



Gheyi, H. R.; Dias, N. da S.; Lacerda, C. F. de; Gomes Filho, E. (ed.)
 Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados
 ISBN 978-85-420-0948-4
 Fortaleza - CE, 2016

11

Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade

**Nildo da S. Dias¹, Flávio F. Blanco², Edivan R. de Souza³, Jorge F. da S. Ferreira⁴,
 Osvaldo N. de Sousa Neto¹ & Ítalo S. R. de Queiroz¹**

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido

² EMBRAPA Meio Norte

³ Universidade Federal Rural de Pernambuco

⁴ United State Salinity Laboratory

INTRODUÇÃO

A agricultura está enfrentando um grande problema em todo o mundo com a escassez de recursos hídricos de boa qualidade, levando muitos produtores a utilizar água de qualidade não convencional para a irrigação das culturas como, por exemplo, as águas salinas de poços e de drenagem agrícola, a água residual de esgoto doméstico tratado e a salmoura de estações de tratamentos de águas salobras.

O uso de águas salinas para a irrigação constitui um sério problema para a agricultura, pois limita a produção agrícola e reduz a produtividade das culturas a níveis antieconômicos, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Por esta razão, a salinidade tem sido considerada como um dos fatores mais importantes da água de irrigação.

A irrigação com água salina, na maioria das vezes, resulta em efeito adverso nas relações solo-água-planta, ocasionando restrição severa nas atividades fisiológicas e no potencial produtivo das plantas cultivadas. Em condições de altos níveis de sais solúveis na solução do solo, o crescimento, a expansão da superfície foliar e o metabolismo do carbono primário de muitas culturas são afetados negativamente devido ao efeito osmótico, déficit hídrico, toxicidade de íons e desequilíbrio nutricional.

O sucesso do uso de água salina para irrigação das culturas agrícolas requer práticas de manejo adequadas como, a seleção de culturas tolerantes à salinidade e a adoção de estratégias de aplicação de água que evitem o acúmulo de sais no solo e/ou mantenha a concentração de sais na zona radicular abaixo da tolerada pela cultura explorada.

Vários estudos indicam que, a sensibilidade e a tolerância das culturas aos efeitos da salinidade podem variar entre espécies e cultivares de uma mesma espécie e, também dependem das condições climáticas da região, do tipo de solo, do método de irrigação, do estágio de desenvolvimento das plantas etc.

A compreensão dos efeitos adversos dos sais nas relações solo-água-planta, bem como a interpretação e a análise dos limites de tolerâncias das plantas à salinidade, em determinadas condições edafoclimáticas, são fundamentais na escolha adequada das práticas de manejo a serem utilizadas quando se dispõe de água salina para a irrigação a fim de evitar a salinização das áreas e garantir produção comercial dos cultivos.

Deste modo, este capítulo trata dos efeitos dos sais na planta e, principalmente, dos limites de tolerâncias das culturas à salinidade da água e do solo com o objetivo de selecionar espécies sensíveis e tolerantes aos efeitos dos sais como principal prática de manejo das águas salinas.

EFEITOS DOS SAIS NA PLANTA

Efeito osmótico

As plantas retiram a água do solo quando as forças de embebição dos tecidos das raízes são superiores às forças com que a água é retida na matriz do solo, ou seja, a manutenção de um gradiente de potencial hídrico favorável à entrada de água nas células das raízes. Em solos salinos, os sais solúveis na solução do solo aumentam as forças de retenção de água devido ao efeito osmótico, ocorrendo assim redução

na absorção de água pela planta. O aumento da pressão osmótica (PO), causado pelo excesso de sais solúveis, poderá atingir um nível em que as plantas não terão forças de sucção suficiente para superar essa PO e, em consequência, a planta não irá absorver água, mesmo em solo úmido.

Dependendo do grau de salinidade, em vez de absorver, a planta poderá até perder a água que se encontra em suas células e tecidos. Isso resulta no fenômeno denominado plasmólise e ocorre quando uma solução altamente concentrada entra em contato com a célula vegetal. O fenômeno é devido ao movimento osmótico da água, que passa das células para a solução mais concentrada (Figura 1). É importante ressaltar que a plasmólise se torna evidente quando a salinidade é muito elevada em relação à capacidade de tolerância da planta ou quando as raízes são expostas a um choque osmótico. Nas demais situações, a planta tende a se ajustar osmoticamente, mantendo o gradiente de potencial hídrico e a hidratação de seus tecidos.

O termo déficit de pressão de difusão (DPD) da água em uma célula ou solução, introduzido por Meyer em 1939

(Kramer, 1983), é a quantidade pela qual a pressão de difusão da água é menor do que a da água pura na mesma temperatura e pressão atmosférica. O DPD de uma célula pode também ser considerado como uma medida de pressão com a qual a água vai penetrar uma célula quando esta é imersa em água pura (Figura 1). A equação do DPD é:

$$\text{DPD} = \text{PO} - \text{PT} \quad (1)$$

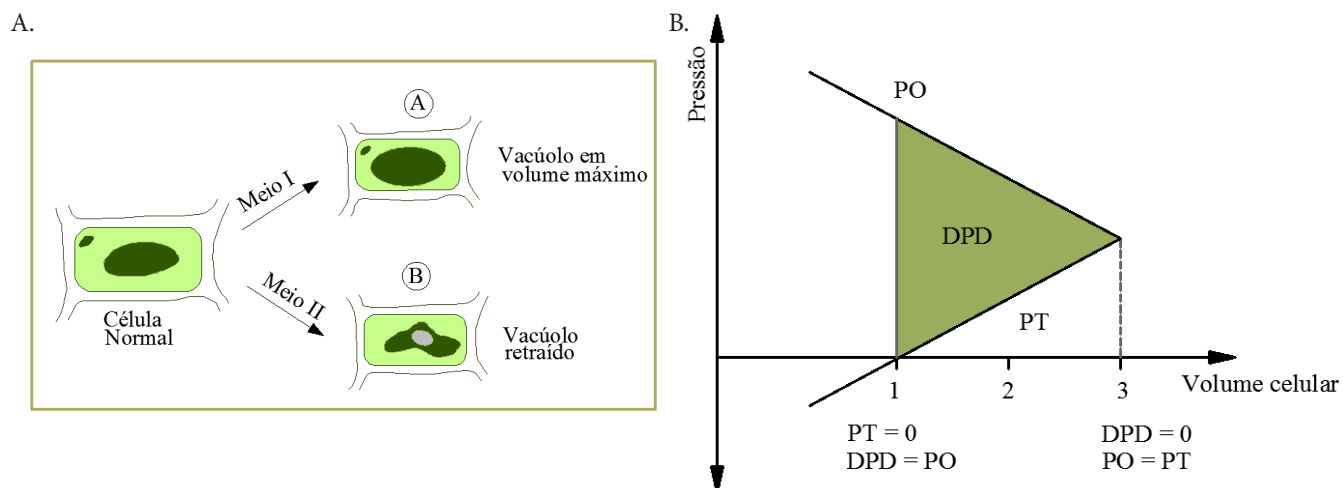
em que:

PO - pressão osmótica do conteúdo celular; e,

PT - pressão de turgescência celular.

