



A FERTIRRIGAÇÃO E O PROCESSO DE SALINIZAÇÃO DE SOLOS EM AMBIENTE PROTEGIDO

Alexsandro Oliveira da SILVA*

Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, São Paulo, Brasil.

*E-mail: alexandro_oliveira01@hotmail.com

Recebido em maio/2014; Aceito em setembro/2014.

RESUMO: A fertirrigação é uma das alternativas para o parcelamento da adubação em cultivos agrícolas, evitando perdas por lixiviação ou volatilização dos adubos, porém o seu uso excessivo e inadequado pode levar a salinização de solos, principalmente em casas de vegetação, pois o excesso de fertilizantes eleva a condutividade elétrica na solução do solo, causando redução na produtividade das culturas. No presente texto, foram revisados trabalhos que direta ou indiretamente, abordaram o efeito da fertirrigação excessiva e sua contribuição ao processo de salinização de solos sob ambiente protegido, que apresentaram informações sobre a tolerância das culturas à salinização e seu manejo conjunto com a fertirrigação.

Palavra-chave: condutividade elétrica; solução do solo, fertilizantes.

FERTIGATION AND SOIL SALINIZATION PROCESS IN GREENHOUSE

ABSTRACT: Fertigation is one of the options to split fertilizer application in crops, preventing fertilizers losses by leaching or volatilization, but its excessive and inappropriate use can lead soil salinization in greenhouses, because the fertilizer excess increases the electrical conductivity in soil solution, reducing crops yield. In this article, were revised studies that directly or indirectly address the effect of excessive fertigation and its contribution to the salinization process in soils under greenhouse, which showed information about the crops tolerance to salinization caused by fertilizers and their joint management with fertigation.

Keywords: electrical conductivity; soil solution, fertilizers.

1. INTRODUÇÃO

A fertirrigação é uma das alternativas para o parcelamento da adubação em cultivos agrícolas, evitando perdas por lixiviação ou volatilização dos adubos (HAYNES, 1985) quando bem aplicada. Um manejo inadequado ou excessivas aplicações de fertilizantes podem levar a ocorrência de salinização dos solos, afetando assim, o desenvolvimento e produção das culturas (DIAS et al., 2006). Todos esses problemas causam prejuízos ao produtor rural, como: produto final de baixa qualidade comercial, degradação do solo e recursos hídricos, além do desperdício dos produtos fertilizantes. Tradicionalmente, o manejo da fertirrigação é realizado ministrando-se quantidades pré-estabelecidas de fertilizantes, parceladas de acordo com a marcha de absorção da cultura, não existindo normalmente nem monitoramento da concentração de íons na solução do solo, nem do estado nutricional da planta (VILLAS BÔAS et al., 2002; SILVA, et al., 2000).

A salinização dos solos é um fator crítico para a produção vegetal em ambiente protegido, devido à baixa tolerância à salinidade de plantas comerciais (ELOI et al., 2011; MEDEIROS et al., 2012). Em geral, a salinização

em ambiente protegido ocorre com a acumulação de determinadas espécies iônicas, como os cátions Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} e os ânions Cl^- e SO_4^{2-} , afetando o consumo de água dos vegetais, aumentando o potencial osmótico no solo e diminuindo o potencial hídrico das plantas, além de provocar antagonismos iônicos devido ao excesso de nutrientes como Cl^- e Ca . Segundo Cramer et al. (1994) o efeito causado pelo estresse salino na nutrição mineral das plantas depende da espécie cultivada, a intensidade e duração do estresse salino, o teor de água no solo e o estágio de desenvolvimento da planta.

Dentre os fatores que causam a rápida salinização de solos em casas de vegetação esta a condutividade elétrica (CE) dos fertilizantes aplicados (VILLAS BÔAS et al., 1999) pois, muitas vezes a fertirrigação é aplicada de forma empírica sem levar em consideração fatores como a fertilidade atual do solo e a necessidade nutricional da cultura, além disso, a escolha do fertilizante deve ser feita com base nas características de cada produto, visando atender às necessidades dos demais elementos envolvidos no processo, gerando uma condutividade elétrica na solução do solo tolerável a cultura, evitando assim perdas na produção (VILLAS BÔAS et al., 2002). Deve-se,

portanto observar que os sais fertilizantes são nutrientes e que parte destes serão absorvidos pela cultura e a outra parte serão acumulados no solo, isto se somado a ciclos sucessivos pode haver acúmulos excessivos de sais no solo. Portanto, evitar o processo de salinização em ambiente protegido antes que este possa prejudicar a produção das culturas se faz necessário. Em função disso, e por ser a fertirrigação uma técnica que permite alterações rápidas e precisas na quantidade de nutrientes aplicados, torna-se importante promover o monitoramento da solução do solo através da condutividade elétrica (ELOI et al., 2011; DIAS et al., 2005). A partir da determinação periódica da CE pode-se promover os ajustes necessários ainda durante o ciclo da cultura além de determinar o potencial salino da solução do solo e, quando esta é retirada de camadas mais profundas, permite diagnosticar se está ocorrendo lixiviação de nutrientes (VILLAS BÔAS et al., 2002). Dentre os problemas para a determinação da condutividade elétrica nos solos, deve-se destacar o tempo para a realização destas observações via laboratório, pois o método padrão que consiste na determinação da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEs), aumenta o tempo desta análise, pois além do mesmo ser demorado é muito trabalhoso (DANTAS et al., 2005).

