa atividade da urease a altos valores de pH (Nitant & Bhumbla, 1974). A disponibilidade de N em solos sódicos é complexa. Estudos são necessários para relacionar a influência da sodicidade nas transformações do N nesses solos.

A disponibilidade de fósforo é geralmente aumentada em solos alagados devido a redução de fosfatos férrico e a dissolução de outros fosfatos. O sódio trocável pode aumentar a dissociação de ânions orgânicos, os quais substituem o P dos fosfatos de Fe e Al. A alta disponibilidade de P em solos sódicos alcalinos indianos foi atribuída por Gupta & Abrol (1990) aos altos níveis de pH, RAS e CO<sub>3</sub><sup>-</sup>. A aplicação de superfosfatos é uma prática comum em solos australianos para aumentar sua absorção pelas plantas. Outros solos

sódicos aluviais também apresentam alta concentração total de P. O feijão vigna responde significativamente à aplicação de  $H_3PO_4$  (Santos, 1996). Deve-se procurar saber se esse efeito deve-se ao P aplicado ou a redução do pH do solo devido a aplicação de fonte ácida de fósforo. Pesquisas com solo salino-sódico do Nordeste brasileiro indicam também que a aplicação de doses crescentes de  $H_3PO_4$  (0, 70, 140 e 210  $mg\ dm^{-3}$ ) tem reduzido o pH do solo, aumentado a disponibilidade de P às plantas e proporcionado aumento na produção de milho forrageiro (g por vaso), expressas pelas equações  $Y = 11,78 + 0,04X$  e  $Y = 7,4 + 0,04X$  ( $Y =$  massa seca e  $X =$  doses de P,  $mg\ dm^{-3}$ ) (Ferreira et al., 2008a; 2008b). O ácido sulfúrico constitui-se em outra alternativa para minimizar o efeito nocivo do sódio e reduzir o pH em solos sódicos ou salino-sódicos com pH acima de 9,0.

O aumento na solubilização de P em condições sódicas como meta à redução da aplicação de superfosfatos nesses solos ainda não está devidamente esclarecido. O fósforo encontra-se predominantemente sob a forma de fosfato de cálcio em solos sódicos. Neste caso, sugere-se sua extração utilizando o método de Olsen ( $NaHCO_3$  0,5 N). O efeito do sódio trocável pode ser avaliado pela relação adsorção/dessorção do P (Sharpley et al., 1988). Geralmente aceita-se que aumento de fósforo na solução está associado ao aumento na saturação por sódio no complexo de troca do solo. Quando o sódio substitui Ca, Mg e Al no complexo de troca o potencial negativo da superfície é aumentado, conduzindo ao processo de dessorção de fósforo.

Os efeitos interativos da salinidade sobre os níveis de nutrientes no crescimento do trigo mostraram que a aplicação de doses crescentes de N, P, K, Ca, Mg e S aumentou a produtividade. Os autores supracitados acrescentam ainda que a salinidade exerce seus principais efeitos na fase inicial de crescimento, e que, a principal estratégia para aumentar a produção de trigo em solo salino é: (1) aumentar o suprimento de nutrientes em solos com baixa disponibilidade, (2) propiciar condições favoráveis na zona radicular pela eliminação dos sais e (3) aumentar a densidade das plantas (Hu et al., 1997). Nessa direção, Lacerda et al. (2011) também evidenciaram melhoria no rendimento do feijão-de-corda com o aumento da densidade de plantio; entretanto, nesse caso também se aumenta as quantidades de fertilizantes aplicados por área.

Leite et al. (2007), estudando a correção da sodicidade de dois solos irrigados em resposta à aplicação de gesso agrícola, verificaram que doses de gesso de 0; 2,5; 7,5; 10,0 e 12,5  $g\ kg^{-1}$  de solo elevaram a concentração do Mg extraído da pasta saturada. Isso pode ser atribuído a impurezas de Mg contidas no gesso ou, segundo Fassbender & Bornemista (1987) ao maior poder de seletividade do Ca no complexo de troca do solo ( $Ca > Mg > K > Al > Na$ ), o qual substitui o Mg e ocorre o seu deslocamento para a solução do solo.

#### Deficiência de nutrientes

A preocupação com o ajustamento na concentração iônica da solução do solo remonta algum tempo. Champagnol (1979)

em revisão sobre o tema nutrição fosfatada e a toxicidade dos sais nas plantas, observou um efeito positivo em 34 das 37 espécies estudadas, e recomenda uma aplicação moderada de fertilizantes solúveis (nitratos, cloretos, sulfatos) para reduzir o aumento excessivo na concentração de sais na solução do solo e os riscos de toxicidade. No entanto, deve-se considerar que os solos salinizados apresentam uma elevada heterogeneidade química e, numa mesma área ou perímetro irrigado necessita-se proceder diagnóstico específico.

Os solos sódicos apresentam de moderada a fraca fertilidade, com variada capacidade de fornecer nutrientes às plantas. Deficiências acentuadas de N e P são comuns e frequentemente estão associadas com a deficiência de outros nutrientes, especialmente o S e os micronutrientes Mo, Cu, Zn e Mn. A limitada lixiviação e a inundação dos solos afetados pela salinização e a consequente sodificação também causam transformações de nutrientes reduzindo a fertilidade.

A deficiência de micronutrientes resulta da interação das condições do solo, variação genética entre espécies, clima e desbalanço nutricional. As condições de sodicidade apresentadas pelos solos sódicos afetam a natureza da solução do solo e a disponibilidade de nutrientes. O baixo conteúdo de  $O_2$  em solos sódicos inundados resulta em transformações químicas dos nutrientes, tornando-os indisponíveis às plantas ou atingindo níveis tóxicos. Na realidade há poucas informações sobre a disponibilidade de micronutrientes nesse tipo de solo. Trabalhos indicam apreciável liberação de  $Zn^{2+}$  em solos sódicos ( $pH \geq 9,1$ ) apenas após o solo ser acidificado para redução do teor de  $CaCO_3$ . Sem esse tratamento, tanto o  $Zn^{2+}$  quanto o  $Cu^{2+}$  são praticamente indetectáveis, apresentando concentrações na solução do solo de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  e de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$   $mol\ L^{-1}$ , respectivamente para o  $Zn^{2+}$  e  $Cu^{2+}$ . A incorporação de matéria orgânica no solo pode mobilizar estes nutrientes e disponibilizar Zn e Cu para as plantas.

Soltanpour et al. (1999) cultivaram alfafa em solução nutritiva com salinidade crescente em cloreto e sulfato (Tabela 4) e constataram redução dos teores de N, P e Ca nas plantas com o aumento da salinidade, e aumento na acumulação de K e Mg.

**Tabela 4.** Impacto da salinidade do cloreto e sulfato na concentração de nutrientes da parte aérea da alfafa.

| CE<br>dS $m^{-1}$   | mmol $kg^{-1}$ |    |      |     |      |
|---------------------|----------------|----|------|-----|------|
|                     | P              | N  | Ca   | Mg  | K    |
| Solução com cloreto |                |    |      |     |      |
| 0,7                 | 70             | 75 | 1091 | 207 | 1088 |
| 2,1                 | 58             | 26 | 1111 | 240 | 1034 |
| 3,4                 | 60             | 46 | 961  | 245 | 1064 |
| 5,1                 | 48             | 20 | 965  | 248 | 1035 |
| 7,7                 | 55             | 31 | 938  | 251 | 1204 |
| 11                  | 50             | 40 | 821  | 306 | 1341 |
| Solução com sulfato |                |    |      |     |      |
| 0,7                 | 70             | 75 | 1091 | 207 | 1088 |
| 2,1                 | 56             | 31 | 898  | 240 | 1028 |
| 3,4                 | 57             | 53 | 834  | 227 | 1197 |
| 5,1                 | 59             | 57 | 808  | 230 | 1198 |
| 7,7                 | 53             | 44 | 493  | 249 | 1419 |
| 11                  | 43             | 36 | 351  | 221 | 1444 |

Fonte: Adaptada de Soltanpour et al. (1999)

Acumulação foliar de Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup> em plantas estabelecidas em solos sódicos sofre redução em nível logarítmico, para aumento de uma unidade no pH e atingem valor mínimo no solo com pH próximo de 9 (Lindsay, 1979). A “clorose de Fe induzida pelo calcário” é comum nessas condições. Dentre os fatores que restringem a disponibilidade de Fe citam-se o excesso de CaCO<sub>3</sub> e de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, excesso de água, elevado pH (> 8,5), deficiência de drenagem e de aeração às raízes (Naidu & Rengasamy, 1993).