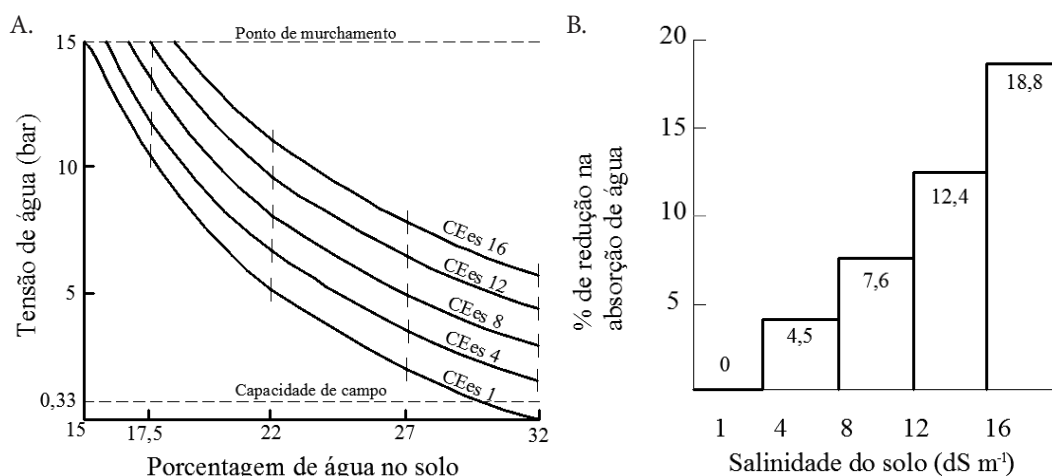
A Figura 2 mostra a curva de retenção de água de um solo franco-argiloso para vários níveis de salinidade. Observa-se que a disponibilidade de água para a cultura é reduzida à medida em que a salinidade do solo aumenta, o que resulta na redução da absorção de água pelas plantas.

O potencial osmótico de um solo pode ser estimado por meios da Condutividade Elétrica (CE), a partir da equação:



Fonte: Kramer (1983)

Figura 1. Célula normal, túrgida e plasmolizada (A) devido aos efeitos dos sais e diagrama mostrando as variações de volume de uma célula vegetal colocada em diferentes meios. Em 1 a célula está plasmolizada em 3 está túrgida (B)



Fonte: Ayres & Westcot (1999)

Figura 2. Curvas de retenção de água de um solo franco-argiloso para vários níveis de salinidade do solo (A) e percentual de redução na absorção de água em função do aumento da salinidade do solo (B). CE_{es} = condutividade elétrica do extrato de saturação

$$\psi_s \cong -36 \times CE \quad (2)$$

em que:

ψ_s - potencial osmótico, kPa; e,
CE - condutividade elétrica, dS m⁻¹.

Assim, o potencial total com que a água é retida em um solo salino, pode ser expresso por:

$$\psi_T = \psi_m + \psi_s \quad (3)$$

em que:

ψ_T - potencial total de retenção de água no solo, kPa;
 ψ_m - potencial matricial do solo, kPa; e,
 ψ_s - potencial osmótico da solução do solo, kPa.

Devido à baixa concentração de sais solúveis, o potencial osmótico em solos não salinos é considerado desprezível ($\psi_s = 0$); logo, a água deste solo está disponível a uma faixa de potencial matricial de -33 e de -1500 kPa em condições de capacidade de campo e ponto de murcha permanente, respectivamente. Porém, a presença de sais faz com que essa faixa de disponibilidade seja diminuída, em razão da redução do potencial total pois, neste caso, considera-se o potencial osmótico ($\psi_s < 0$).

Com base na Eq. 2, pode-se determinar a contribuição do potencial osmótico em relação ao potencial total de um solo salino de textura média, em condições de umidade à capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Considerando-se a salinidade do extrato de saturação (CE_{es}) igual a 10 dS m⁻¹ e que um solo de textura média tem, normalmente, a umidade à capacidade de campo e ponto de murcha, respectivamente, igual à metade e a um quarto da condição de saturação, ou seja:

$$\theta_s = 2\theta_{CC} = 4\theta_{PM} \quad (4)$$

em que:

θ_s - umidade do solo nas condições de saturação, em cm³ cm⁻³; e,
 θ_{CC} e θ_{PM} - umidade do solo à capacidade de campo e ponto de murcha permanente, em cm³ cm⁻³.

Então, a condutividade elétrica do solo, em dS m⁻¹, à capacidade de campo (CE_{CC}) é obtida considerando-se que a solução salina se concentra no solo duas vezes, mediante a Eq. 5:

$$CE_{CC} = 2 \times CE_{es} \quad (5)$$

O potencial osmótico deste solo à capacidade de campo é obtido pela Eq. 2:

$$CE_{CC} = 2 \times 10 = 20 \text{ dS m}^{-1}$$

E o potencial total com que a água é retida no solo à capacidade de campo, é obtido substituindo-se os valores do " ψ_m " e " ψ_s " na Eq. 3:

$$\psi_T = -33 - 720 = -753 \text{ kPa}$$

Logo, a contribuição relativa do ψ_s para a redução do potencial total da água do solo à capacidade de campo é obtida mediante a relação percentual entre o potencial osmótico e o potencial total, ou seja:

$$\% \psi_s = \left(\frac{-720}{-753} \right) \times 100 = 96\% \text{ do potencial total} \quad (6)$$

De acordo com a Eq. 4, a condutividade elétrica em condições de murcha permanente (CE_{PM}) é obtida, considerando-se que a solução salina é quatro vezes mais concentrada no solo, conforme indicado abaixo:

$$CE_{PM} = 4 \times 10 = 40 \text{ dS m}^{-1}$$

Assim, o potencial osmótico deste solo no ponto de murcha é obtido de acordo com a Eq. 2:

$$\psi_s = -36 \times 40 = -1440 \text{ atm}$$

O potencial total com que a água é retida no solo em ponto de murcha é obtido, substituindo-se os valores do " ψ_m " e " ψ_s " na Eq. 3:

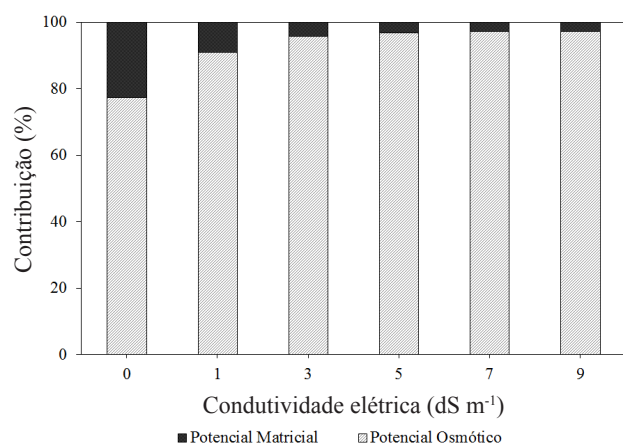
$$\psi_T = -1500 - 1440 = -2940 \text{ kPa}$$

Finalmente, a contribuição relativa do ψ_s na redução do potencial total na condição de murcha permanente é obtida mediante a relação percentual entre o potencial osmótico e o potencial total:

$$\% \psi_s = \left(\frac{-1440}{-2940} \right) \times 100 = 49\% \text{ do potencial total}$$

Os cálculos anteriores mostram que a tensão total com que a água é retida no solo à capacidade de campo e ponto de murcha é, respectivamente, 753 e 2940 kPa. É óbvio que a contribuição relativa do ψ_s é maior quando o solo se encontra à capacidade de campo e a mesma é aumentada a cada elevação da CE_{es} , conforme ilustra a Figura 3.

A dificuldade de absorção de água pelas plantas resulta em baixo crescimento vegetativo e, conseqüentemente, menor índice de produtividade. Um experimento desenvolvido por Duarte & Souza (2016) com a cultura do pimentão em condições protegidas sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação, evidenciou que a menor diferença de potencial total entre a planta e o solo ($CE < 1 \text{ dS m}^{-1}$) proporcionou o maior consumo hídrico das plantas e, isto



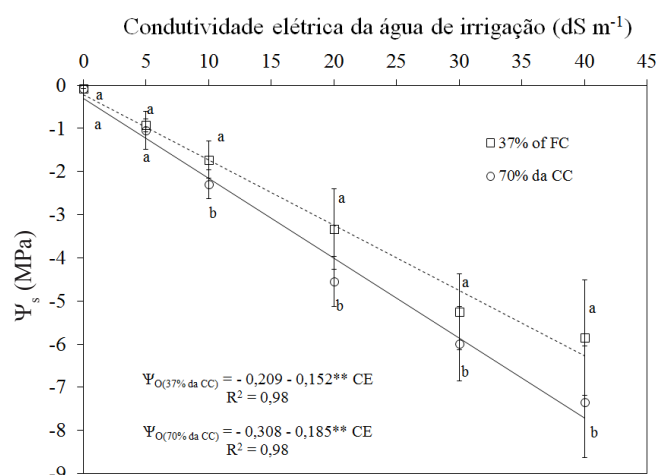
Fonte: Adaptado de Duarte & Souza (2016)

Figura 3. Contribuição relativa dos potenciais matricial e osmóticos para o potencial total do solo em função da condutividade elétrica da água de irrigação (CE_a)

foi associado aos melhores índices de produtividade (massa seca de caule, folha, raiz e fruto), sendo estes reduzidos com o incremento da CE da água de irrigação (Figura 4).