Atualmente alguns métodos de campo foram desenvolvidos com a finalidade de se obter a solução do solo de maneira mais rápida e simples, dentre estes, o extrator de solução do solo é um dos mais recomendados por unir uma boa relação entre custo e precisão (OLIVEIRA et al., 2011; SILVA et al., 2000), além de representar de uma maneira mais ampla os níveis de condutividade elétrica (CE) diretamente no local em que a planta esta se desenvolvendo (MEDEIROS et al., 2012; ELOI et al., 2011; DIAS et al., 2005). Outras vantagens do uso de extratores de solução do solo é que as soluções extraídas encontram-se em umidade equivalente ao momento em que a solução do solo é absorvida pela planta e os solutos são os mesmos, a amostragem é sistemática e não destrutiva. Uma vez que o monitoramento periódico tenha sido estabelecido, a concentração de fertilizantes aplicados via fertirrigação pode ser controlada ficando em uma faixa adequada para o estabelecimento das plantas e o pleno desenvolvimento destas (MEDEIROS et al., 2012).

No presente texto, procurou-se revisar os trabalhos que direta ou indiretamente, abordaram o efeito da fertirrigação excessiva e sua contribuição no processo de salinização em solos sob ambiente protegido, objetivando-se contribuir para a organização das informações até então geradas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Salinidade na agricultura irrigada

A salinização pode conduzir à desertificação em áreas antes agricultáveis. É um fenômeno crescente em todo mundo e afeta milhões de hectares de solos em todas as áreas em que não são conduzidas práticas agrícolas adequadas. Segundo Duarte et al. (2007), o termo salinidade da água e do solo está diretamente ligado ao teor de sais contidos nos mesmos e que, quando em elevadas quantidades na zona radicular podem provocar uma baixa disponibilidade de água para as plantas,

reduzindo assim, em alguns casos a produção das culturas. Além disso, o excesso de sais pode alterar a estrutura do solo, pois a adsorção de sódio pelo solo, proveniente de águas dotadas de elevados teores deste elemento, pode provocar a dispersão das frações de argila e consequentemente, diminuir a permeabilidade do solo.

Segundo Bernardo et al. (2006), no Brasil a salinização dos solos tem sido causada principalmente pelos seguintes motivos: irrigações mal conduzidas ocasionando a elevação do lençol freático, utilização de águas de qualidade inferior (alta salinidade) adicionando sais ao solo o que pode acarretar em problemas de infiltração da água no solo e toxicidade às plantas (ALMEIDA, 2010), manejo incorreto da adubação, solos mal drenados, naturalmente ou artificialmente, entre outros. Segundo Batista et al. (2002), todo solo situado em regiões climáticas caracterizadas por baixas precipitações e altos déficits hídricos climáticos e que, sejam mal drenados, com o tempo, tende a se tornar salino com a irrigação, mesmo que esta seja feita com água de boa qualidade.

Na agricultura nem sempre é possível encontrar águas de boa qualidade para utilização na irrigação, levando os produtores a utilizarem águas de qualidade inferior. Estas, quando aplicadas de maneira inadequada, podem prejudicar o desenvolvimento das culturas (AYERS; WESTCOT, 1985). Segundo Rhoades et al. (1999) a utilização das águas para a irrigação depende das condições de uso, incluindo-se culturas, clima, solos, métodos de irrigação e práticas de manejo. Por isso, deve-se sempre fazer análises da água a ser utilizada na irrigação, baseadas de acordo com os efeitos que podem prejudicar o solo e a cultura, como sugere Bernardo et al. (2006), para que tais ações possam controlar e amenizar problemas de salinização do solo.

A salinidade pode ocorrer tanto em ambientes abertos como em cultivo protegido. Neste último, apesar de ser uma das opções para uma agricultura intensiva e de produção elevada, a salinização ocorre em um menor tempo, pois ao contrário do cultivo em campo aberto, em que precipitações podem promover a lixiviação dos sais quando associados à permeabilidade e drenagem do solo, em condições de cultivo em ambiente protegido esse tipo de processo não é possível, pois os solos dentro de tais ambientes se comportam de maneira semelhante às regiões semiáridas (SILVA et al., 2000; DIAS et al., 2005), devido a proteção contra às chuvas e uma evaporação frequente, havendo um acúmulo de sais pelas excessivas adubações durante vários ciclos de cultivo, normalmente causadas pela prática da fertirrigação.