A aplicação prévia de gesso nos solos salino-sódicos provoca desbalanços dos teores de bases trocáveis, além de reduzir a disponibilidade de fósforo ao longo do tempo (Santos, 1995), como mostra os dados da Tabela 5. Em solos salino-sódicos uma alternativa para aumentar a absorção de macronutrientes é a aplicação de uma fonte ácida de fósforo, tal como o H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (Santos, 1996).

O boro e o molibdênio são mais solúveis em solos sódicos que em solos com pH neutro. Todavia, alterações no pH e a complexação por compostos orgânicos têm maior influência na disponibilidade dos respectivos micronutrientes. A deficiência de Mo ou B ocorre mais facilmente sob condições de acidez que sob sodicidade. Já a toxidez de B é bastante comum em solos sódicos, onde encontram-se frequentemente concentrações acima de 10 mg kg<sup>-1</sup> de solo. A aplicação de gesso seguido de lavagem do solo reduz os níveis de B a concentrações toleráveis pelas plantas.

**Tabela 5.** Características químicas de um solo salino-sódico antes da aplicação do gesso (AAG), após a lixiviação dos sais (ALS) e após cultivo do feijão (ACF)

| Parâmetros                        | Unidades                           | AAG  | ALS                         |      | ACF  |      |
|-----------------------------------|------------------------------------|------|-----------------------------|------|------|------|
|                                   |                                    |      | Gesso (g kg <sup>-1</sup> ) |      |      |      |
|                                   |                                    |      | 6                           | 12   | 6    | 12   |
| pHCaCl <sub>2</sub>               | -                                  | 8,8  | 7,8                         | 7,7  | 7,4  | 7,1  |
| CE                                | dS m <sup>-1</sup>                 | 2,5  | 2,0                         | 2,2  | 2,6  | 3,4  |
| Ca <sup>2+</sup>                  | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 15,3 | 17,9                        | 25,0 | 15,4 | 19,3 |
| Mg <sup>2+</sup>                  | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 3,0  | 1,3                         | 1,5  | 3,2  | 2,9  |
| K <sup>+</sup>                    | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 0,25 | 0,75                        | 0,99 | 0,83 | 0,72 |
| Na <sup>+</sup>                   | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 4,5  | 2,2                         | 2,1  | 3,0  | 2,4  |
| H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup> | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 0,5  | 0,6                         | 0,6  | 0,9  | 0,9  |
| SB                                | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 23,0 | 22,3                        | 29,6 | 22,4 | 25,3 |
| CTC                               | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 23,5 | 22,9                        | 30,2 | 23,3 | 26,2 |
| S(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 1,6  | 9,3                         | 22,0 | 10,9 | 22,3 |
| Cl <sup>-</sup>                   | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 8,5  | 2,0                         | 1,0  | 2,7  | 3,3  |
| V                                 | %                                  | 98   | 97                          | 98   | 96   | 96   |
| SS                                | %                                  | 19   | 9,8                         | 6,4  | 13   | 9    |
| Ca/Mg                             | -                                  | 5,0  | 13                          | 16   | 4,8  | 6,9  |
| P                                 | mg dm <sup>-3</sup>                | 53   | 45,1                        | 34,6 | 184  | 161  |
| N TOTAL                           | mg dm <sup>-3</sup>                | 6,8  | 7,2                         | 6,5  | 7,3  | 6,2  |

SS = saturação por sódio; Fonte: Santos (1995)

### Toxicidade de sódio

Altas concentrações de íons de Na<sup>+</sup> originam condições tóxicas às plantas. A sensibilidade das plantas ao Na<sup>+</sup> varia entre espécies e entre genótipos de uma mesma espécie. Dentre as espécies, a cultura do arroz revela maior tolerância à toxicidade. Além do efeito direto do Na<sup>+</sup>, a baixa concentração de Ca<sup>2+</sup> (< 1mmol L<sup>-1</sup>) conduz a uma alta relação Na/Ca causando desequilíbrios nutricionais e efeitos adversos na

fisiologia das plantas. Devido a alta absorção de Na<sup>+</sup> e baixa de Ca<sup>2+</sup> pelas plantas, em solos sódicos, a permeabilidade da membrana é afetada, reduzindo o transporte de íons. A baixa concentração de Ca<sup>2+</sup> nesses solos também conduz a um aumento na absorção de Zn, Ni, Mg, Pb, Se, Al e B, em níveis que podem desenvolver a toxicidade.

A proporção relativa de Ca<sup>2+</sup> na solução do solo, que é normalmente adequada para as plantas sob condições não salinas, torna-se inadequada sob condições salino-sódicas. Os baixos níveis de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> em solos sódicos aumentam a RAS da solução do solo induzindo a deficiências de Ca<sup>2+</sup> e/ou Mg<sup>2+</sup> para as plantas. A alternativa é a aplicação de uma fonte de Ca<sup>2+</sup>, que pode ser o gesso, ou outra que não eleve significativamente o pH do solo.

A disponibilidade de Ca<sup>2+</sup> é um importante fator no manejo de solos sódicos e salino-sódicos. Nos primeiros a deficiência de Ca<sup>2+</sup> ocorre principalmente em respostas ao elevado pH e à inadequada aeração, no segundo deve-se a competição iônica durante o processo de absorção. A alta concentração de Na<sup>+</sup> também provoca deficiência de outros nutrientes, tais como o K, Zn, Cu e Mn.

## INFLUÊNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA

### Disponibilidade de nutrientes

A matéria orgânica aumenta a fertilidade do solo por sua capacidade de fornecer nutrientes para as plantas, especialmente o N. Na realidade, a matéria orgânica é a maior fonte de cargas negativas, sendo responsável tanto pela retenção quanto pela liberação de nutrientes para a solução do solo, especialmente o N, P e S através do processo de mineralização. Apesar de não ser considerada fertilizante e nem corretivo químico devido os seus baixos teores, a matéria orgânica exerce efeitos positivos na fertilidade do solo em termos físicos (Mellek et al., 2010), químicos (Bendouali et al., 2013) e biológicos (Sall et al., 2015). O acúmulo de matéria orgânica em solos sódicos é baixo porque os complexos orgânicos com Na<sup>+</sup> são altamente solúveis e móveis. O grau de formação de ligações covalentes do Na<sup>+</sup> com moléculas orgânicas é baixa devido ao seu pequeno potencial quando comparado com o de íons divalentes ou trivalentes. No entanto, devido a baixa atividade microbiana em ambientes com excesso de sódio, é comum a presença de manchas superficiais escurecidas (álcali-negro) em solos sódicos.

Parte significativa do N e S em solos agrícolas provém da matéria orgânica. Porém, para que o suprimento destes nutrientes seja contínuo é necessário que ocorra a mineralização da matéria orgânica e que esta esteja em quantidade suficiente para maior atividade microbiológica. As principais limitações de solos sódicos ou salino-sódicos, o excesso de sódio e o estresse osmótico, reduzem a população e a diversidade microbiana, afetando a mineralização da matéria orgânica (Setia et al., 2011; Mavi et al., 2012; Al-Busaidi et al., 2014; Wu et al., 2015). A nitrificação é completamente inibida em solo com PST > 7,0, portanto a manutenção de

**Tabela 6.** Efeito de resíduos orgânicos nos teores de nutrientes nas diferentes doses de gesso aplicadas em solo salino-sódico

| Gesso<br>Mg ha <sup>-1</sup> | Mat. org.<br>g vaso <sup>-1</sup> | Ca                                 | Mg   | K     | P     | Fe                  | Cu   | Zn   | Mn   |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------|-------|-------|---------------------|------|------|------|
|                              |                                   | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |      |       |       | µg cm <sup>-3</sup> |      |      |      |
| 0                            | 0                                 | 12,6a                              | 2,8a | 0,31a | 17,0a | 168a                | 2,6a | 4,1a | 115a |
|                              | 35                                | 12,8a                              | 2,8a | 0,35b | 26,3b | 170b                | 2,7a | 3,7a | 118a |
| 7                            | 0                                 | 14,3a                              | 2,5a | 0,26a | 16,1a | 167a                | 2,5a | 3,2a | 114a |
|                              | 35                                | 14,2a                              | 2,5a | 0,27a | 25,3b | 163a                | 3,0a | 3,8b | 116a |
| 14                           | 0                                 | 15,1a                              | 2,1a | 0,24a | 16,1a | 186a                | 3,6a | 3,7a | 118a |
|                              | 35                                | 16,0b                              | 2,0a | 0,32b | 25,7b | 205b                | 5,7b | 3,7a | 126b |
| 21                           | 0                                 | 17,1a                              | 1,9a | 0,23a | 13,9a | 167a                | 6,2a | 4,2a | 110a |
|                              | 35                                | 17,8a                              | 1,6b | 0,29b | 25,0b | 168a                | 6,3a | 4,1a | 116a |

Na vertical, números seguidos por letras distintas diferem a 0,05 de probabilidade pelo teste de Tukey; Fonte: Santos (1996)

baixas concentrações de Na<sup>+</sup> no solo é indispensável para que ocorra uma maior disponibilidade de N. Em geral, a capacidade dos cátions em estimular a mineralização do N orgânico diminui com o seu potencial iônico (Al<sup>3+</sup> > Fe<sup>3+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Na<sup>+</sup>). Assim, como ocorre em solos sódicos, quando o valor da RAS é aumentado, a contribuição de nutrientes via matéria orgânica é diminuída.