Melo (2014) estudou os efeitos de diferentes valores de CE da água de irrigação em um Neossolo Flúvico cultivado com a halófita *Atriplex nummularia* (Amaranthaceae) sob dois regimes hídricos do solo (70 e 37% da capacidade de campo) e, encontrou efeito linear decrescente do potencial osmótico do solo em função do incremento da salinidade da água de irrigação e, que este depende da disponibilidade hídrica do solo apenas nos níveis de CE mais altos (10 a 40 dS m⁻¹). Por exemplo, a irrigação com água de CE = 40 dS m⁻¹, foram registrados valores de potencial osmótico aproximadamente iguais a -6 e -7 MPa para uma umidade do solo de 37 e 70% da capacidade de campo, respectivamente; enquanto que para a irrigação com água de 1 dS m⁻¹, não se observou diferença significativa do potencial osmótico entre os dois regimes hídricos estudados (Figura 5).

Oliveira et al. (2016) encontraram reduções dos potenciais osmótico e total com o incremento da salinidade

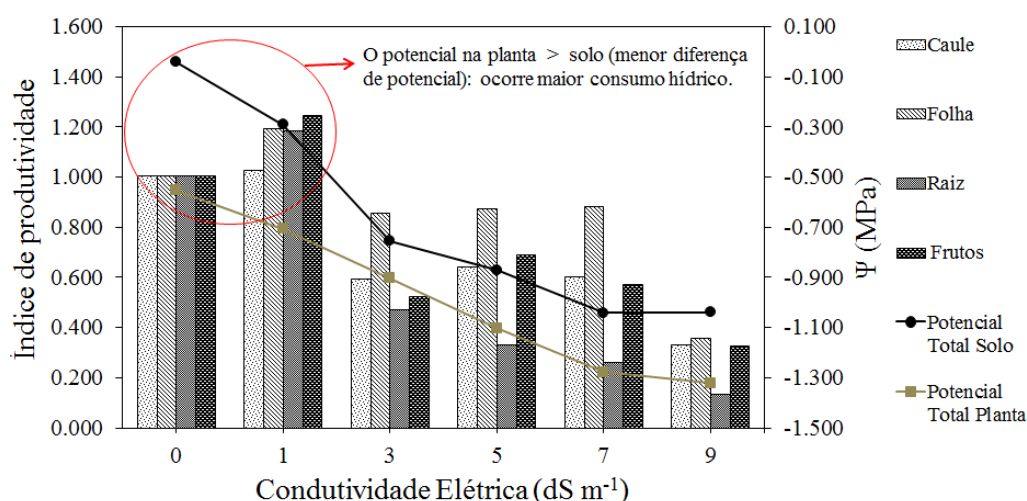


Fonte: Melo (2014)

Figure 5. Relação entre o potencial osmótico foliar de plantas de *Atriplex nummularia* e a condutividade elétrica da água de irrigação para as umidades de 70 e 37% da capacidade de campo de um Neossolo Flúvico. Letras diferentes indicam diferença significativa ($P \leq 0.05$) dentro de cada nível de salinidade

da água de irrigação em plantas de feijoeiro. As plantas irrigadas com a água de menor salinidade (0,5 dS m⁻¹) apresentou o maior valor de potencial osmótico (-0,58 MPa), enquanto que no tratamento de maior salinidade (12,5 dS m⁻¹), o valor do potencial osmótico encontrado foi de -1,24 MPa, ocasionando uma redução de 113% (Figura 6).

Oliveira et al. (2016) apresentaram os potenciais totais de água no sistema solo-planta-atmosfera sob condição de irrigação com água de diferentes condutividades elétricas em cultivo de feijão (Figura 7). Neste estudo verificou-se que, as diferenças entre os potenciais hídricos da planta de feijão e do solo variaram em função da salinidade da água de irrigação, sendo registradas diferenças de -0,04 e -0,21 atm. para o tratamento testemunha (0 dS m⁻¹) e com maior o nível



Fonte: Duarte & Souza (2016)

Figura 4. Índice de produtividade do pimentão (massa seca de caule, folha, raiz e fruto) em função da salinidade da água de irrigação (CE_a) relacionada à diferença de potencial total no solo e na planta

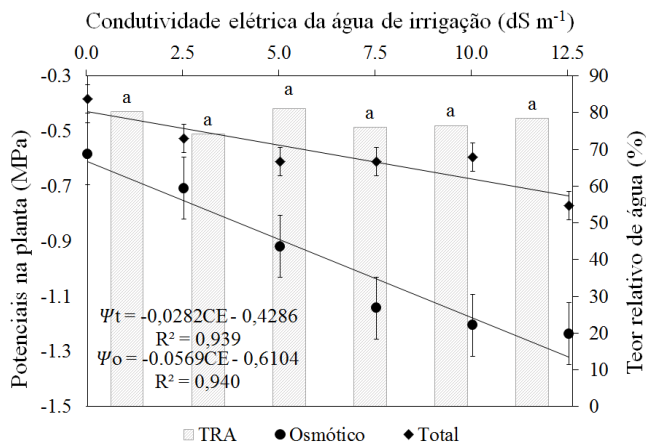


Figura 6. Teor relativo de água (TRA) com o teste de média, potencial osmótico e potencial hídrico com seus respectivos erros padrões na folha do feijoeiro em função da condutividade elétrica da água de irrigação (CE) aos 35 dias após o plantio, determinado na madrugada

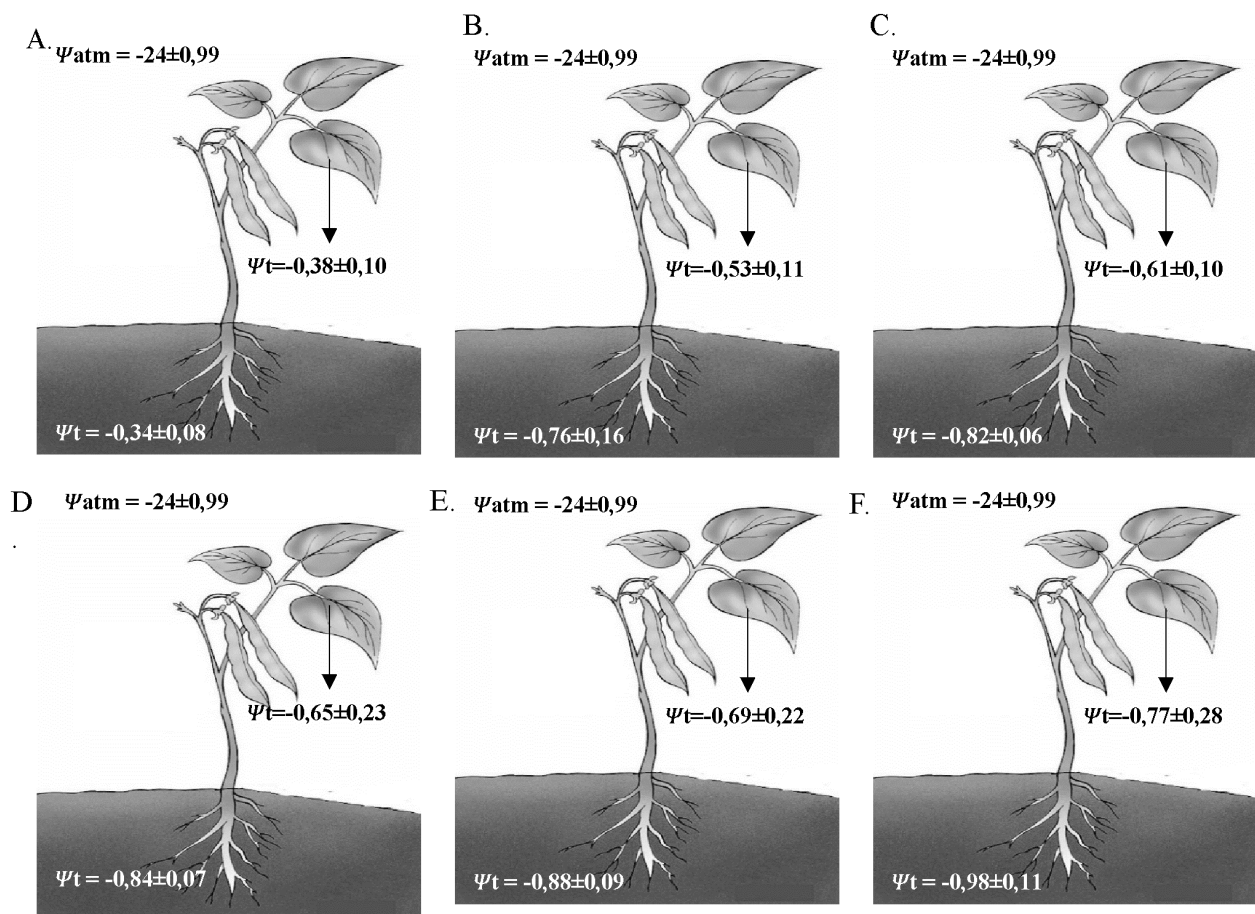
de salinidade da água irrigação (12,5 dS m⁻¹). Estes resultados comprovam que, níveis elevados de sais na água de irrigação causam menor diferença de potencial hídrico entre o solo e a planta e, portanto, aumenta a dificuldade de absorção de água pelas raízes.