O uso de sais fertilizantes seja pela adubação convencional ou pela fertirrigação, quando aplicados excessivamente podem causar aumento da salinidade do solo (ELOI et al., 2011; MEDEIROS et al., 2012). Segundo Villas Bôas et al. (2002) o cultivo fertirrigado acelera o processo de salinização quando se utilizam fertilizantes com maior poder de salinização, medidos pelo seu índice salino global ou parcial.

Na literatura existem diversos estudos sobre problemas de salinidade relacionados principalmente com a fertirrigação, Dias et al. (2006) atribuíram os efeitos sobre o rendimento do meloeiro em cultivo protegido aos elevados níveis de sais aplicados via fertirrigação. Já Eloi

et al. (2007) em estudos com a cultura do tomate atribuíram os problemas no rendimento comercial dos frutos da cultura, aos elevados níveis de sais acumulados no solo, proporcionado pelas altas doses de fertirrigação aplicadas.

Segundo Coelho et al. (2011) outro importante impacto da fertirrigação no solo seria a redução do pH deste, devido a fontes nitrogenadas como a ureia. Estes autores afirmam que com a ocorrência da absorção de cátions em maior quantidade em relação aos ânions, as raízes das plantas tendem a compensar excretando prótons (H^+) acidificando a rizosfera. Porém quando há maior absorção de ânions, as raízes tendem a compensar liberando hidroxilas (OH^-) reagindo com o CO_2 resultando em bicarbonatos HCO_3^- , alcalinizando a rizosfera.

2.2. Efeito da salinidade nas plantas em ambiente protegido

Segundo Ayers; Westcot (1985) as culturas sensíveis à salinidade sofrem uma redução progressiva da produção à medida que a concentração salina aumenta, além de um menor crescimento que é evidenciado pelo tamanho das folhas, caule e frutos. Em condições salinas as plantas passam a ter dificuldades de absorção de água tendendo a excluir os sais na absorção da solução do solo pelas raízes, havendo, contudo um gasto extra de energia para tanto, levando ao estresse hídrico por osmose. Tal dificuldade de absorção de água pelas plantas segundo Reichardt (1996) é explicado pela contribuição do potencial osmótico no potencial total de água no solo.

Segundo Larcher (2000), a redução do crescimento foliar nas plantas, está relacionada com a diminuição da produção de matéria seca da parte aérea e radicular, podendo ser influenciada diretamente pelo acúmulo de altos teores de Na^+ e Cl^- . Silva et al. (2013) e Silva et al. (2000) afirmam que a concentração eletrolítica da solução do solo, causada pelo excesso de adubação, pode ainda causar desequilíbrio nutricional, toxicidade de alguns íons e interferência hormonal, causando a diminuição da plasticidade das células e redução da permeabilidade da membrana citoplasmática da planta, influenciando assim no processo da fotossíntese, já que o conteúdo de clorofila nas plantas é diminuído.

A redução do crescimento e rendimento das plantas devido ao estresse salino esta relacionado com os efeito adversos do excesso de sais sob homeostase iônica, balanço hídrico, nutrição mineral e metabolismo de carbono fotossintético (Zhu, 2001), sendo que cada cultura apresenta tolerância ao excesso de sais no solo até uma faixa limite de CE (Figura 1), reduzindo o seu rendimento em solos com condutividade elétrica mais elevadas. Em ambientes salinos, o NaCl é o sal predominante e o que causa maiores danos às plantas principalmente em regiões áridas e semiáridas, porém em condições de ambiente protegido os sais fertilizantes como os adubos nitrogenados, potássicos e fosfóricos são os principais responsáveis pelo efeito salino, pois estes são utilizados com maiores frequências.

Estudos apresentados recentemente permitem observar que a salinização induzida com excesso de fertilizantes aplicados ao solo é menos incisiva na redução da produção dos cultivos comerciais do que a salinidade

ocasionada pela qualidade da água de irrigação. Silva et al. (2013), em estudos realizados em Botucatu-SP, concluíram que o aumento da salinidade do solo, causada pelo excesso de fertilizantes, promoveu no cultivo de beterraba uma redução do consumo de água pelas plantas. Eloi et al. (2011) observaram redução nas variáveis produtivas do tomateiro submetida a diferentes níveis de salinidade do solo em ambiente protegido. Medeiros et al. (2009), avaliando a cultura do pepino conduzido sobre condições salinas, proveniente de sais fertilizantes observaram uma queda na produção, após o ponto limiar na ordem de 19,33%, para cada aumento de uma unidade de salinidade do solo (em $dS m^{-1}$).