Resultados de Santos (1996) indicam aumento na disponibilidade de P extraído com resina catiônica e de outros nutrientes essenciais (Tabela 6) de um solo salino-sódico tratado com gesso e matéria orgânica oriundo da mucuna - preta (*Mucuna pruriens*).

#### Interação matéria orgânica e sodicidade

A matéria orgânica é conhecida como promotora da macroagregação do solo, melhorando suas propriedades físicas. Apesar dessa propriedade, os agentes cimentantes da matéria orgânica representados pelos polissacarídeos, correspondem a apenas ¼ da matéria orgânica. De fato, a matéria orgânica pode provocar tanto expansão quanto a dispersão quando aplicado nos solos, especialmente em solos sódicos que já apresentam um alto potencial dispersivo.

A literatura é conflitante quanto aos efeitos da matéria orgânica na dispersão de solos sódicos. A dispersão tem sido inversamente correlacionada com os conteúdos de matéria orgânica em solos sódicos com baixos valores de PST. Todavia, a adição de matéria orgânica aumenta a dispersão de argila em altos valores de RAS (Gupta et al., 1984). Oades (1984) estudando os mecanismos e as implicações da matéria orgânica no manejo do solo concluiu que a dispersão das partículas de argila nos microagregados é promovida pela complexação com ácidos orgânicos, os quais aumentam as cargas negativas na superfície das argilas.

O efeito dispersivo da matéria orgânica pode ser resposta da alta concentração de ácidos orgânicos (fúlvicos, húmicos, oxálicos, cítricos, tartárico) nas partículas do solo, conforme indicado nas etapas do processo a seguir:

- O alto percentual de ácidos orgânicos eleva a concentração de cargas negativas na dupla camada difusa (DCD), aumentando a distância entre as partículas sólidas; e,
- Os ânions orgânicos podem complexar o Fe<sup>3+</sup> e Al<sup>3+</sup> que exercem ação agregadora, contribuindo para a menor agregação do solo, mantendo a argila nos agregados mais susceptíveis à dispersão.

O efeito isolado do Na trocável em promover dispersão da matéria orgânica pode ser explicado, pelo menos em parte, pela ineficiência do sódio como cátion ligante, quando comparado com cátions polivalentes como o Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> e Fe<sup>3+</sup>. O cátion ligante une tanto as argilas com cargas negativas permanentes a grupos funcionais da matéria orgânica quanto os ânions orgânicos às cargas variáveis das argilas, quando estas são positivamente carregadas sob condições ácidas. Sem estes cátions, a agregação nos solos é reduzida.

Estudos sobre natureza das interações que ocorrem entre os sais solúveis e o Na trocável com os tipos de compostos orgânicos precisam ser incentivados e realizados, com vistas em verificar o potencial de uso de resíduos orgânicos em solos afetados por sais, bem como os efeitos destes sais na composição dos solos, contribuindo para o entendimento do comportamento físico e químico destes solos e para a implementação de técnicas de manejo com base científica (Freire & Freire, 2007).

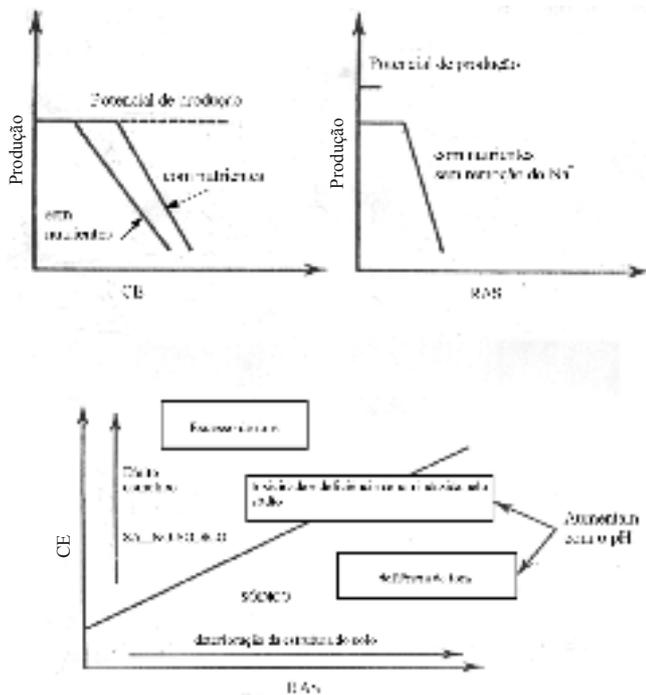
## MANEJO DA FERTILIDADE EM SOLOS HALOMÓRFICOS

### Necessidade de nutrientes e respostas das plantas

Os efeitos interativos da fertilidade-salinidade-sodicidade têm sido estudados apenas superficialmente. Os resultados tem sido contraditórios, dependendo da condição particular de cada estudo. Os efeitos osmóticos da alta concentração de sais são os mais prejudiciais em solos salino-sódicos (Figura 4). Em solos sódicos, a degradação estrutural é o fator primário que compromete diretamente as propriedades físico-hídricas do solo e, conseqüentemente, a disponibilidade de nutrientes.

Em solos salino-sódicos, quando a concentração de Na aumenta, a necessidade de nutrientes no substrato pode também ser aumentada. Caso a cultura não seja sensível aos sais e o nível de salinidade seja moderado, o estresse osmótico pode ser compensado pela aplicação de fertilizantes. Porém, a produção vegetal aumenta devido a aplicação de fertilizantes até um certo nível de CE na solução do solo (Figura 4), provavelmente até valor próximo à salinidade limiar da cultura.

Muitos estudos demonstram que as respostas das plantas aos biofertilizantes ou de fertilizantes minerais diminuem com o aumento da salinidade (Lacerda, 2005; Lacerda et al., 2006a; Silva et al., 2011). Em outras palavras, os resultados



Adaptado de Naidu & Rengasamy (1993)

**Figura 4.** Mecanismos que explicam o efeito prejudicial da condutividade elétrica (CE) e da relação de adsorção de sódio (RAS) na disponibilidade de nutrientes

evidenciam que o uso de adubos orgânicos ou minerais aumenta a disponibilidade de nutrientes e a resposta da planta será maior quanto mais pobre é o solo e será menor em níveis elevados de salinidade (Grattan & Grieve, 1999; Lacerda et al., 2016).

Por outro lado, a indisponibilidade de nutrientes em solos sódicos é causada indiretamente por efeitos físicos prejudiciais, tais como o reduzido transporte de água e nutrientes. No entanto, é importante ressaltar que, para a aplicação de fertilizantes proporcionar aumentos à produção das culturas é necessário que a correção das propriedades físicas, para solos sódicos, e a lixiviação do excesso de sais solúveis, para os solos salinos, sejam efetuadas. A tendência esperada é que as respostas à fertilização do solo sejam menos expressivas em plantas estressadas em comparação às plantas sob condições normais de cultivo (Lacerda et al., 2005).