Toxidez de íons específicos

A presença de íons na água de irrigação pode causar problemas de fitotoxicidade (toxicidade direta para vários processos fisiológicos da planta ou desequilíbrios nutricionais) com diferentes níveis de tolerância entre as espécies de plantas.

Problemas de toxicidade surgem quando os íons na água de irrigação ou no solo se acumulam excessivamente no tecido da planta de tal forma que causam reduções no rendimento, independentemente da concentração total de sais. Este excesso, a princípio, promove um desbalanceamento osmótico celular e, posteriormente, uma toxidez iônica que causa danos ao citoplasma, resultando em danos visíveis principalmente na bordadura e no ápice das folhas mais velhas onde o acúmulo é maior. Nesta bordadura, devido à perda de água por transpiração, o acúmulo do sal translocado do solo torna-se excessivo para a folha levando aos sintomas visíveis de toxidez salina (Figura 8).

Os danos podem reduzir significativamente os rendimentos e sua magnitude depende do tempo, da concentração de íons, da tolerância das plantas e do uso da água pelas culturas. Os problemas de toxidez frequentemente



Fonte: Oliveira et al. (2016)

Figura 7. Potenciais hídricos (MPa) no sistema solo-planta-atmosfera em cultivo de feijão-caupi irrigado com água salina aos 35 dias após o plantio, determinados na madrugada, para os níveis de salinidade da água de irrigação 0 (A); 2,5 (B); 5,0 (C); 7,5 (D); 10,0 (E) e 12,5 (F) dS m⁻¹



Figura 8. Sintomas de toxidez de cloro em folhas maduras do morangueiro (*Fragaria* sp.) irrigado com água de $CE_a = 2.5$ $dS\ m^{-1}$ durante o ciclo de desenvolvimento e produção em Riverside, Califórnia, USA

acompanham ou complicam os de salinidade ou permeabilidade, podendo surgir mesmo em baixa salinidade do solo. Os sintomas de toxicidade manifestam-se de uma forma típica para cada elemento e podem aparecer em qualquer cultura se as concentrações de sais nos tecidos são suficientemente altas ou acima dos seus níveis de tolerância. Normalmente, a toxicidade é provocada pelos íons cloreto, sódio e boro; entretanto, muitos outros oligoelementos são tóxicos às plantas, mesmo em pequenas concentrações.

A absorção foliar acelera a velocidade de acumulação de sais dos íons tóxicos na planta sendo, muitas vezes, a fonte principal da toxicidade. Os íons, sódio e cloreto podem, também, ser absorvidos via foliar, quando se molham durante a irrigação por aspersão e, sobretudo, durante períodos de altas temperaturas e baixa umidade.

Sódio

O elevado teor de sódio (Na) preocupa os produtores, uma vez que pode contribuir para problemas de salinidade, interferir na disponibilidade de nutrientes e causar queimaduras foliares (De Pascale et al., 2013). Quando absorvido e acumulado em grandes quantidades na planta, o Na se torna altamente tóxico em níveis fisiológicos diferenciados. Em geral, os danos fisiológicos causados pela toxidez de Na incluem deficiência dos nutrientes como K e Ca, desenvolvimento de estresse hídrico e indução de danos celulares resultantes do desbalanço do sistema de oxi-redução, resultando na produção excessiva de espécies reativas de oxigênio.

Os sintomas de toxicidade de sódio aparecem em forma de queimaduras ou necrose, ao longo das bordas. As concentrações de sódio nas folhas alcançam níveis tóxicos após vários dias ou semanas e os sintomas aparecem, de início, nas folhas mais velhas e em suas bordas e, a medida que o problema se intensifica, a necrose se espalha progressivamente na área internerval, até o centro das folhas.

A toxicidade ao sódio é diagnosticada pelo teor de sódio na água ou percentagem de sódio trocável (PST) no solo. A Tabela 1 classifica a tolerância de várias culturas ao Na, utilizando-se três níveis de PST.

Cloreto

O cloreto elevado é frequentemente associado a uma concentração elevada de sódio. O Cl^- não é absorvido

Tabela 1. Tolerância relativa das culturas* ao sódio trocável (Ayers; Westcot, 1999)

Sensíveis (PST < 15)	Semi-tolerantes (PST de 15 a 40)	Tolerantes (PST > 40)
Caupi	Trigo	Capim de Rhodes
Grão de bico	Tomate	Capim Angola
Amendoim	Espinafre	Algodão
Lentilha	Sorgo	Capim bermuda
Tangerina	Centeio	Beterraba açucareira
Pêssego	Arroz	Beterraba
Laranja	Rabanete	Cevada
Pomelo (grapefruit)	Cebola	Alfafa
Ervilha	Aveia	
Milho	Mostarda	
Algodão (germinação)	Trevo	
Feijão	Cana-de-açúcar	
Noz	Milheto	
Frutas caducifólias	Alface	
Abacate	Fetisca	
	Cenoura	

* Listada em ordem crescente de tolerância

facilmente pelas partículas de solo, mas move-se facilmente com a água, a partir da qual é absorvido pelas raízes, acumulando-se nas folhas. Em concentrações elevadas, pode interferir com a absorção de nitratos e o transporte de ácidos orgânicos dentro e entre as células.

Os sintomas de toxicidade do cloreto aparecem como queima do tecido foliar (começando nas pontas e continuando ao longo das bordas), escurecimento, amarelamento prematuro e queda de folhas (Tabela 2).

A sensibilidade das culturas a este íon é bastante variável como, por exemplo, as frutíferas que começam a mostrar sintomas de danos a concentrações acima de $3\ g\ kg^{-1}$ de cloreto, as espécies tolerantes podem acumular até 40 a $50\ g\ kg^{-1}$ de cloreto sem manifestar qualquer sintoma de toxicidade. A Tabela 3 apresenta os valores de tolerância ao cloreto para algumas culturas, medidos no extrato de saturação e na água de irrigação. É recomendável manter baixos os níveis de salinidade no solo durante o plantio e lembrar que os dados da Tabela 3 foram obtidos de parcelas com culturas irrigadas por superfície. Por esta razão, é necessário considerar-se que a irrigação por aspersão pode causar queimaduras nas folhas a níveis de cloreto inferiores aos indicados, pois as folhas também absorvem os sais.