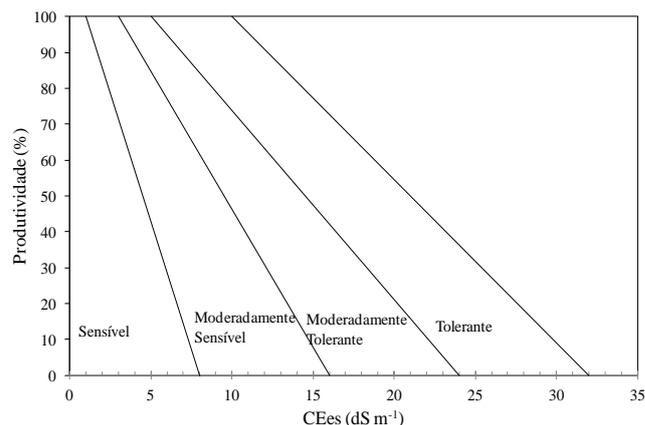


Figura 1 Relação entre produtividade e a salinidade do solo medida através do extrato de saturação do solo (CEes), adaptado de Ayers; Westcot (1985).

Ayers; Westcot (1985) relatam os efeitos relativos de cada íon nas plantas e afirmam que nem todas as culturas apresentam a mesma sensibilidade e que os sintomas de toxicidade frequentemente acompanham ou complicam os efeitos da salinidade. Segundo Silva et al. (2000), a toxidez mais comum é a toxidez por cloreto de sódio, advinda da água de irrigação que também pode ser absorvido diretamente através das folhas quando estas são molhadas durante a irrigação por aspersão. Adicionalmente, trabalhos relatam o problema de toxicidade das plantas com outros elementos como, por exemplo, o íon boro em que os sintomas, segundo Ayers e Westcot (1985), aparecem nas plantas geralmente como manchas amarelas ou secas nas bordas e ápices das folhas mais velhas e que à medida que há acúmulo do elemento, os sintomas se estendem pelas áreas internervurais até o centro das folhas.

Autores como Maas; Hoffmann (1977) afirmam que as diferentes espécies de plantas variam sua tolerância à salinidade possibilitando assim em alguns casos o cultivo em solos salinos com manejo adequado, combinando a espécie a ser utilizada com as épocas de plantio.

2.3. Manejo da fertirrigação e salinização

Dentre as técnicas utilizadas para a elevação da produtividade das plantas se encontra a fertirrigação, que consiste na aplicação de fertilizantes através do sistema de irrigação, tornando-se uma prática comum na agricultura irrigada moderna (HANSON et al., 2006). Dentre as vantagens da fertirrigação destaca-se o parcelamento da adubação durante todo o ciclo ou parte dele em uma

frequência estabelecida de acordo com a necessidade nutricional da cultura, evitando perdas por lixiviação e volatilização dos fertilizantes (MEDEIROS et al., 2012) quando bem manejada.

O manejo da fertirrigação nestas áreas normalmente é feito através da aplicação de quantidades preestabelecidas de fertilizantes, sem qualquer monitoramento do estado nutricional da planta durante o período de cultivo, o que tem ocasionado problemas com a salinidade do solo e sintomas de toxidez nas plantas, provocando o desestímulo da sua utilização por parte dos produtores (SILVA et al., 2000; ELOI et al., 2007). Por essa razão e por ser uma técnica que exige alterações rápidas e precisas nas quantidades de nutrientes aplicados, é importante o monitoramento do manejo da fertirrigação de modo a promover os ajustes necessários durante o ciclo da cultura (OLIVEIRA, et al., 2011; DIAS et al., 2005; SILVA et al., 2000).

A maneira mais utilizada para a realização da recomendação e monitoramento da adubação é através dos resultados de análise de solo e foliar. Porém, tais métodos apresentam alto custo e são demorados, desde a coleta das amostras até a obtenção de resultados. Portanto, há o interesse pela utilização de ferramentas que possibilitem a obtenção mais rápida de informações que possibilitem ajustes imediatos no manejo da adubação, de modo a aumentar a eficiência do uso dos nutrientes aplicados e evitar problemas relacionados com a acidificação e a salinização dos solos (SOUZA et al., 2012; MEDEIROS et al., 2012).

Algumas técnicas vêm sendo estudadas através de pesquisas envolvendo cultivos fertirrigados para monitorar as concentrações de nutrientes disponíveis para as plantas de maneira mais ágil. Dentre estas técnicas está a utilização de kits específicos que determinam a concentração de nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) através da solução do solo (SOUZA et al., 2012, BLANCO et al., 2008; SILVA et al., 2000) e seiva das plantas, além desta técnica, instrumentos que medem a intensidade da coloração verde das folhas denominados de clorofilômetros podem ser utilizados (SOUZA et al., 2011). Porém, análises foliares não devem ser desprezadas, já que os resultados destas podem auxiliar em planejamentos futuros. Tudo isso leva a crer que, alternativas de rápida assimilação pelo produtor devem ser desenvolvidas pela pesquisa, para o manejo adequado da fertirrigação, aumentando a produtividade sem agredir o meio ambiente e utilizar recursos naturais de maneira desnecessária. Além disso, devem ser considerados os custos que envolvem tais técnicas para que produtores com menores receitas sejam favorecidos.