A deficiência de nutrientes e a toxicidade de íons ocorrem tanto em solos salinos quanto em sódicos. Todavia, os mecanismos do efeito prejudicial no crescimento das plantas em solos sódicos diferem dos solos salinos. A fertilidade dos solos sódicos depende (1) da presença de água, oxigênio e nutrientes na forma iônica; (2) da capacidade do solo em liberar oxigênio e nutrientes por fluxo em massa e difusão para a superfície das raízes; (3) da presença de uma composição iônica favorável e (4) da ausência de substâncias que reduzam o movimento de nutrientes para as raízes. O fornecimento de água, oxigênio e nutrientes para as raízes em solos sódicos é restringida pela deterioração da estrutura do solo causada pela sodicidade. A elevada concentração de  $\text{Na}^+$  nesses solos, em relação à de  $\text{Ca}^{2+}$ , é a maior causa dos

problemas físicos e de disponibilidade de nutrientes. Dessa forma, a correção da sodicidade deve ser o primeiro passo a ser adotado visando o aumento da produtividade dos solos sódicos, reduzindo o pH que em geral é superior a 9,0 para valores abaixo de 8,0. Nesse sentido, a liberação de  $\text{H}^+$  no sistema através da mineralização da matéria orgânica e reações de transformações do N podem adequar o pH do solo para valores compatíveis à produção das plantas.

**Fertilização e nutrição mineral**

Em revisão sobre a interação salinidade e a absorção de nutrientes em hortícolas, Grattan & Grieve (1999) afirmam que a adequada nutrição mineral depende intensamente da fertilidade e conseqüentemente do balanço iônico da solução do solo. A relação entre a salinidade e a nutrição mineral em hortícolas é muito complexa e a melhor compreensão dessa interação exige um grupo multidisciplinar de cientistas. O crescimento das culturas pode ser inibido pela salinidade e seus efeitos na nutrição, tais como, diminuição na disponibilidade de nutrientes, competitividade na absorção, transporte ou redistribuição de nutrientes. Nesse contexto, pouca atenção tem sido dada ao sulfato nos aspectos nutricionais das plantas em solos degradados por sais. O enxofre é um nutriente importante na dinâmica da fertilidade-salinidade, por ser adicionado durante a correção de solos salino-sódicos e sódicos como gipsita moída, gesso agrícola, fosfogesso, ácido sulfúrico ou enxofre elementar, elevando a concentração de eletrólitos e a concentração aniônica na solução do solo. Apesar dos efeitos positivos dessas adições, auxiliando na correção do solo e aumentando a disponibilidade de sulfato, também se verifica reflexos negativos na absorção do molibdênio.

Os efeitos dos sais da solução do solo nas plantas são geralmente dispostos em três categorias: (1) limitação na absorção de água, (2) deficiências de nutrientes e (3) excesso de elementos não essenciais às plantas. A primeira influência refere-se à redução do potencial osmótico da solução e a baixa disponibilidade de água para as plantas; os outros dois referem-se ao 'efeito iônico não específico'. A toxicidade de íons refere-se ao aumento na concentração de elementos provocando redução na produção devido ao desbalanceamento na disponibilidade de um ou outro nutriente, resultando em deficiências nutricionais. Deve-se deixar claro que o nutriente tem uma 'dose resposta', expressa por uma 'curva resposta', fato que não ocorre com os elementos tóxicos. A adequada nutrição mineral das plantas nos solos salinizados depende de um ajuste dos atributos químicos e físicos dos solos e de um balanço de nutrientes durante os processos de absorção, uma vez que há uma interação natural entre os elementos essenciais: nos sítios de absorção há competição entre o nitrato e cloreto e o amônio reduz a absorção de cálcio e magnésio; quanto ao fósforo os resultados têm sido conflitantes (Grattan & Grieve, 1999; Lacerda et al., 2006a; 2006b; Sousa et al., 2010).

A fertilização na forma líquida atenua os efeitos depressivos da salinidade mais que a sólida, no que se refere a produção de frutos de tomateiro cultivado em solo 'não

salino' salinizado. Os fertilizantes sólidos foram nitrato de amônio superfosfato e sulfato de potássio, aplicados nas doses de 49 kg ha<sup>-1</sup> de N, 62 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 30 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, respectivamente; quanto a líquida foi composta por uma mistura de ácido fosfórico, sulfato de potássio e ácido nítrico, aplicados em igual dosagem (Soliman & Doss, 1992).

Abaixo são apresentadas algumas informações específicas sobre aplicação de nutrientes essenciais, com ênfase no nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio.

**Nitrogênio**

O nitrogênio nas formas nítrica (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), amoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ou gasosa (N<sub>2</sub>), corresponde em torno de 80% do nutriente mineral absorvido pelas plantas. Evidentemente o seu emprego adequado no solo frequentemente aumenta a produção vegetal, em ambiente salino ou não, e acredita-se que o nitrogênio reduz os efeitos prejudiciais, em certa extensão da salinidade do solo. Resultados recentes, no entanto, mostram que a resposta ao nitrogênio sob condições de salinidade não apresenta a mesma eficiência que em condições não salinas; além disso, aplicações de elevadas doses de N em ambientes salinos pode resultar no aumento das perdas por lixiviação e posterior contaminação do lençol freático (Lacerda et al., 2016).

Há um grande número de informações referentes à interação nitrogênio-salinidade em algumas culturas como algodão (*Gossypium hirsutum*), cenoura (*Daucus carota*), espinafre (*Spinacia oleracea*), feijão (*Phaseolus vulgaris*), feijão caupi (*Vigna unguiculata*), girassol (*Helianthus annuus*), macieira (*Malus domestica*), mamoneira (*Ricinus communis*), maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis*), milho (*Zeamays*), tomate (*Solanum lycopersicum*) e outras. Em geral as respostas mais promissoras são observadas quando a salinidade é baixa. A presença de elevadas concentrações de Cl reduz a absorção e acumulação de nitrato nas plantas, podendo resultar em deficiência de N nos tecidos vegetais. Alguns acreditam, inclusive, que podem reverter esse efeito aumentando-se a dose de nitrato no meio. Isso, no entanto, pode resultar em contaminação ambiental (Lacerda et al., 2016) e na redução de competitividade e do retorno econômico da produção (Feitosa et al., 2016).

Em função da baixa fertilidade dos solos sódicos a salino-sódicos, a cultura tem o suprimento de N deficiente e este deve ser suplementado através de fertilizantes. Dentre as fontes de N, a ureia é a mais frequentemente usada. Quando a ureia é hidrolisada há a produção de amônia e CO<sub>2</sub> pela enzima urease e nessas condições há perdas de N pela volatilização da amônia. Esse processo é mais intenso em solos com pH elevado, característica típica de solos sódicos ou salino-sódicos. O aumento do pH provoca maior volatilização da NH<sub>3</sub> da ureia ou de outras fontes (Fenn & Kissel, 1973), e nesses casos deve-se procurar alternativas que minimizem essas perdas. A aplicação de fontes ácidas, como o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ou de reação ácida como a pirita (FeS<sub>2</sub>), a incorporação do fertilizante a maiores profundidades ou seu parcelamento em três ou quatro aplicações são práticas recomendáveis.

Foram aplicados 150 kg ha<sup>-1</sup> N e 37,5 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em

trigo cultivado em solução salina e constatou-se que ocorreu efeito positivo do nitrogênio e fósforo na fase de enchimento dos grãos (Soliman et al., 1994) (Tabela 7).

Por influírem na reação do solo e, portanto, em sua fertilidade, devem-se aplicar outras fontes nitrogenadas. Por exemplo, a solução saturada que se produz na “zona do fertilizante” é alcalina quando se aplica fosfato diamônico (pH = 7,98; 3,82 mol L<sup>-1</sup> P) e é ácida para o monoamônico (pH = 3,47; 2,87 mol L<sup>-1</sup> P); assim, é favorável o uso desta fonte em solos sob condições alcalinas. Os produtos resultantes da reação de fertilizantes em solos sódicos calcários pode ser um parâmetro para se escolher a fonte a ser usada, segundo mostram as reações do sulfato de amônio, fosfato diamônico (Figura 5) e nitrato de amônio (Figura 6).

A precipitação dos produtos pouco solúveis resultantes da reação do sulfato de amônio e do fosfato diamônico acelera a reação e a intensidade de perdas de NH<sub>3</sub>. Por outro lado, a formação de produtos solúveis, no caso do NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> evita a precipitação, cessando a liberação de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> para a solução do solo quando esta atinge alta concentração.