Tabela 2. Níveis de tolerância das culturas ao cloreto na água de irrigação (Maas, 1990)*

Teor de cloreto ($meq\ L^{-1}$) (ppm)		Interpretação
< 2,0	< 70	Sem riscos para todas as plantas
2,1-4,0	71-140	As plantas sensíveis apresentam injúrias ligeiras a moderadas.
4,1-10,0	141-350	As plantas moderadamente tolerantes apresentam injúrias ligeiras a consideráveis
> 10,0	> 350	Problemas severos de toxidez

* A maioria das culturas anuais e as perenes de curta duração são moderadamente a altamente tolerantes aos cloretos. Os agricultores podem confiar no índice de risco de salinidade para avaliar os problemas de utilização da água de irrigação. Árvores, parreiras e plantas ornamentais lenhosas são sensíveis ao cloreto.

Tabela 3. Tolerância das plantas ao cloreto, medidas no extrato de saturação do solo da zona radicular e na água de irrigação (Ayers & Westcot, 1999)

Planta	Porta-enxerto ou variedade	Nível máximo permissível de cloretos (mmol L^{-1})	
		Zona radicular (Cl_{es})	Água de irrigação (Cl_{a})*
Citros	Tangerina Cleópatra	25,0	16,6
Citros	Limão e laranja azeda	15,0	10,0
Citros	Laranja doce e citrange	10,0	6,7
<i>Prunus</i> spp.	Marianna	25,0	17,0
<i>Prunus</i> spp.	Lovell e Shalil	10,0	6,7
<i>Prunus</i> spp.	Yunnan	7,5	5,0
Abacate	West Indian	7,5	5,0
Abacate	Mexican	5,0	3,3
Videira	Thompson Seedless	20,0	13,3
Videira	Cardinal e Black Rose	10,0	6,7
Rubus spp.	Boysenberry	10,0	6,7
Rubus spp.	Olallie Blackberry	10,0	6,7
Rubus spp.	India SummerRaspberry	5,0	3,3
Morangueiro	Lassen	7,5	5,0
Morangueiro	Shasta	5,0	3,3

* Valores máximos aplicáveis apenas para culturas irrigadas por superfície. Para culturas irrigadas por aspersão a queimadura das folhas pode ocorrer a níveis inferiores a esses.

Boro

O boro é um elemento essencial à nutrição mineral das plantas; este é absorvido pelas raízes na forma de ácido bórico neutro ($\text{B}[\text{OH}]_3$) e como borato ($\text{B}[\text{OH}]_4^-$). O boro atua na síntese e estrutura da parede celular e, ainda sobre complexos estáveis da membrana plasmática e, conseqüentemente, está envolvido na germinação de pólen e alongamento de tubo polínico (Brown et al., 2002).

Embora, o boro seja essencial para o desenvolvimento das plantas, ele pode ser tóxico mesmo a concentrações muito baixas. De um modo geral, as concentrações tóxicas de boro são quase exclusivamente encontradas nos solos das zonas áridas, nas águas de poço e de nascente de regiões geotérmica e vulcânica, enquanto a maior parte das águas superficiais contém níveis aceitáveis de boro.

Quantidades significativas de boro podem ser encontradas na água de irrigação devido à eliminação deste íon em

aparelhos de purificação de águas residenciais, uma vez que este elemento está contido em detergentes domésticos sob a forma de perborato de sódio. Os níveis de 0,2-0,5 mg L^{-1} são considerados normais na água de irrigação. Contudo, níveis acima de 0,3 mg L^{-1} podem ser prejudiciais às culturas sensíveis. A água de irrigação com um teor de boro superior a 4,0 mg L^{-1} é inadequada para quase todas as culturas.

Os efeitos tóxicos do boro inicialmente aparecem em folhas velhas na forma de amarelamento, manchas cloróticas ou tecido seco na ponta e bordas da folha. A idade da planta também influencia a susceptibilidade ou na extensão do problema. Os problemas de toxicidade ocorrem, com maior frequência, por causa da concentração de boro na água e não no solo. Na medida em que o boro se acumula, os sintomas se estendem pelas áreas internervurais até o centro das folhas (Figura 9). Em alguns casos, os sintomas se manifestam mediante exudação gomosa nos ramos e no tronco como, por exemplo, na amendoeira.

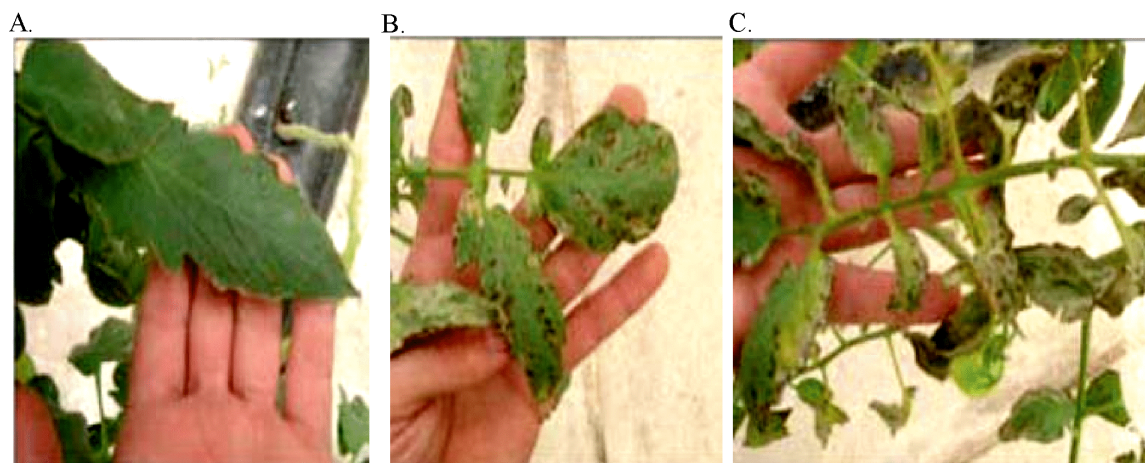
As mudas são geralmente mais suscetíveis que as plantas maduras da mesma espécie (Tabela 4). As estratégias de manejo para minimizar os problemas de boro quando a fonte de água é alta incluem eliminação de boro das fontes de fertilizantes, o aumento do pH do meio e do nível de cálcio (Tabela 5).

Na maioria das culturas, os sintomas de toxicidade de boro aparecem quando a concentração supera 250 a 300 mg kg^{-1}

Tabela 4. Riscos de toxidez de boro na água de irrigação (Maas, 1990)

Concentração (mg L^{-1})	Interpretação*
< 0,5	Bom para todas as plantas
0,5 a 1,0	Danos ocorrem nas folhas de plantas sensíveis sem alterar a produção
1,0 a 2,0	Tolerado por semi-tolerantes, mas reduz a produção de plantas sensíveis
2,0 a 4,0	Somente plantas tolerantes produzem satisfatoriamente
> 4,0	Danos em quase todas as plantas

* As plantas cultivadas em solo rico em calcário podem tolerar mais boro do que as cultivadas em solos não-calcário.



Fonte: Albornoz et al. (2007)

Figura 9. Sintomas visuais de toxicidade ao boro na água de irrigação em tomateiro: Leve (A), moderato-alto (B) e grave (C)

Tabela 5. Limites permissíveis de boro na água de irrigação (Maas, 1990)*

Classes de água	Grupo de culturas		
	Sensível	Semi-tolerante	Tolerante
Excelente	< 0,33	< 0,67	< 1,0
Bom	0,33 – 0,67	0,67 – 1,33	1,0 – 2,00
Permissível	0,67 – 1,00	1,33 – 2,00	2,0 – 3,00
Duvidoso	1,00 – 1,25	2,00 – 2,50	3,0 – 3,75
Inadequado	> 1,25	> 2,5	> 3,75

* Limites permissíveis de boro (ppm)

de matéria seca. Por outro lado, o Boro pode ser lixiviado das folhas pelas chuvas e o seu principal mecanismo de detoxificação é a complexação com açúcares.

Desequilíbrio nutricional das plantas

Dentre os fatores estudados para caracterizar os efeitos dos sais na planta, uma grande atenção deve ser dada ao desequilíbrio nutricional. Vários estudos têm associado os efeitos da salinidade sob o desequilíbrio nutricional e as interações iônicas no tecido vegetal.