2.4. A solução do solo e a sua relação com a fertirrigação

A solução do solo é a fração líquida do solo, formada por uma solução aquosa constituída de sais minerais, estes providos do próprio solo ou advindos da fertirrigação e substâncias orgânicas, sendo os sais minerais de maior importância (LIBARDI, 2012; REICHARDT, 1996). Devido à interação constante entre a fração sólida (reservatório de íons) e a fração líquida, regida pela solubilidade e constantes de equilíbrio, a concentração da solução do solo torna-se complexa e difícil de ser descrita conforme afirma Martinez et al. (2010). Sendo assim,

pode-se apenas serem obtidos valores médios e aproximados da sua concentração (LIBARDI, 2012). Devido às interferências do meio externo e interno a solução do solo possui composição variável, pois existe uma série de processos dinâmicos entre as diferentes fases do solo (sólida, líquida e gasosa) além da interação destas com a planta envolvendo a absorção de nutrientes pelas raízes e seu subsequente transporte para a parte aérea.

Dentre alguns fatores a serem citados sobre a solução do solo, a solubilidade dos sais merece atenção, pois quanto maior for a concentração salina da solução do solo, maior será seu efeito sobre as plantas (ELOI et al., 2011, MEDEIROS et al., 2012). Os fatores que afetam a solubilidade dos sais são: o efeito salino devido ao aumento da solubilidade de um sólido com o aumento da concentração de um eletrólito, cujos íons não são comuns aos do sólido precipitado; efeito do íon comum devido à diminuição da solubilidade de um sólido pelo aumento da concentração de um eletrólito, cujos íons são comuns aos do sólido precipitado e efeito de associação iônica no qual a solubilidade de um sólido aumenta quando é aumentada a concentração de um agente, que se liga ou associa aos íons desse sólido. Dentre os principais efeitos causados pela elevada concentração de sais na solução do solo para a agricultura, pode-se citar a redução no desenvolvimento e produção das culturas como mostram trabalhos realizados por Silva et al. (2013), Medeiros et al. (2009), com as culturas da beterraba e pepino respectivamente.

Para a fertirrigação a principal medida para estimar a concentração de sais na solução do solo é denominada condutividade elétrica (CE) que é caracterizada como uma medida da concentração total de sais na solução do solo, considerada uma propriedade importante para o conhecimento da salinidade de uma solução, sendo uma medida unicamente dos solutos (íons), carregados da solução do solo, amplamente usada na determinação do extrato de saturação do solo (CEes), que geralmente é tomado como índice de salinidade (SILVA et al., 2000; RHOADES et al., 1999). O valor de CE aumenta à medida que o solo perde umidade, isto é, sua solução concentra-se, por isso, para a determinação do efeito da salinidade sobre as plantas é necessário obtê-la na faixa de umidade do solo na qual a planta se encontra. Na literatura existem diversos trabalhos sobre a movimentação e concentração dos íons na solução do solo, baseados na condutividade elétrica (OLIVEIRA et al., 2011) ou sendo concentrados apenas na movimentação de um determinado nutriente no composto da solução do solo (MIRANDA et al., 2005) ou até mesmo, no transporte do soluto como um todo (BORGES JÚNIOR; FERREIRA, 2006), utilizando para tanto, cálculos diferenciais que descrevem estes movimentos.

2.5. Movimento de sais na solução do solo

O movimento de sais na solução do solo é realizado através do fluxo de íons no solo no qual este se dá por dois processos: difusão e transporte de massa. Segundo Reichardt (1996), a difusão é o movimento de íons devido ao gradiente de atividade e a transferência de massa é o movimento de íons arrastados pelo fluxo de água. No caso do processo de difusão, o fluxo de soluto pode ser determinado a partir da equação fundamental da difusão de Fick (Equação 1).

No processo de transporte de massa, a força atuante no movimento é o gradiente hidráulico que está contido no fluxo de água em que os solutos do solo podem mover-se arrastados por este fluxo (Equação 2).

$$j = -D_o \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{Equação 1})$$

$$j' = qC_L \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: j é a densidade de fluxo de um íon (ou composto) ($M L^{-2} T^{-1}$); Isto é, quantidade que atravessa a unidade de secção transversal por unidade de tempo; D_o = coeficiente de difusão molecular de soluto em água ($L^2 T^{-1}$); $\partial C/\partial x$ = é o gradiente de concentração ($M L^{-4}$); j' = é o fluxo por transferência de massa ($g \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$); q = é o fluxo d'água (cm^3 de água cm^2 de secção transversal min^{-1}); C_L = concentração residente ou concentração na solução do solo, $M L^{-3}$.