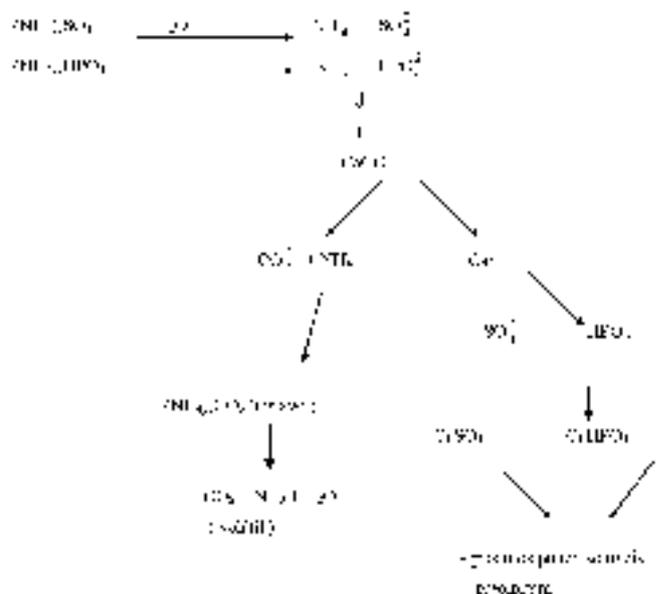
As perdas de nitrogênio, em forma de NH<sub>3</sub>, após a aplicação de fontes nitrogenadas em solos com excesso de sódio variam expressivamente entre os solos: 87% a pH 10,5 (Jewitt, 1942), ou de 30 a 65% na mesma faixa de pH (Rao & Batra, 1983).

As taxas de volatilização e as perdas de N podem ser

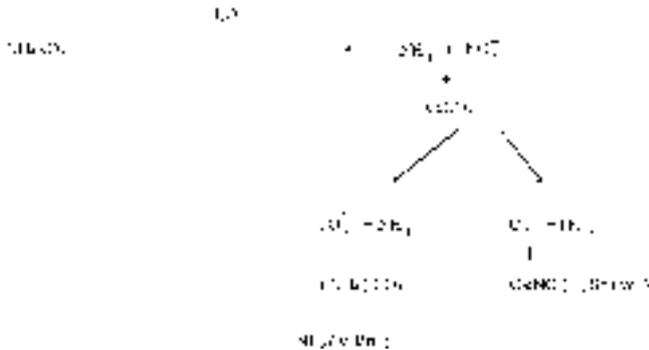
**Tabela 7.** Interação da salinidade e doses de N e P na produção de grãos de trigo

| Salinidade<br>dS m <sup>-1</sup> | N0P0                   | N0P1 | N1P0 | N1P1 |
|----------------------------------|------------------------|------|------|------|
|                                  | g planta <sup>-1</sup> |      |      |      |
| 0,5                              | 3,10                   | 3,23 | 3,47 | 3,54 |
| 4,0                              | 2,65                   | 2,80 | 2,93 | 3,02 |
| 8,2                              | 1,82                   | 1,91 | 2,14 | 2,26 |
| 12,5                             | 1,44                   | 1,52 | 1,70 | 1,78 |
| LSD                              | 0,09                   |      |      |      |

0 = omissão; 1 = presença; Fonte: Soliman et al. (1994)



**Figura 5.** Reação do sulfato de amônio e fosfato diamônico em um solo sódico calcário



**Figura 6.** Reação do nitrato de amônio em um solo sódico calcário

substancialmente reduzidas ( $\cong 90\%$ ) se o fertilizante for aplicado na profundidade de 6 a 7 cm do solo, e em torno de 10 cm para a cultura do arroz. A incorporação de resíduos orgânicos pode também compensar as possíveis perdas do nitrogênio. As doses de 60 g planta<sup>-1</sup> de nitrogênio e 60 g planta<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de fósforo em solo sódico (PST = 20%, pH 8,9), elevaram a produção de flores (Katiyar et al., 1999).

**Fósforo**

A interação entre salinidade e nutrição de fósforo é igualmente complexa como a de nitrogênio, e depende da espécie vegetal, estágio de crescimento das plantas, composição, nível de salinidade e da concentração de fósforo no substrato. Os resultados de pesquisa da interação fósforo-salinidade têm sido conflitantes, ou seja, a salinidade tem aumentado a absorção de fósforo, reduzido ou não apresentado efeito (Marschner, 1995).

A interação salinidade-fertilidade em milho e algodão evidenciaram melhor efeito da fertilização fosfatada nos índices mais baixos de salinidade. No algodão a produção foi maior em solo com menor salinidade e maior dose de nitrogênio (Khalil et al., 1967). A Tabela 8 apresenta os valores para a cultura do milho.

Champagnol (1979) em revisão sobre o tema salinidade-fertilidade mostra a relação entre a nutrição fosfatada e a toxicidade dos sais nas plantas. O autor observou efeito positivo em 34 das 37 espécies estudadas, recomendando inclusive uma aplicação moderada de fertilizantes solúveis (nitratos, cloretos, sulfatos) para reduzir o aumento na concentração de sais na solução do solo e o risco no aumento da toxicidade às plantas. Para o trigo, os sintomas visuais da toxicidade de sais foram minimizados com a aplicação de fósforo em experimento com aplicação de doses crescentes de NaCl, em solo não salino (Gibson, 1985).

Apesar de existir, segundo a literatura, uma maior

**Tabela 8.** Teores de fósforo no milho em diferentes salinidades

| Superfosfato<br>g vaso <sup>-1</sup> | Condutividade elétrica (dS m <sup>-1</sup> ) |        |       |       |
|--------------------------------------|--|--------|-------|-------|
|                                      | 1,6  | 5,0    | 7,0   | 9,0   |
|                                      | mg P vaso <sup>-1</sup>                      |        |       |       |
| 0,0                                  | 126,8  | 136,10 | 126,0 | 117,3 |
| 2,5                                  | 151,3  | 112,40 | 108,7 | 113,4 |
| 5,0                                  | 155,31                                       | 123,80 | 134,0 | 140,0 |
| 7,0                                  | 168,6  | 144,70 | 129,2 | 108,0 |

Fonte: Khalil et al. (1967)

concentração de fósforo disponível com o aumento da sodicidade e dos níveis de CaCO<sub>3</sub> nos solos, Chhabra et al. (1981) relatam que o fósforo extraído pelo método de Olsen reduziu-se à medida que a dose de gesso aplicada ao solo foi aumentada. O gesso em solos salino-sódicos de origem aluvial tem provocado redução nos teores de fósforo disponível (Santos, 1995). Isso apesar destes solos apresentarem teores totais de P elevados (547 mg cm<sup>-3</sup>).

A aplicação de esterco e palha de arroz em solo sódico aumentou o teor de Fe, Mn e P. A disponibilidade de fósforo no solo foi maior com a aplicação de esterco e palha de arroz, superior ao gesso (Swarup, 1982). O fósforo extraído por Olsen (0,5 M NaHCO<sub>3</sub> pH 8,5) decresceu na seguinte ordem: controle > esterco > palha de arroz > gesso. A formação de fosfatos orgânicos como fosfolípidios e fosfoproteínas pode ter elevado tal disponibilidade. Em dados obtidos de plantas desenvolvidas em solução nutritiva o fósforo aumentou a tolerância do tomateiro à salinidade e os autores associam a um aumento na turgescência das células proporcionado pela adição de fósforo na forma de ácido fosfórico (Tabela 9). (Awad et al., 1990). Por outro lado, Lacerda et al. (2006a) verificaram aumento no teor de P em plantas de sorgo sob estresse salino, porém isso não significou aumento na tolerância à salinidade, sendo apenas o resultado do efeito de concentração.

A indisponibilidade de fósforo em solos sódicos corrigidos com gesso pode estar associada a formação de fosfatos de cálcio insolúveis, que precipitam na solução do solo com altos valores de pH. A aplicação de corretivo químico nesse tipo de solo exige a adoção de práticas que reduzam a precipitação do fósforo. Em solo salino-sódico a aplicação de ácido fosfórico aumenta a disponibilidade de fósforo (Tabela 10). Plântulas de arroz cultivadas em solos sódicos fertilizados com fósforo

**Tabela 9.** Efeito do NaCl na concentração de P nas folhas de idade mediana de tomateiro

| NaCl<br>mM | Concentração de P na solução (µM) |     |     |
|------------|-----------------------------------|-----|-----|
|            | 0,1                               | 1,0 | 10  |
|            | g kg <sup>-1</sup>                |     |     |
| 10         | 1,8                               | 3,2 | 4,8 |
| 50         | 1,5                               | 2,9 | 4,3 |
| 100        | 1,4                               | 2,5 | 4,0 |
| LSD        | 0,2                               |     |     |

Adaptado de Awad et al. (1990)

**Tabela 10.** Efeito das doses de fósforo na quantidade de nutrientes absorvidos pelo feijoeiro vigna cultivado em solo salino-sódico

| Nutrientes | Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> ) |         |
|------------|--------------------------------|---------|
|            | 0                              | 200     |
|            | mg vaso <sup>-1</sup>          |         |
| N          | 64,37a                         | 181,93b |
| P          | 5,01a                          | 31,28b  |
| K          | 82,86a                         | 144,98b |
| Ca         | 67,52a                         | 222,46b |
| Mg         | 10,42a                         | 34,80b  |
| S          | 7,48a                          | 24,44b  |

Médias seguidas por letras distintas, nas linhas, diferem a 5% pelo teste de Tukey; Fonte: Qadar (1998)

apresentaram maior crescimento radicular. A maior absorção de fósforo e potássio restringiu a absorção de sódio e levou as plantas até a maturidade (Qadar, 1998).