De acordo com Yoshida (2002), o aumento de NaCl na solução do solo prejudica a absorção radicular de nutrientes, principalmente de K e Ca, interferindo nas funções fisiológicas da planta. Então, a habilidade dos genótipos em manter altos teores de K e Ca e baixos níveis de Na no tecido vegetal é o mecanismos que contribui para expressar a tolerância das plantas à salinidade. Na maioria dos casos, genótipos tolerantes à salinidade são capazes de manter altas relações K/Na nos tecidos (Zeng et al., 2003). Pelo aumento da absorção de K e consequente redução da absorção de Na, o K contribui para manter a relação K/Na alta na planta, como constatado em plantas de pimentão por Rubio et al. (2003).

Phills et al., (1979) estudou a relação iônica em tomateiro sob estresse salino e constatou que o aumento da concentração de NaCl na solução nutritiva reduz os teores foliares de NO_3 das plantas de tomate, embora não tenha observado efeito sobre os teores de K, apesar do aumento dos teores de Na nas folhas. A inibição da absorção de nitrato pode ocorrer devido à interação NO_3/Cl nos sítios de absorção ou à despolarização da membrana pelo Na (Suhayda et al., 1990), o que tem sido associado à inibição não-competitiva de absorção de NO_3 (Hawkins & Lewis, 1993).

Blanco & Folegatti (2008) e Folegatti et al. (2008) utilizaram água de irrigação de alta salinidade na irrigação do tomateiro em ambiente protegido e verificaram, nas folhas, aumento da relação N/Cl com as doses de N, e da concentração de K e prolina (aminoácido relacionado à tolerância das plantas à salinidade) com as doses de K. Entretanto, os efeitos da salinidade não foram aliviados e a produtividade não foi alterada, demonstrando que o aumento na dose de fertilizantes aplicados não conferiu maior tolerância do tomateiro à salinidade.

TOLERÂNCIA DAS CULTURAS À SALINIDADE

É importante ressaltar que, embora a salinidade do solo reduza a disponibilidade da água no solo, as culturas não

respondem igualmente aos efeitos negativos dos sais, pois algumas são mais tolerantes que outras e podem extrair água com mais facilidade.

Sabe-se que as diferentes espécies e cultivares de plantas respondem diferentemente aos efeitos negativos da salinidade, havendo para cada espécie ou cultivar um limite tolerável de salinidade que não causa redução na produtividade potencial a partir do qual a produtividade passa a diminuir à medida que se incrementa a salinidade do solo. Para Maas & Hoffmam (1977), além da variação da tolerância entre as espécies e cultivares, dentro de uma mesma espécie pode também existir diferenças entre as fases fenológicas.

A tolerância e a sensibilidade das plantas à salinidade dependem, sobretudo, do tipo de sal, do método e da frequência de irrigação e das condições climáticas (Rhoades et al., 2000).

Com base na tolerância e na sensibilidade das plantas à salinidade, estas são classificadas em glicófitas e halófitas. As glicófitas representam o grupo das plantas cultivadas que, na sua maioria, são as menos tolerantes aos efeitos dos sais, enquanto as halófitas compõem o grupo de plantas que acumulam grande quantidade de NaCl em seus tecidos e até podem se beneficiar do excesso de sódio, ajustando-se osmoticamente em meio altamente salino ($\text{CE da água} > 20 \text{ dS m}^{-1}$).

Como exemplo de halófita, pode-se citar a espécie *Atriplex numulária*, a qual apresenta significativa redução do potencial osmótico quando irrigada com água de diferentes condutividades elétricas (Melo, 2014).

Avaliação da tolerância das plantas à salinidade

Existe uma relação linear entre a salinidade do solo e a produção vegetal, expressa segundo o modelo de Mass e Hoffman (Maas & Hoffman, 1977):

$$P = 100 - b(\text{CE}_{\text{es}} - \text{SL}), \text{ com } \text{CE}_{\text{es}} < \text{SL} \quad (7)$$

em que:

P - produção agrícola relativa à máxima produção obtida em condições ótimas (%);

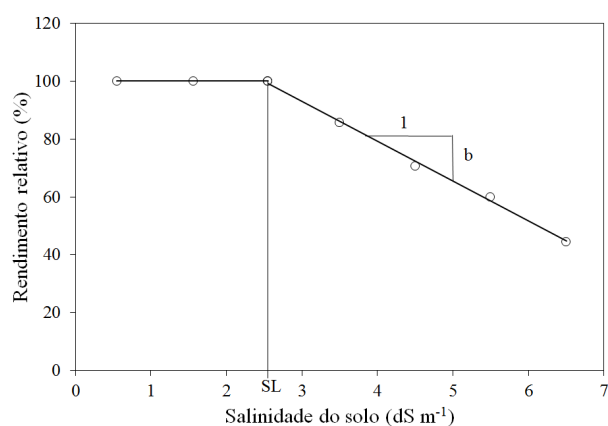
CE_{es} - condutividade elétrica do extrato da pasta de saturação do solo média na zona radicular (dS m^{-1});

SL - salinidade limiar (dS m^{-1}); e,

b - inclinação ou perda de rendimento por incremento unitário da CE (% por dS m^{-1}).

Esta relação linear entre a salinidade e os rendimentos, também pode ser representada pela curva típica de tolerância das culturas à salinidade, plotando-se os rendimentos relativos em função dos níveis de salinidade do solo, conforme demonstrado na Figura 10. Com base nos resultados obtidos da curva típica de tolerância pode-se determinar os valores de SL e b e, ainda, por extrapolação determinar salinidade máxima teórica (CE_{es}) com a qual cessam o crescimento e o desenvolvimento da planta.

Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade



Adaptado de Maas & Hoffman (1977)

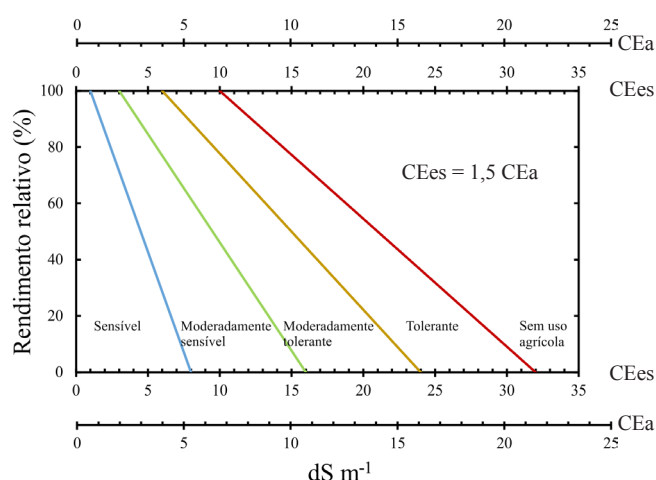
Figura 10. Curva típica de tolerância das culturas à salinidade

É importante ressaltar que, a utilização da CE_{es} média da zona radículas para expressar o efeito da salinidade sob o rendimento relativo das culturas, implica no fato de que as plantas respondem, primariamente, ao potencial osmótico da solução do solo.

Além disso, a tolerância das culturas é geralmente relacionada à percentagem de fitomassa produzida em solo salino em comparação com o solo não salino após um período tempo prolongado de crescimento vegetativo. Para espécies ornamentais, quantidade de flores e presença de folhas esteticamente perfeitas também são consideradas no estudo de tolerância e, no caso de espécies florestais, a produção satisfatória é a própria sobrevivência da espécie. Para a agricultura, deve-se considerar a produção e seus componentes como também características como germinação, crescimento de planta, stand populacional etc.

De modo geral, os critérios para avaliar a tolerância das culturas à salinidade, podem ser englobados de acordo com um dos três critérios: 1) capacidade da planta sobreviver em solo salino; 2) rendimento da planta em meio salino (produção satisfatória) e 3) produção relativa (Richards, 1954).