Segundo Reichardt (1996) e Libardi (2012), é comum ocorrer os processos de fluxo de massa e difusão de forma simultânea, quando a água se move através da infiltração no solo e pela diferença de concentração provocada pela adição de sais após um evento de fertirrigação. Nesse caso, o fluxo total de íons (j_t) se deve a difusão e o transporte de massa é calculado pela soma algébrica dos dois processos (Equação 3).

$$j_t = j + j' = -D_o \frac{\partial C}{\partial x} + C_L \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: j_t = fluxo total de íons ($M L^{-2} T^{-1}$).

O movimento de íons esta relacionado à intensidade de percolação e ao comportamento de cada um em relação às condições de fixação e adsorção, os quais estão em função de características de cada íon e do tipo de solo em que se encontram. Em simulação de deslocamento de potássio em colunas verticais de solo não saturado Miranda et al. (2005) afirmam que é necessário determinar os parâmetros de transporte quando se trata da estimativa do deslocamento dos sais. Porém, além do deslocamento dos sais no solo deve-se considerar os processos em que os mesmos estão submetidos na interação solo-água-planta, aplicando-se então o princípio da conservação das massas contido em Martinez et al. (2010), na qual a massa de soluto é transferida para dentro do volume controle, subtraindo-se a massa de soluto que sai do volume controle por unidade de tempo e admitindo-se a extração de soluto pelas plantas e a transformação química e biológica do soluto no solo, como as transformações de nitrogênio em amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) por exemplo, tem-se conforme a Equação 4 o processo geral do movimento dos sais.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta C_L + \rho_s C_s) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D\theta \frac{\partial C_L}{\partial x} - qC_L \right) - \Gamma - \Psi \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: t = tempo, T ; θ - teor de água do solo, em base volume, $L^3 L^{-3}$; C_L = concentração residente ou concentração na solução do solo, $M L^{-3}$; ρ_s = densidade aparente do solo, $M L^{-3}$; C_s = concentração adsorvida (massa de soluto por unidade de massa de solo); x = distância em relação à superfície do solo, L ; D - coeficiente dispersivo-difusivo, $L^2 T^{-1}$; q = densidade de fluxo, $L T^{-1}$; Γ = taxa de extração de soluto do solo pelas plantas ($M L^{-3} T^{-1}$); Ψ = taxa de transformação do soluto no solo ($M L^{-3} T^{-1}$).

Considerando o escoamento constante, ou seja, θ e q constantes, a equação anterior se torna a equação de convecção e dispersão para meio inerte e soluto (COELHO et al., 2011; MARTINEZ et al., 2010), conforme observado nas Equações 5 e 6.

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_L}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_L}{\partial x} - \Gamma - \Psi \quad (\text{Equação 5})$$

$$R = 1 + \frac{\rho_s k_d}{\theta} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: R é o fator de retardamento sendo dado pela equação (6); k_d é o coeficiente de partição ($L^3 M^{-1}$).

Deve-se resaltar que devido a grande complexidade da interação do solo com os fatores planta e água, poucos trabalhos tem sido desenvolvidos considerando todos estes fatores em um mesmo ambiente, dificultando assim o entendimento deste processo como um todo, porém para as condições de salinidade em ambiente protegido, é de suma importância entender a movimentação dos sais na solução do solo.

2.6. Monitoramento dos sais na solução do solo

O conhecimento da composição química da solução do solo, bem como da condutividade elétrica é importante para verificar a disponibilidade de nutrientes, determinar o potencial osmótico e até a presença de íons tóxicos, ao longo do ciclo de uma cultura (MEDEIROS et al., 2012; SILVA et al., 2000). Por isso, o monitoramento da solução do solo deve ser feito várias vezes durante o ciclo de cultivo para evitar problemas de salinização do solo e não comprometer a produção da cultura. Na literatura, encontram-se trabalhos nos quais o monitoramento da solução do solo é realizado para determinar a condutividade elétrica do solo. Silva et al. (2000) perceberam que a condutividade elétrica e a concentração de potássio na solução do solo pode ser monitorada com razoável precisão através de extratores com cápsulas porosas. Dias et al. (2005), em estudos com melão rendilhado, utilizou esta técnica para o monitoramento da condutividade elétrica da solução do solo e o desenvolvimento da cultura sob diferentes níveis de salinidade.