**Potássio**

Em solos salino-sódicos ou sódicos, a alta concentração de sódio na solução do solo, não apenas interfere na absorção de potássio pelas raízes, mas também pode deformar a membrana das células das raízes e prejudicar a seletividade. De modo geral, a concentração de K<sup>+</sup> nas plantas em ambientes salinos tende a ser menor com o aumento do Na<sup>+</sup> ou da relação Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> na solução do solo.

A disponibilidade de potássio em solos salino-sódicos ou sódicos, em geral, é adequada, pela predominância de micas em solos de regiões áridas e semiáridas, as trocas Na-K observadas na biotita, e a dissolução das unidades estruturais das muscovitas, liberam potássio sob condições com excesso de sódio.

Hu & Schmidhalter (1997) estudaram o crescimento do trigo, em experimento de hidroponia, em soluções com concentrações crescentes de NaCl (0, 30, 60, 90, 120 e 150 mM) e constataram que, ao contrário das folhas e ramos, os grãos apresentaram um aumento na concentração de Na e Cl, e redução na de Ca, Mg e K com aumento da salinidade. Nas folhas e ramos o Na e Cl aumentaram significativamente com o aumento da concentração de sais na solução.

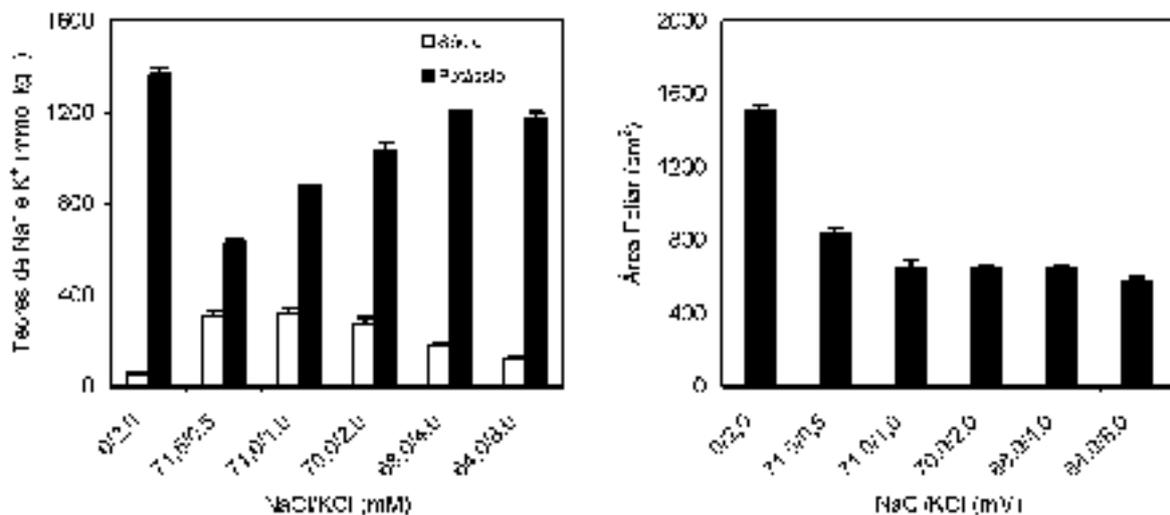
Muitos autores têm correlacionado a tolerância à salinidade com a manutenção de uma adequada nutrição potássica (Taleisnik & Grunberg, 1994), podendo a relação Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> ser utilizada como critério de seleção de materiais sensíveis e tolerantes ao estresse salino. Na realidade alguns autores têm observado a existência de múltiplos sistemas de absorção com diferentes seletividades para K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> o que pode refletir a necessidade da planta para coordenar o influxo desses cátions (Schachtman & Liu, 1999). Particularmente nos casos de plantas de sorgo e de feijão-de-corda tem sido observado que a sensibilidade à salinidade está relacionada

com o maior acúmulo de Na<sup>+</sup> e maior relação Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> nos tecidos foliares (Lacerda et al., 2003a; Costa et al., 2003). Entretanto, a redução no teor de Na<sup>+</sup> e o aumento do teor de K<sup>+</sup> nas folhas, provocados pelo aumento na concentração de K<sup>+</sup> na solução nutritiva, não resultou em maior tolerância ao estresse salino nem das plantas de sorgo (Figura 7) nem das plantas de feijão-de-corda (dados não mostrados). Esses resultados sugerem que as respostas de crescimento podem estar associadas com a tolerância diferencial aos efeitos osmóticos dos sais e, ou aos teores de Cl<sup>-</sup> nos tecidos foliares.

**Cálcio**

A sodicidade não apenas reduz a disponibilidade de cálcio, mas também o seu transporte e redistribuição nas plantas, afetando negativamente os órgãos vegetativos e reprodutivos. Dessa forma, a salinidade pode afetar diretamente a absorção de nutrientes: o Na<sup>+</sup> reduz a absorção de K<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> e de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Além disso, alta concentração de cálcio reduz a concentração de magnésio nas folhas.

As respostas à aplicação de Ca<sup>2+</sup> resultam em aumento no grau de tolerância em muitas espécies, principalmente quando se comparam relações Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> muito contrastante (Epstein, 1998). De acordo com Epstein & Bloom (2006), o cálcio é essencial para a integridade da membrana plasmática das células vegetais, e sua deficiência pode levar a perda da integridade da membrana, afetando desta forma a absorção de íons, principalmente o K. Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram, entretanto, que a redução da relação Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> nos tecidos foliares e radiculares não resultou em nenhum benefício para o crescimento vegetativo de plântulas de sorgo. Isso ocorre por que o aumento na concentração de Ca<sup>2+</sup> no meio de nutrição não afeta igualmente o crescimento vegetativo e os processos de absorção de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> (Reid & Smith, 2000; Guimarães et al., 2012), ou seja, o aumento da concentração de Ca<sup>2+</sup> na solução nutritiva pode reduzir a absorção de Na<sup>+</sup> e aumentar a absorção de K<sup>+</sup> e a do próprio cálcio, sem necessariamente favorecer o crescimento.



Fonte: Lacerda et al. (2003b)

**Figura 7.** Teores foliares de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> e crescimento foliar em plantas de sorgo forrageiro cultivadas em solução nutritiva contendo soluções iso-osmóticas de NaCl e KCl, em diferentes combinações

**Tabela 11.** Relação Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> em folhas e raízes e crescimento de plântulas de dois genótipos de sorgo, sob duas concentrações de Ca<sup>2+</sup>, submetidos ou não a estresse salino<sup>1</sup>

| NaCl | Folhas                                  |                       | Raízes                |                       |
|------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|      | Ca <sup>2+</sup> 0,65                   | Ca <sup>2+</sup> 2,60 | Ca <sup>2+</sup> 0,65 | Ca <sup>2+</sup> 2,60 |
|      | (mM)                                    |                       |                       |                       |
|      | Relação Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup> |                       |                       |                       |
| 0    | 0,10 bA                                 | 0,07 bA               | 0,13 bA               | 0,12 bA               |
| 100  | 1,99 aA                                 | 1,37 aB               | 1,54 aA               | 0,97 aB               |
|      | Matéria seca (g) <sup>1</sup>           |                       |                       |                       |
| 0    | 0,364 aA                                | 0,384 aA              | 0,209 aA              | 0,188 aA              |
| 100  | 0,215 bA                                | 0,227 bA              | 0,179 bA              | 0,160 bA              |

<sup>1</sup> Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na coluna (níveis de NaCl) e pelas mesmas letras maiúsculas na linha (níveis de Ca<sup>2+</sup>), não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, com P ≤ 0,05. Fonte: Lacerda et al. (2004)