A tolerância relativa da maioria das culturas é conhecida, podendo ser utilizada como diretrizes técnicas para selecionar culturas de acordo com os níveis de salinidade da água ou do solo. A Figura 11 mostra, esquematicamente, os grupos de tolerância relativas das culturas e a Tabela 6 inclui valores de tolerância de algumas culturas extensivas, hortaliças e frutíferas, a qual se refere à salinidade da água de irrigação e a salinidade medida no extrato da pasta saturada do solo (CE_{es}). Os valores de tolerância deverão ser considerados apenas como de tolerância relativa entre os grupos de culturas, pois os valores de tolerância absoluta variam com o clima, condições de solo e práticas culturais. Esses limites de salinidade foram calculados, considerando que a relação entre salinidade do solo e da água ($CE_{es} = 1,5 CE_a$) e a fração de lixiviação equivalente a 15-20 %, adotando-se um modelo de absorção de água na zona radicular igual a 40, 30, 20 e 10% (padrão de extração normal). O rendimento potencial zero implica na salinidade máxima teórica (CE_{es}) com a qual cessam o crescimento e o desenvolvimento da planta.



Fonte: Maas (1984)

Figura 11. Limites de tolerância à salinidade das culturas

Tabela 6. Tolerância das culturas herbáceas à salinidade¹ (adaptado de Maas, 1986)

Cultura	Nome científico ²	SL ³ (dS m ⁻¹)	b % por dS m ⁻¹	Classe de tolerância ⁴
Fibra, grão e culturas especiais				
Algodão	<i>Gossypium hirsutum</i>	7,7	5,2	T
Amendoim	<i>Arachis hypogaea</i>	3,2	29,0	MS
Arroz	<i>Oryza sativa</i>	3,0 ⁵	12,0	S
Cana-de-açúcar	<i>Saccharum officinarum</i>	1,7	5,9	MS
Caupi	<i>Vigna unguiculata</i>	4,9	12,0	MT
Cevada	<i>Hordeum vulgare</i>	8,0	5,0	T
Fava	<i>Vicia Faba</i>	1,6	9,6	MS
Feijão	<i>Phaseolus vulgaris</i>	1,0	19,0	S
Gergelim	<i>Sesamun indicum</i>			S
Girassol	<i>Helianthus annuus</i>			MS*
Milheto, foxtail	<i>Setaria italica</i>			MS
Milho	<i>Zea mays</i>	1,7	12,0	MS
Soja	<i>Glycine max</i>	5,0	20,0	MT
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i>	6,8	16,0	MT
Trigo	<i>Triticum aestivum</i>	6,0	7,1	MT

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6

Cultura	Nome científico ²	SL ³ (dS m ⁻¹)	b % por dS m ⁻¹	Classe de tolerância ⁴
Forrageiras				
Alfafa	<i>Medica sativa</i>	2,0	7,3	MS
Aveia (forrageira)	<i>Avena sativa</i>			MS*
Capim Bermuda	<i>Cynodon</i>	6,9	6,4	T
Capim Buffel	<i>Cenchrus ciliaris</i>			MS*
Caupi (Forrageira)	<i>Vigna unguiculata</i>	2,5	11,0	MS
Cevada (Forrageira)	<i>Hordeum vulgare</i>	6,0	7,1	MT
Milho (Forrageira)	<i>Zea mays</i>	1,8	7,4	MS
Trigo (forrageira)	<i>Triticum aestivum</i>	4,5	2,6	MT
Hortaliças e fruteiras				
Aspargo	<i>Asparagus officinalis</i>	4,1	2,0	T
Feijão	<i>Phaseolus vulgaris</i>	1,0	19,0	S
Beterraba vermelha	<i>Beta vulgaris</i>	4,0	9,0	MT
Repolho	<i>B. oleracea capitata</i>	1,8	14,0	MS
Cenoura	<i>Daucus carota</i>	1,0		S
Pepino	<i>Cucumis sativus</i>	2,5	6,9	MS
Berinjela	<i>S. melongena esculentum</i>	1,1		MS
Alface	<i>Lactuca sativa</i>	1,3	12,0	MS
Melão	<i>Cucumis melo</i>	2,2	7,5	MS
Cebola	<i>Allium cepa</i>	1,2		S
Pimentão	<i>Capsicum annuum</i>	1,5	12,0	MS
Batata	<i>Solanum tuberosum</i>	1,7		MS
Espinafre	<i>Spinacia oleracea</i>	2,0	16,0	MS
Abobrinha, scallop	<i>Cucurbita pepo melopepo</i>	3,2	9,4	MS
Abobrinha, zucchini	<i>C. pepo melopepo</i>	4,7	33,0	MT
Morango	<i>Fragaria sp.</i>	1,0	11,0	S
Batata doce	<i>Ipomoea batatas</i>	1,5	9,9	MS
Tomate	<i>L. esculentum</i>	2,5	9,0	MS

¹ Esses dados servem apenas como indicativo da tolerância relativa entre culturas. Tolerância absoluta depende do clima, das condições do solo e práticas culturais.

² Os nomes botânicos e comuns em inglês, conforme a convenção de "Hortus Third", quando possível.

³ Em solos gipsíferos, as plantas toleram CE_{ss} cerca de 2 dS m⁻¹ acima do indicado.

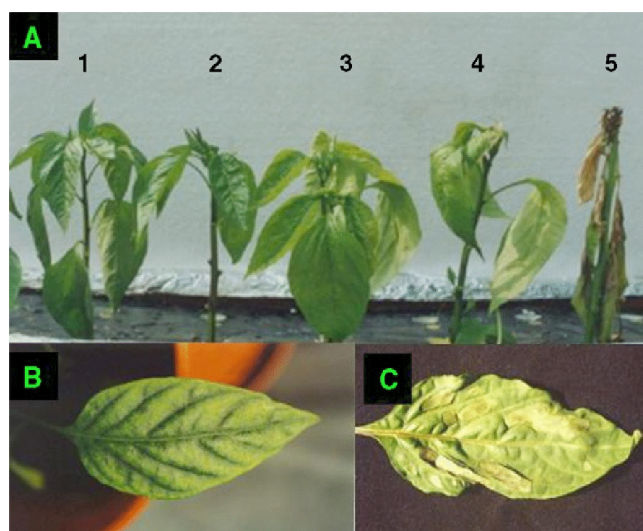
⁴ T = Tolerante, MT = Moderadamente Tolerante, MS = Moderadamente Sensível e S = Sensível. Classes com * são estimativas

⁵ Como arroz é cultivado sob condições de inundação, os valores se referem às condutividades elétrica da água do solo, enquanto plantas estão inundadas. Menos tolerantes durante fase de plântula

Embora tenha havido muito progresso na classificação das várias espécies de plantas com base na tolerância à salinidade, este é muito variável dependendo do genótipo, do solo e das condições climáticas e das técnicas agronômicas utilizadas. Em particular, a adoção de estratégias agronômicas adequadas, associadas à seleção cuidadosa das espécies e da cultivar, possibilitará minimizar as reduções de rendimento. Isto se refere, em particular, ao controle da salinidade na zona radicular, especialmente durante a germinação e nas fases fenológicas iniciais. Isto pode ser conseguido aumentando a frequência de irrigação ou satisfazendo a exigência de lixiviação, o qual é detalhado no capítulo sobre manejo do solo-água-planta em áreas afetadas por sais.

Tolerância das culturas associada às relações iônicas e a severidade dos sintomas visuais dos efeitos dos sais na planta

Aktas et al. (2006), conduziram um experimento para estudar os efeitos da toxidez do NaCl em 102 genótipos de pimentão (*Capsicum annuum* L.). Aos 26 dias de cultivos, os genótipos foram classificados de acordo com a severidade dos sintomas foliares causados pelo excesso de NaCl utilizando uma escala de sintomas de 1–5 (Figura 12).