Além de extratores com cápsulas porosas, existem diversas outras técnicas para a retirada da solução do solo. Algumas destas técnicas são apresentadas por Wolt (1994), dentre elas a centrifugação, deslocamento em coluna, extração em membrana sob pressão, extrato de saturação, extratos aquosos e métodos lisimétricos. Segundo este autor o desafio de tais métodos é comprovar que a solução obtida é uma representação fiel da solução antes de sua extração. Este questionamento também é levantado por Blanco et al. (2008), no qual afirma que a obtenção de uma amostra de solução que seja uma representação fiel da solução em seu estado natural não depende apenas do método utilizado para sua obtenção, depende também das alterações promovidas no processo como um todo. Com base no exposto, qualquer que seja o método utilizado, provavelmente haverá um erro envolvido na concentração iônica determinada na solução do solo devido a sua complexidade, porém em condições

de cultivo comercial, estes erros podem ser irrelevantes, pois a máxima precisão de dados é comumente utilizada apenas em pesquisas de envolvimento científico.

Portanto, a solução do solo tem grande importância na fertirrigação, devido a sua utilização no monitoramento da CE através de sua extração, facilitando o controle dos níveis de fertilizantes durante o cultivo, com auxílio de extratores com cápsulas porosas ou os demais métodos utilizados para medição da CE.

2.7. Potencial salino dos fertilizantes

Um dos principais fatores para a salinização de solos devido ao uso inadequado da fertirrigação é a combinação de fertilizantes utilizadas durante os ciclos de cultivo, pois a condutividade elétrica de cada fertilizante aplicado durante a fertirrigação deve ser observada para que não haja um excesso de sais na solução, aumentando assim a CE em demasiado prejudicando o cultivo. Segundo Medeiros et al. (2012), parte dos sais fertilizantes adicionados ao solo junto com a água de irrigação (técnica da fertirrigação) é consumida e o restante se deposita nos colóides do solo com potencial para aumentar a concentração eletrolítica da solução do solo, sobretudo depois de sucessivas aplicações de fertirrigação, podendo chegar a ponto de reduzir o desenvolvimento vegetativo das culturas e posteriormente o rendimento.

Segundo Villas Bôas et al. (1999), a salinidade do solo se refere ao conteúdo de sais solúveis na solução do solo no qual os sais mais comuns são os cloretos, sulfatos, bicarbonatos, nitratos e boratos de sódio, magnésio e cálcio. Alguns problemas de salinidade são naturalmente criados pelo manejo inadequado de fertilizantes que inclui a quantidade aplicada e a escolha dos fertilizantes em relação às suas características de salinidade. A Tabela 2 apresenta o índice de salinidade de alguns adubos aplicados na fertirrigação.

Tabela 1. Índice de salinidade e potencial salino (concentração de 1 g L^{-1}) de alguns produtos usados em fertirrigação (VILLAS BÔAS et al. 1999).

Fertilizantes	Conc. %	IG	IP	CE dS m^{-1}
Nitrato de amônio	35,0	104,7	2,99	0,90
Ureia	46,6	75,4	1,62	0,07
Sulfato de amônio	21,2	69,0	3,25	2,10
Fosfatos monoamônicos	61,7	29,9	0,49	0,80
Nitrato de potássio	44,0	73,6	5,34	1,30
Sulfato de potássio	54,0	46,1	0,85	1,40

IG - índice global, IP- índice parcial

O valor do índice salino (global) é dado de forma relativa, atribuindo-se o maior índice ao nitrato de sódio (NaNO_3) com valor de 100, sendo este a referência dos demais fertilizantes. Segundo Villas Bôas et al. (1994), o índice salino por unidade de nutriente (índice parcial) é dado pela concentração de um determinado nutriente no fertilizante, por exemplo, o nitrato de sódio ($16,5\% \text{ NaNO}_3$) apresenta índice parcial de 6,06 por unidade de NaNO_3 , enquanto o nitrato de amônio esse índice é de 2,99 e para o fosfato monoamônico o valor é 0,49. Portanto, o potencial salino é tanto maior quanto mais seco estiver o solo, aumentando o potencial osmótico e reduzindo a extração de água pelas plantas, sendo

necessário manter o solo sempre úmido através de uma frequência maior de irrigação e menores volumes de água, pois quanto maior a concentração de sais na solução do solo maior é a dificuldade das plantas na absorção de água pelas raízes, causando efeitos indesejáveis na sua produção (SILVA et al., 2013; ELOI et al., 2011).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o uso da fertirrigação em ambiente protegido se faz necessário um monitoramento adequado da solução do solo, evitando riscos de salinização, devendo-se estabelecer um acompanhamento da fertilidade do solo por meio de análises periódicas, devido o risco de antagonismos iônicos nas plantas causados pela toxicidade por excesso de um determinado nutriente.

O monitoramento da salinidade do solo por meio de extratores de cápsulas porosas vem mostrando ótima eficiência para o controle da condutividade elétrica na solução do solo, sendo a melhor opção devido à relação custo-benefício e a sua representatividade em campo.

4. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, O. A. de. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas: EMBRAPA, 2010. 234p.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. Rome: FAO, 1985. 147p. (Irrigation and Drainage Paper, 29)

BATISTA, M. J. et al. **Drenagem como instrumento de dessalinização e prevenção da salinização de solos**. 2.ed. Brasília: CODEVASF, 2002. 216p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BLANCO, F. F. et al. Doses de N e K no tomateiro sob estresse salino I: concentração de nutrientes no solo e na planta. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.12, n.1, p. 26-33, jan./fev. 2008.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.3, p.604-611, jul./set. 2006.

COELHO, E. F. et al. Aspectos básicos em fertirrigação. In: SOUSA, V. F. et al. (Eds.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011, p.233-252.

CRAMER, G. R. et al. Salt tolerance is not associated with the sodium accumulation of two maize hybrids. *Australian Journal of plant Physiology*, Melbourne, v.21, n.6, p.675-692, nov./dez.1994.

DANTAS, D. C. et al. Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo a partir de extratos 1:2 pelo método do eixo principal reduzido. *Irriga*, Botucatu, v.10, n.4, p.335-340, out./dez. 2005.

- DUARTE, S. N. et al. Recuperação de um solo salinizado devido a excesso de fertilizantes em ambiente protegido. **Irriga**, Botucatu, v.12, n.3, p.422-428, jul./set. 2007.
- DIAS, N. S. et al. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, p.496-504, out./dez. 2005.
- DIAS, N. S. et al. Salinidade e manejo da fertirrigação em ambiente protegido. II: Efeitos sobre o rendimento do meloeiro. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 3, p. 376-383, jul./set. 2006.
- ELOI, W. M. et al. Rendimento comercial do tomateiro em resposta à salinização ocasionada pela fertigação em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.5, p.471-476, maio 2011.
- ELOI, W. M. et al. Níveis de salinidade e manejo da fertirrigação sobre as características do tomateiro cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 1, p. 83-89, jan./mar. 2007.
- HAYNES, R. J. Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. **Fertilizer Research**, The Hague, v.6, n.3, p.235-255, ago. 1985.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531p.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2012. 344p.
- MARTINEZ, M. A. et al. Modelagem do movimento de sais no solo. In: GHEYI, H. R. et al. (Ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2010. p.93-113.
- MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance, currents assessment. **Journal Irrigation and Drainage Divison**, New York, v. 103, p. 115-114, jun.1977.
- MEDEIROS, P. R. F. et al. Eficiência do uso de água e de fertilizantes no manejo de fertirrigação no cultivo do tomateiro sob condições de salinidade do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.7, n.2, p.344-351, abr./jun. 2012.
- MEDEIROS, P. R. F. et al. Tolerância da cultura do pepino a salinidade em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.406-410, jul./ago. 2009.
- MIRANDA, J. H. et al. Simulação do deslocamento de potássio em colunas verticais de solo não-saturado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.677-685, jul./set. 2005.
- OLIVEIRA, F. A. et al. Calibração de extratores providos de cápsulas porosa para o monitoramento da salinidade e da concentração de íons. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.3, p.520-528, jul./set. 2011.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2.ed. Piracicaba: Ed. ESALQ, 1996. 513p.
- RHOADES, J. D. et al. **Soil salinity assessment methods and interpretation of electrical conductivity measurements**. Rome: FAO, 1999. 155p. (Irrigation and Drainage, 57)
- SILVA, A. O. et al. Relações hídricas em cultivares de beterraba em diferentes níveis de salinidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.11, p.1143-1151, nov. 2013.
- SILVA, E. F. F. et al. Extratores de capsulas porosas para o monitoramento da condutividade elétrica e do teor de potássio na solução do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 785-789, out./dez. 2000.
- SOUZA, T. R. et al. Dinâmica de nutrientes na solução do solo em pomar fertirrigado de citros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.6, p.846-854, jun. 2012.
- SOUZA, T. R. et al. Medida indireta da clorofila e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada em plantas de cítricas fertirrigadas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.33, n.3, p.993-1003, set. 2011.
- VILLAS BÔAS, R. L. et al. Uso e manejo de fertilizantes em fertirrigação. In: ZANINI, J. R. et al. **Uso e manejo da fertirrigação e hidroponia**. Jaboticabal: FUNEP, 2002, p.1-26.
- VILLAS BÔAS, R. L. et al. Fertilizantes em fertirrigação. In: FOLEGATTI, M. (Ed.). **Fertirrigação: citros, flores e hortaliças**. Piracicaba, Agropecuária, 1999. p.235-319.
- WOLT, J. D. **Soil solution chemistry: applications to environmental science and agriculture**. New York: Wiley, 1994. 345p.
- ZHU, J. K. Plant salt tolerance. **Trends in Plant Science**, Oxford, v.6, n.2, p.66-71, fev. 2001.