Aparentemente, os efeitos benéficos do Ca<sup>2+</sup> na redução da toxicidade do Na<sup>+</sup> e na nutrição de cálcio e potássio podem ser sobrepujados pelos efeitos osmóticos associados com o aumento da concentração total de sais.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Procurou-se abordar nesse capítulo a dinâmica de nutrientes em solos afetados por sais, uma vez que a literatura apresenta uma lacuna nesse tema, sendo observada predominância de investigações acerca da caracterização de atributos físicos e químicos, gênese e a classificação desses solos, bem como a variabilidade espacial e mapeamento. Há uma carência de pesquisas que avaliem a dinâmica de nutrientes, especialmente de fósforo e nitrogênio, já que os demais cátions como cálcio, magnésio, sódio e potássio estão presentes com maior intensidade nos solos afetados por sais. De qualquer modo o que é necessário se pesquisar, além da concentração, seja na solução do solo ou na fase trocável são as relações desses nutrientes e aspectos de disponibilidade dos mesmos. É mais comum encontrar estudos que avaliem as relações de cálcio com sódio, já que o principal corretivo utilizado para correção do solo sódico é o gesso, com predomínio de cálcio. Fazendo um paralelo com os solos de reação ácida, o manejo ocorre com a correção utilizando-se o calcário para elevação do pH, mas é clara a necessidade de uma adubação adequada após essa prática. Já em solos afetados por sais, muito se vê sobre estudos de correção, mas a fase posterior de adequação e balanceamento dos nutrientes ainda são incipientes os estudos. A ocorrência dos solos afetados por sais, principalmente em regiões semiáridas do Nordeste, associado à falta de interesse político para a recuperação de solos afetados por sais são entraves para a incorporação desses solos à produção agrícola. De qualquer modo, levando-se em consideração a grande área de solos afetados por sais e a necessidade de produção agrícola, faz-se necessário estudos que abordem, além da correção, a dinâmica de um manejo nutricional adequado.

### LITERATURA CITADA

- Al-Busaidi, K. T. S.; Buerkert, A.; Joergensen, R. G. Carbon and nitrogen mineralization at different salinity levels in Omani low organic matter soils. *Journal of Arid Environments*, v.100-101, p.106-110, 2014.
- Awad, A. S.; Ewards, D. G.; Campbell, L. C. Phosphorus enhancement of salt tolerance of tomato. *Crop Science*, v.30, p.123-128, 1990.
- Benbouali, E. H.; Hamoudi, S. A. E. A.; Larich, A. Short-term effect of organic residue incorporation on soil aggregate stability along gradient in salinity in the lower Cheliff plain (Algeria). *African Journal of Agricultural Research*, v.8, p.2144-2152, 2013.
- Champagnol, F. Relationships between phosphate nutrition of plants and salt toxicity. *Phosphorus in Agriculture*, v.1, p.35-43, 1979.
- Chhabra, R.; Abrol, I. P.; Singh, M. V. Dynamics of phosphorus during reclamation of sodic soil. *Soil Science*, v.132, p.319-324, 1981
- Costa, P. H. A.; Silva J. V.; Bezerra, M. A.; Enéas-Filho, J.; Prisco, J. T.; Gomes-Filho, E. Crescimento e níveis de solutos orgânicos e inorgânicos em cultivares de *Vigna unguiculata* submetidos à salinidade. *Revista Brasileira de Botânica*, v.26, p.289-297, 2003.
- Costa Silva, M. C.; Santos, R. V.; Bastos, P. M. Efeito do ácido sulfúrico no pH de um solo salino sódico. In: Encontro de Iniciação Científica, 5, 1997, João Pessoa. Resumos... João Pessoa. 1997. p.130.
- Epstein, E. How calcium enhances plant salt tolerance. *Science*, v.280, p.1906-1907, 1998.
- Epstein, E.; Bloom, A. J. Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas. Londrina: Planta, 2006. 403p.
- Fassbender, H.W.; Bornemista, E. Química de suelos, com enfaixis em suelos as América Latina. 2.ed. San José: IICA, 1987. 420p.
- Feitosa, H. O.; Lacerda, C. F.; Carvalho, C. M.; Costa, R. N. T.; Barbosa, A. B.; Gheyi, H. R. Productivity and economic analysis of sunflower/maize crop rotation under different levels of salinity and nitrogen. *African Journal of Agricultural Research*, v.11, p.1999-2006, 2016.
- Fenn, L. B.; Kissel, D. E. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. I. General theory. *Soil Science Society of America*, v. 37, p. 855-859, 1973.
- Ferreira, R. C.; Menezes Jr, J. C. de.; Santos, R. V.; Farias Jr. Efeito de doses de ácido fosfórico na melhoria química de um solo salino-sódico e na produção do *Pennisetum glaucum* L. In: Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 2 e Simpósio Brasileiro sobre o Uso Múltiplo de Água, 1, 2008a, Fortaleza. Resumo expandido...Fortaleza, 2008a. p.502.
- Ferreira, R. C.; Menezes Jr, J. C. de; Santos, R. V.; Farias Jr. Melhoria química de um solo salino-sódico tratado com gesso, ácido sulfúrico e fósforo cultivado com *Pennisetum glaucum* L. In: Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 2 e Simpósio Brasileiro sobre o Uso Múltiplo de Água, 1, 2008b, Fortaleza. Resumo expandido...Fortaleza, 2008b. p.502.
- Freire, A. L. O.; Sousa Filho, G. M.; Miranda, J. R. P.; Souto, P. C. Araújo, L. V. C Crescimento e nutrição mineral do nim