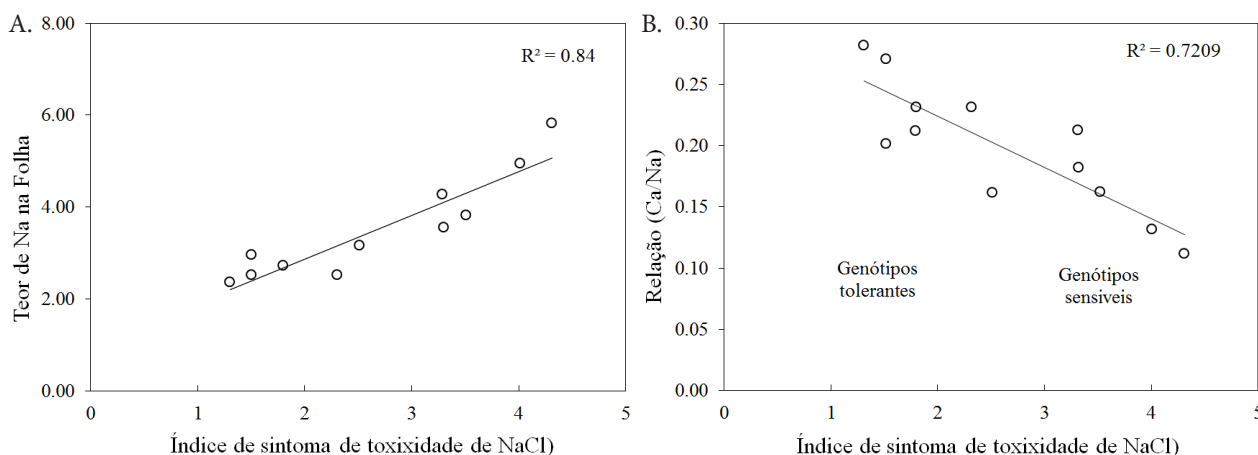


Fonte: Aktas et al. (2006)

Figura 12. Sintomas foliares do pimentão fertilizado com solução nutritiva contendo alta concentração de NaCl. Clorose e necrose foliar (A): sem ou muito leve (1), leve (2), médio (3), severo (4) e muito severo (5). Clorose (B) e necrose (C) do tecido foliar

Com base na severidade dos sintomas foliares, os autores, selecionaram seis genótipos sensíveis e seis tolerantes, e

Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade



Fonte: Aktas et al. (2006)

Figura 13. Teor de Na (A) e relação Ca/Na (B) em folhas de genótipos de pimentão em função do índice de severidade dos sintomas foliares causados por estresse salino

conduziram um segundo experimento para a análise das concentrações de K, Na e Ca no tecido foliar em associação com a classificação visual da severidade dos sintomas causados pelo excesso de NaCl. Os autores concluíram que a concentração de Na para as plantas tratadas com solução contendo alto teor de NaCl foi significativamente correlacionado com a severidade dos sintomas foliares causado pela toxidez de NaCl (Figura 13A). Entretanto, a relação Ca/Na foi negativa e altamente significativa com a severidade dos sintomas foliares (Figura 13B), ou seja, os genótipos mais tolerantes à salinidade absorvem mais cálcio do que sódio nas folhas para manter uma alta relação Ca/Na.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise e a interpretação da qualidade da água e o conhecimento sobre os efeitos dos sais e os limites de tolerância das plantas à salinidade permitem o planejamento e o manejo do uso de água salobra para irrigação, evitando problemas com a redução da produção das culturas e o acúmulo de sais na zona radicular.

A composição de sais deve ser avaliada, uma vez que alguns elementos podem apresentar toxicidade específica em plantas e, ainda causar desequilíbrio nutricional. A salinidade reduz a capacidade da planta de absorver água e, consequentemente, afeta a fotossíntese.

A água de boa qualidade para a irrigação deve ter CE < 0,75 dS m⁻¹ e, o crescimento das plantas, geralmente, não é afetado até 2,0 dS m⁻¹, embora possam ser encontradas respostas diferentes entre espécies e cultivares.

As águas salobras de diferentes fontes podem ser utilizadas para irrigação, desde que se adotem práticas de manejo adequadas, especialmente o uso de plantas tolerantes.

LITERATURA CITADA

Aktas, H.; Abak, K.; Cakmak, I. Genotypic variation in the response of pepper to salinity. *Scientia Horticulturae*, v.110, p.260-266, 2006.

Albornoz, F.; Torres, A.; Tapia, M. L.; Acevedo, E. Cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) hidropônico con agua desalinizada y desborificada en el valle de lluta. *Idesia*, v.25, p.73-80, 2007.

Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2. ed. Campina Grande: UFPB. 1999. 153p. FAO. Estudos Irrigação e Drenagem, 29

Blanco, F. F.; Folegatti, M. V. Doses de N e K no tomateiro sob estresse salino: III. Produção e qualidade de frutos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.122-127, 2008.

Blanco, F. F.; Folegatti, M. V.; Henriques Neto, D. Doses de N e K no tomateiro sob estresse salino: I. Concentração de nutrientes no solo e na planta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.26-33, 2008.

Brown, P. H.; Bellaloui, N.; Wimmer, M. A.; Bassil, E. S.; Ruiz, J.; Hu, H.; Pfeffer, H.; Dannel, F.; Römhild, V. Boron in Plant Biology. *Plant Biology*, v.4, p.211-229, 2002.

Duarte, H. H. F.; Souza, E. R. Soil water potentials and *Capsicum annuum* L. under salinity. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.40, p.1-11, 2016.

De Pascale, S.; Orsini, F.; Pardossi, A. Irrigation water quality for greenhouse horticulture. In: Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops; Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013. p.169-204. FAO Plant Production and Protection Paper 217

Hawkins, H. J.; Lewis, O. A. M. Effect of NaCl salinity, nitrogen form, calcium and potassium concentration on nitrogen uptake and kinetics in *Triticum aestivum* L. cv. Gametoos. *The New Phytologist*, v.124, p.171-177, 1993.

Kramer, P. J. Water relations of plants. New York: Academic Press, Inc., 1983. 489p.

Maas, E. V. Crop tolerance. *California Agriculture*, v.36, p.20-21, 1984.

Maas, E. V. Salt tolerance of plants. *Applied Agriculture Research*, v.1, p.12-26, 1986.

Maas, E. V. Crop salt tolerance. In: Tanji, K. K. (ed.) Agricultural salinity assessment and management. New York: ASCE, 1990. Cap. 13, p.262-304.

- Maas, E. V.; Hoffman, G. J. Crop salt tolerance - Current assessment. Journal of Irrigation and Drainage Division. v.103, p.115-134, 1977.
- Melo, H. F. Status hídrico em solo e *Atriplex nummularia* Lind. sob condições de estresse salino e hídrico. Recife: UFRPE, 2014. 82p. Dissertação Mestrado
- Oliveira, W. J.; Souza, E. R.; Almeida, B. G.; Silva, E. F. F.; Melo, H. F.; Leal, L. Y. C. . Soil water energetic status and cowpea beans irrigated with saline water. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.20, p.685-691, 2016.
- Phills, B.R.; Peck, N.H.; Macdonald, G. E.; Robinson, R. W. Differential response of *Lycopersicon* and *Solanum* species to salinity. Journal of the American Society for Horticultural Science, v.104, p.349-352, 1979.
- Rhoades, J. D.; Kandiah, A.; Mashali, A. M. Uso de águas salinas para produção agrícola. Campina Grande: UFPB, 2000. 117p. FAO. Estudos Irrigação e Drenagem, 48
- Richards, L. A. (ed.). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington D.C.: U.S. Salinity Laboratory, 1954. 160p. USDA. Agriculture Handbook, 60
- Rubio, F.; Flores, P.; Navarro, J. M.; Martinez, V. Effects of Ca^{+2} , K^{+} and cGMP on Na^{+} uptake in pepper plants. Plant Science, v.165, p.1043–1049, 2003.
- Suhayda, C. G.; Giannini, J. L.; Briskin, D. P.; Shannon, M. C. Eletrostatic changes in *Lycopersicon esculentum* root plasma membrane resulting from salt stress. Plant Physiology, v.93, p.471-478, 1990.
- Yoshida, K. Plant biotechnology genetic engineering to enhance plant salt tolerance. Journal Bioscience Bioengineering, v.94, p.585–590, 2002.
- Zeng, L.; Poss, J.; Wilson, C.; Draz, A. S. E.; Grieve, C. M. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by physiological characters. Euphytica, v.129, p.281-292, 2003.