- (*Azadirachta indica* a. juss.) e cinamomo (*Melia azedarach* Linn.) submetidos à salinidade. *Ciência Florestal*, v.20, p.207-215, 2010.
- Freire, M. B. G. dos S.; Freire, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solo afetado por sais. In: Fertilidade do solo. Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. (ed.) Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.929 – 954.
- Gibson, T. S. Carbohydrate metabolism and phosphorus/salinity interactions in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil*, v.111, p.25-35, 1988.
- Grattan, S. R.; Grieve, C. M. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulture*, v.78, p.127-157, 1999.
- Guimarães, F. V. A.; Lacerda, C. F.; Marques, E. C.; Abreu, C. E. B.; Aquino, B. F.; Prisco, J. T.; Gomes-Filho, E. Supplemental Ca<sup>2+</sup> does not improve growth but it affects nutrient uptake in NaCl-stressed cowpea plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v.24, p.9-18, 2012.
- Gupta, R. K.; Abrol, I. P. Salt-affected soils: Their reclamations and management for crop production. *Advances in Soil Science*, v.11, p.224-288, 1990.
- Gupta, R. K.; Bhumbra, D. K., Abrol, I. P. Effect of sodicity, pH, organic matter, and calcium carbonate on the dispersion behaviour of soils. *Soil Science*, v.137, p. 245-251, 1984.
- Gupta, R. K.; Chhabra, R.; Abrol, I. P. Relationship between pH and exchangeable sodium in a sodic. *Soil Science*, v.139, p.312-319, 1981.
- Hu, Y.; Oertli, J. J.; Schmidhalter, U. Interactive effects of salinity and macronutrient level on wheat. I. Growth. *Journal of Plant Nutrition*. v.20, p.1155-1167, 1997.
- Jewitt, T. N. Loss of ammonia from ammonium sulphate applied to alkaline soils, *Soil Science*, v.54, p.401-409, 1942.
- Kampf, N.; Curi, N.; Marques, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: Melo, V. de F.; Alleoni, L. R. F. (ed) Química e mineralogia do solo. Parte I. Conceitos Básicos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.333-379.
- Katiyar, R. S.; Ram, B.; Singh, C. P. Effect of N and P on growth and flower production in rose on sodic soils. *Indian Journal Horticulture*. v.56, p.86-87. 1999.
- Khalil, M. A.; Amar, F.; Elgabaly, M. M. A salinity-fertility study on corn and cotton. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.31, p.683-686, 1967.
- Lacerda, C. F. Interação salinidade x nutrição mineral. In: Nogueira, R. J. C.; Araújo, E. L.; Willadino, L. G.; Cavalcante, U. (ed.) Estresses ambientais: Danos e benefícios às plantas. Recife: UFRPE, 2005. p.127-137.
- Lacerda, C. F.; Assis Júnior, J.O.; Lemos Filho, L. C. A.; Guimarães, F. V. A.; Oliveira, T. S.; Gomes Filho, E.; Prisco, J. T.; Bezerra, M. A. Morpho-physiological responses of cowpea leaves to salt stress. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v.18, p.455 - 465, 2006b.
- Lacerda, C. F.; Cambraia, J.; Oliva, M. A.; Ruiz, H. A. Influência do cálcio sobre o crescimento e solutos em plântulas de sorgo estressadas com cloreto de sódio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.289-295, 2004.
- Lacerda, C. F.; Cambraia, J.; Oliva, M. A.; Ruiz, H. A.; Prisco, J. T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, v.49, p.107-120, 2003a.
- Lacerda, C. F.; Ferreira, J. F. S.; Liu, X.; Suarez, D. L. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v.202, p.192-202, 2016.
- Lacerda, C. F.; Morais, H. M. M.; Prisco, J. T.; Gomes Filho, E.; Bezerra, M. A. Interação entre salinidade e fósforo em plantas de sorgo forrageiro. *Revista Ciência Agronômica*, v.37, p.258-263, 2006a.
- Lacerda, C. F.; Oliveira, H. P. M.; Oliveira, T. S.; Gomes-Filho, E. Crescimento e acúmulo de íons em folhas de sorgo forrageiro submetido a soluções iso-osmóticas de sais (NaCl + KCl). *Revista Ciência Agronômica*, v.34, p.1-6, 2003b.
- Lacerda, C. F.; Silva, F. B.; Neves, A. L. R.; Silva, F. L. B.; Gheyi, H. R.; Ness, R. L. L.; Gomes Filho, E. Influence of plant spacing and irrigation water quality on a cowpea-maize cropping system. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, v.1, p.163-167, 2011
- Leite, E. M.; Cavalcante, L. F.; Diniz, A. A.; Santos, R. V.; Alves, G. da S.; Cavalcante, I. H. L. Correção da sodicidade de dois solos irrigados em resposta à aplicação de gesso agrícola. *Irriga*, v.12, p.168-176. 2007.
- Lindsay, W. Chemical equilibria in soils. New York: John Wiley, 1979. 449p.
- Lopes, A. S. Manual de fertilidade do solo. São Paulo: ANDA/POTAFOS, 1989. 153p.
- Marschner, H. Mineral nutrition of higher plants. 2. ed. London: Academy Press, 1995, 889p.
- Mavi, M. S.; Marschner, P.; Chittleborough, D. J.; Cox, J. W.; Sanderman, J. Salinity and sodicity affect soil respiration and dissolved organic matter dynamics differentially in soils varying in texture. *Soil Biology & Biochemistry*, v.45, p.8-13, 2012
- Mellek, J. E.; Dieckow, J.; Silva, W. L.; Favaretto, N.; Pauletti, V.; Vezzani, F. M.; Souza, J. L. M. Dairy liquid manure and no-tillage: Physical and hydraulic properties and carbon stocks in a Cambisol of Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 110, p.69-76, 2010.
- Naidu, R.; Rengasamy, P. Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils. *Australian Journal of Soil Research*, v.31, p.801-819, 1993.
- Nitant, H. C. ; Bhumbra, D. R. Urea transformations in salt affected and normal soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, v.22, p.234-239, 1974.
- Oades, J. M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, v.76, p.319-337, 1984.
- Qadar, A. Alleviation of sodicity stress on rice genotypes by phosphorus fertilization. *Plant and Soil*, v.203, p.269-277, 1998.
- Raij, B. van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.
- Rao, D. L. N.; Batra, L. Ammonia volatilizations from applied nitrogen in alkali soils. *Plant and Soil*, v.70, p.219-228, 1983.
- Reid, R. J.; Smith, A. The limits of sodium/calcium interactions in plant growth. *Australian Journal Plant Physiology*, v.27, p.709-

- 715, 2000.
- Rengasamy, P., Olsson, K. A. Sodicity and soil structure. Australian Journal of Soil Research, v.29, p.935-952, 1991.
- Ribeiro, M. R.; Barros, M. F. C.; Freire, M. B. G. dos. Química dos solos salinos e sódicos. In: Melo, V. de F.; Alleoni, I. R. F. (ed.) Química e mineralogia do solo. Viçosa: SBCS, 2009, v. 2., Cap. 2, p.449-484.
- Sall, S. N.; Ndour, N. Y. B.; Diédhiou-Sall, S.; Dick, R.; Chotte, J. L. Microbial response to salinity stress in a tropical sandy soil amended with native shrub residues or inorganic fertilizer. Journal of Environmental Management, v.161, p.30-37, 2015.
- Santos, P. M.; Rolim, M. M.; Duarte, A. S.; Barros, M. F. C.; Silva, E. E. F. Uso de resíduos de gesso como corretivo em solo salino-sódico. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 44, p.95-103, 2014.
- Santos, R. V. dos. Correção de um solo salino-sódico e absorção de nutrientes pelo feijoeiro vigna (*Vigna unguiculata* (L.) WALP). Piracicaba: USP, 1995. 120p. Tese Doutorado
- Santos, R. V. dos. Correção de um solo salino-sódico: Absorção de macronutrientes pelo feijoeiro. In : Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 22, 1996, Manaus. Resumo...Manaus: SBCS, 1996. CDRom
- Schachtman, D.; Liu, W. Molecular pieces to the puzzle of the interaction between potassium and sodium uptake in plants. Trends Plant Science, v.4, p.281-287, 1999.
- Setia, R.; Marschner, P.; Baldock, J.; Chittleborough, D.; Smith, P.; Smith, J. Salinity effects on carbon mineralization in soils of varying texture. Soil Biology & Biochemistry, v.43, p.1908-1916, 2011.
- Sharpley, A. N.; Curtin, D.; Syers, J. K. Changes in water-extractability of soil inorganic phosphate induced by sodium saturation. Soil Science Society of America Journal, v.52, p.637-640, 1988.
- Silva, F. L. B.; Lacerda, C. F.; Sousa, G. G.; Neves, A. L. R.; Silva, G. L.; Sousa, C. H. C. Interação entre salinidade e biofertilizante bovino na cultura do feijão-caupi. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, p.383-389, 2011.
- Soliman, M. S.; Doss, M. Salinity and mineral nutrition effects on growth and accumulation of organic and inorganic ions in two cultivated tomato varieties. Journal of Plant Nutrition. v.15, p.2789-2799, 1992.
- Soliman, M. S.; Shalabi, H. G.; Campbell, W. F. Interaction of salinity, nitrogen and phosphorus fertilization on wheat. Journal of Plant Nutrition, v.17, p.1163-1173, 1994.
- Soltanpour, P. N.; Al-Wardy, M. M. Ippolito, J. A.; Rodriguez, J. B.; Self, J.; Gillaume, J. A.; Mathews, D. Chloride versus sulfate effects on alfalfa shoot growth and ionic balance. Soil Science Society of America Journal, v.63, p.111-116, 1999.
- Souza, E. R.; Freire, M. G. G.; Cunha, K. P. V.; Nascimento, C. W. A.; Ruiz, H. A.; Lins, C. M. T. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. Environmental and Experimental Botany, v.82, p.20-27, 2012.
- Swarup, A. Availability of iron, manganese, zinc and phosphorus in submerged sodic soil as affected by amendments during the growth period of rice crop. Plant and Soil, v.66, p.37-43. 1982.
- Taleisnik, E.; Grunberg, K. Ion balance in tomato cultivars differing in salt tolerance. I. Sodium and potassium accumulation and fluxes under moderate salinity. Physiologia Plantarum. v.92, p.528-534, 1994.
- Tan, K. H. Principles of soil chemistry. New York: Marcel Dekker Inc, 1982. 267p.
- Vasconcelos, R. R. A.; Barros, M. F. C.; Silva, E. F. de F.; Graciano, E. S. A.; Fontenele, A. J. P. B.; Silva, N. M. L. Características físicas de solos salino-sódicos do semiárido pernambucano em função de diferentes níveis de gesso. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, p.1318-1325, 2013.
- Vital, A. de F. M. Efeitos do gesso e do fósforo na disponibilidade de nutrientes e no desenvolvimento inicial do cajueiro em solo salino-sódico. Areia: UFPB, 2002. 93p. Dissertação Mestrado
- Wu, Y. P.; Zhang, Y.; Bi, Y. M.; Sun, Z. J. Biodiversity in saline and non-saline soils along the Bohai Sea Coast, China. Pedosphere, v.25, p.307-315, 2015.